



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](#)

2011年 2月  
博士學位論文

전력계통 보호용 변압기형 초전도  
한류기의 과도특성

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

趙鎔善

2011年  
2月  
博士學位論文

전력계통 보호용  
변압기형 초전도  
한류기의 과도특성

趙鎔善

전력계통 보호용 변압기형 초전도  
한류기의 과도특성

**Transient Characterization of the Transformer-Type SFCL for  
Power System Protection**

2011年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

趙鎔善

전력계통 보호용 변압기형 초전도  
한류기의 과도특성

指導教授 崔孝祥

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함.

2010年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

趙鎔善

# 趙鎔善의 博士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 白 亨 來 印

委員 朝鮮大學校 教授 吳 金 坤 印

委員 朝鮮大學校 教授 李 愚 宣 印

委員 朝鮮大學校 教授 曹 錦 培 印

委員 朝鮮大學校 教授 崔 孝 祥 印

2010年 12月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

## ABSTRACT

I. 서 론 .....	1
II. 초전도 한류기의 개요 .....	4
A. 변압기형 초전도 한류기의 원리 .....	5
1. 구조 및 동작원리 .....	5
2. 등가회로도 분석 .....	6
B. 변압기형 초전도 한류기의 동작특성 .....	11
C. 변압기형 초전도 한류기 설계 및 제작 .....	15
1. 3상 변압기 설계 및 제작 .....	15
2. 초전도 소자 .....	15
3. 변압기형 초전도 한류기의 실험장치 구성 .....	17
D. 변압기형 초전도 한류기의 용량증대 방안 .....	19
1. 사고전류 제한 및 켄치특성 .....	22
2. 초전도 소자의 소비전력 특성 .....	24
3. 초전도 소자의 회복특성 .....	26
III. 3상 변압기형 초전도 한류기의 동작특성 .....	30
A. 3상 변압기형 초전도 한류기 .....	30
1. 실험조건 .....	30

2. 사고유형별 특성 해석 .....	33
B. 3상 변압기형 초전도 한류기의 사고유형별 동작특성 ...	36
1. 1선 지락사고 .....	36
2. 2선 지락사고 .....	42
3. 3선 지락사고 .....	49
C. 3상 변압기형 초전도 한류기의 사고유형별 과도해석 ...	55
1. 과도해석법 .....	55
2. 변압기형 초전도 한류기의 사고유형별 과도해석 .....	56
<b>IV. 3상 변압기형 초전도 한류기의 전력망 적용 .....</b>	<b>65</b>
A. 전력망 적용을 위한 전력망 모델 구성 .....	65
1. 초전도 한류기의 모의 결과 .....	70
B. 초전도 한류기가 적용된 전력망 시뮬레이션 .....	73
1. 1선 지락사고 .....	73
2. 2선 지락사고 .....	80
3. 2선 단락사고 .....	87
4. 3선 지락사고 .....	93
5. 3선 단락사고 .....	99
<b>VI. 결    론 .....</b>	<b>106</b>

## 참고문헌

## List of Tables

Table 2-1 Turn ratios between primary and secondary coils of a transformer according to Cases .....	21
Table 4-1 Parameters of Feeders .....	66
Table 4-2 Parameters of power line and overhead earth line in the distribution power system .....	66
Table 4-3 Comparison between the positive and negative sequence currents of three section during the single line-to-ground fault .....	80
Table 4-4 Comparison between the positive and negative sequence currents of three section during the double line-to-ground fault .....	86
Table 4-5 Comparison between the positive and negative sequence currents of three section during the double line-to-line fault .....	92
Table 4-6 Comparison between the positive and negative sequence currents of three section during the triple line-to-ground fault .....	98
Table 4-7 Comparison between the positive and negative sequence currents of three section during the triple line-to-line fault .....	104



## List of Figures

Fig. 2-1 Critical surface curve of a superconducting unit .....	4
Fig. 2-2 Structure of a transformer-type SFCL .....	5
Fig. 2-3 Equivalent circuit of a transformer-type SFCL without a neutral line .....	7
Fig. 2-4 Equivalent circuit of a transformer-type SFCL with a neutral line .....	7
Fig. 2-5 Equivalent circuit of secondary coil in the transformer-type SFCL with a neutral line .....	10
Fig. 2-6 V-I curves of superconducting units .....	12
Fig. 2-7 Voltage and current curves of a transformer-type SFCL .....	13
Fig. 2-8 Resistance curves of a transformer-type SFCL .....	14
Fig. 2-9 Drawing and shape of a manufactured transformer .....	16
Fig. 2-10 YBCO thin film etched with meander-line pattern .....	16
Fig. 2-11 System composition for the SFCL experiment .....	18
Fig. 2-12 Real experimental picture .....	18
Fig. 2-13 Methods of power capacity increase in the transformer- type SFCL according to connection types .....	20
Fig. 2-14 Experimental circuit of a transformer-type SFCL .....	21
Fig. 2-15 Voltage and current curves according to cases of a transformer-type SFCL .....	23

Fig. 2-16 Extended curves of voltage and current of the superconducting units in the Case_2 .....	24
Fig. 2-17 Consumption power curves according to cases of superconducting units .....	26
Fig. 2-18 Recovery curves according to cases of superconducting units .....	29
Fig. 3-1 Three-phase power system of transformer-type SFCLs for the experiment .....	30
Fig. 3-2 Equivalent circuit of three-phase transformer-type SFCL with neutral lines .....	32
Fig. 3-3 Setting scheme of reclosing operational duty .....	32
Fig. 3-4 Critical current curves of superconducting units .....	33
Fig. 3-5 Equivalent circuit of three-phase transformer-type SFCL with an iron core .....	34
Fig. 3-6 Limiting fault current curves during the single line-to-ground fault .....	37
Fig. 3-7 Current curves of each phase during the single line-to-ground fault .....	38
Fig. 3-8 Voltage curves of superconducting units during the single line-to-ground fault .....	39
Fig. 3-9 Limiting fault currents and limiting rate ( $I_P/I_{FCL}$ ) changing curves of a transformer-type SFCL according to applied voltage during the single line-to-ground fault .....	39

Fig. 3-10 Recovery curves of superconducting units during the single line-to-ground fault .....	41
Fig. 3-11 Recovery time changing curves of superconducting units according to applied voltage during the single line-to-ground fault .....	41
Fig. 3-12 Limiting fault current curves during the double line-to-ground fault .....	43
Fig. 3-13 Current curves of each phase during the double line-to-ground fault .....	44
Fig. 3-14 Voltage curves of superconducting units during the double line-to-ground fault .....	45
Fig. 3-15 Limiting fault currents and limiting rate ( $I_P/I_{FCL}$ ) changing curves of a transformer-type SFCL according to applied voltage during the double line-to-ground fault .....	47
Fig. 3-16 Recovery curves of superconducting units during the double line-to-ground fault .....	48
Fig. 3-17 Recovery time changing curves of superconducting units according to applied voltage during the double line-to-ground fault .....	48
Fig. 3-18 Limiting fault current curves during the triple line-to-ground fault .....	49
Fig. 3-19 Current curves of each phase during the triple line-to-ground fault .....	50

Fig. 3-20 Voltage curves of superconducting units during the triple line-to-ground fault .....	51
Fig. 3-21 Limiting fault currents and limiting rate ( $I_P/I_{FCL}$ ) changing curves of a transformer-type SFCL according to applied voltage during the triple line-to-ground fault .....	52
Fig. 3-22 Recovery curves of superconducting units during the triple line-to-ground fault .....	54
Fig. 3-23 Recovery time changing curves of superconducting units according to applied voltage during the triple line-to-ground fault .....	54
Fig. 3-24 Sequence current curves of a transformer-type SFCL during the single line-to-ground fault .....	58
Fig. 3-25 Difference between positive and negative sequence currents during the single line-to-ground fault .....	59
Fig. 3-26 Sequence current curves of a transformer-type SFCL during the double line-to-ground fault .....	60
Fig. 3-27 Difference between positive and negative sequence currents during the double line-to-ground fault .....	61
Fig. 3-28 Sequence current curves of a transformer-type SFCL during the triple line-to-ground fault .....	63
Fig. 3-29 Difference between positive and negative sequence currents during the triple line-to-ground fault .....	64
Fig. 4-1 22.9kV class distribution power system model .....	65

Fig. 4-2	Reclosing operational duty of power circuit breaker .....	68
Fig. 4-3	Modeling of a transformer-type SFCL .....	68
Fig. 4-4	Modeling of resistance generated in a superconducting unit .....	69
Fig. 4-5	Modeling of a transformer-type SFCL during the line-to-ground fault .....	70
Fig. 4-6	Fault current curves according to the fault types and with or without a transformer-type SFCL .....	71
Fig. 4-7	Current curves of three sections in power system without the SFCL (the single line-to-ground fault) .....	75
Fig. 4-8	Current curves of three sections in power system with the SFCL (the single line-to-ground fault) .....	76
Fig. 4-9	Sequence current curves of three sections in power system without the SFCL (the single line-to- ground fault) .....	77
Fig. 4-10	Sequence current curves of three sections in power system with the SFCL (the single line-to- ground fault) .....	78
Fig. 4-11	Current curves of three sections in power system without the SFCL (the double line-to-ground fault) .....	82
Fig. 4-12	Current curves of three sections in power system with the SFCL (the double line-to-ground fault) .....	83

Fig. 4-13 Sequence current curves of three sections in power system without the SFCL (the double line-to-ground fault) .....	84
Fig. 4-14 Sequence current curves of three sections in power system with the SFCL (the double line-to-ground fault) ...	85
Fig. 4-15 Current curves of three sections in power system without the SFCL(the double line-to-line fault) .....	88
Fig. 4-16 Current curves of three sections in power system with the SFCL (the double line-to-line fault) .....	89
Fig. 4-17 Sequence current curves of three sections in power system without the SFCL (the double line-to-line fault) ...	90
Fig. 4-18 Sequence current curves of three sections in power system with the SFCL (the double line-to-line fault) .....	91
Fig. 4-19 Current curves of three sections in power system without the SFCL (the triple line-to-ground fault) .....	94
Fig. 4-20 Current curves of three sections in power system with the SFCL (the triple line-to-ground fault) .....	95
Fig. 4-21 Sequence current curves of three sections in power system without the SFCL(the triple line-to-ground fault) ·	96
Fig. 4-22 Sequence current curves of three sections in power system with the SFCL (the triple line-to-ground fault) .....	97
Fig. 4-23 Current curves of three sections in power system without the SFCL (the triple line-to-line fault) .....	100

Fig. 4-24 Current curves of three sections in power system  
with the SFCL (the triple line-to-line fault) ..... 101

Fig. 4-25 Sequence current curves of three sections in power  
system without the SFCL (the triple line-to-line fault) ... 102

Fig. 4-26 Sequence current curves of three sections in power  
system with the SFCL (the triple line-to-line fault) ..... 103

# ABSTRACT

## Transient Characterization of Transformer-Type SFCL for Power System Protection

Cho Yong-Sun

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

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

The transformer-type superconducting fault current limiter (SFCL) that was proposed in this study is a resistive-type SFCL to which a transformer is connected. The transformer has primary and secondary windings. The power system line is connected to the primary winding of the transformer in series, and the superconducting unit is connected to the secondary winding. The connection of the superconducting units in series and in parallel to each other should be ensured to reduce the fault current. Unbalanced quench occurs in the superconducting units that are connected in series and in parallel to each other, however, due to the difference in their critical behaviors. In this study, the unbalanced quench problem of the serially connected superconducting units was solved by connecting the secondary winding to the units using a neutral line. In addition,



different forms of SFCLs were made to devise a structure that is suitable for increasing the capacity of the SFCL. Based on the experimental results, line-to-ground and line-to-line faults in the three-phase power system were simulated to analyze the fault-current-limiting and transient characteristics of the three-phase transformer-type SFCL. The SFCL simulation was conducted using the EMTP/ATP power system analysis program, because the three-phase transformer-type SFCL cannot be applied to the actual power system at present. The design of a two-circuit distribution system enabled the analysis of the operating characteristics in the sections of the faulty feeder according to the existence of the SFCL, and the reliability of the SFCL was verified via symmetrical component calculus. The results of this study are as follows.

1. There is a problem of unbalanced quench in SFCLs, due to the inevitable difference in the critical behavior of the superconducting units. The quench characteristics of the superconducting units can be made regular by connecting the secondary winding of the transformer to the superconducting units that is connected to it in series using a neutral line. The neutral line connection can overcome the difference in the critical behavior of the superconducting units by helping the secondary winding of the transformer to induce the current so that the balanced quench of the SFCL elements can be realized. Such connection led to a balanced quench of the superconducting units and a uniform voltage on the superconducting units, which indicated that the power burden was uniform.

2. To develop a plan to increase the transformer-type SFCL capacity, four superconducting units were connected to the secondary transformer winding in series in three ways. In the case of the general series connection without using the neutral line, only one superconducting unit was quenched because of its unbalanced quench behavior, and its power burden was high. When the neutral line was used, however, the secondary winding individually applied the quench current to the superconducting units, and the quench was uniform regardless of the difference in the critical behaviors. Accordingly, all four superconducting units were quenched, which reduced the power consumption to 1/3. The four quenched superconducting units also quickly recovered their superconducting state within the opening cycle of the circuit breaker.
  
3. The fault current limiting and transient characteristics of the SFCL were analyzed according to the line-to-ground fault types in the power system. The test condition was given so that three line-to-ground faults occurred consecutively according to the reclosing duty cycle, which is a power system protection method. In the three-phase transformer-type SFCL, one iron core links the primary winding with the secondary winding for each of the three phases. Therefore, a fault on a phase affects other sound or faulty phases according to the mutual induction. It was verified in the experiment that the inductive current induced the quench in the superconducting units in the sound phase and reduced the power burden in the faulty phase, but interfered with the fault current

limiting operation in the other faulty phases. In the case of the three faults, the SFCL limited at least 70% of the fault current according to the reclosing duty cycle, and the superconducting units also recovered their superconducting state within a constant time and within the opening cycle of the circuit breaker.

4. The transient analysis of the power system to which the transformer-type SFCL was applied was conducted using the symmetrical component calculus. A smaller transformer winding ratio led to a better fault current limiting characteristic and thus, to a smaller zero sequence current. This indicates that the use of the transformer-type SFCL can reduce the electromagnetic inductive disturbance of adjacent communication lines. In the normal state, only the positive sequence current flows to generate the rotating torque for the motor load. A fault increases the difference between the positive and negative sequence currents, and increases the rotating torque of the motor load. The use of the SFCL reduced the difference between the positive and negative sequence currents. This made the phase angle difference between the motor and the generator constant, and maintained the transient stability of the power system, by ensuring that the rotating torque of the motor load did not significantly differ from that in the normal state.
  
5. Using the EMTP/ATP power system analysis program, the fault simulation was conducted according to the fault types by applying the transformer-type SFCL to the 22.9kV class distribution power

system. About 70% of the fault current decreased in the faulty feeder, and the sound feeder maintained 90% or more of the current before the fault. In the case of the triple line-to-line fault, which created the highest fault current, the transformer-type SFCL reduced about 80% or more of the fault current, and maintained 90% or more of the power in the sound feeder. This indicates that the breaking capacity of circuit breaker can be increased.

6. The symmetrical component calculus was used for the transient analysis of the faulty power system. The results indicated that the difference between the positive and negative sequence currents in the faulted feeder can be reduced. The sound feeder with no SFCL had the same positive and negative sequence currents, which did not create the rotating torque for the motor load. The use of the SFCL made the difference almost the same as before the fault occurrence, and maintained the rotating torque for the motor load that was connected to the sound feeder. The SFCL is expected to be used to maintain the phase angle difference between the generator and the motor, and to ensure the transient stability in the power system.

# I. 서 론

국내의 전력망에서는 1950년대 이후 급격한 산업발전을 거듭하면서 전력 수요가 급증하고 있으며, 이에 발맞춰 발전량이 증가하고 전력망이 복잡하게 구성되고 있다. 또한 현재의 21세기 사회는 정보화(IT) 사회로 발전을 거듭하면서 최첨단 기기들의 사용량이 증가하고 있는 추세이다. 이와 같이 인덕턴스 성분을 갖는 기기들의 증가는 전력망에서 발생하는 고장전류를 증가시킬 뿐만 아니라 역률저하로 인한 안정도 저감, 전압강하로 인한 전력손실 증가 등 전력계통의 신뢰도를 저하시키고 있다. 복잡한 전력망 내에서는 매년 크고 작은 고장이 발생하고 있다. 이러한 고장은 가공전선로 주변의 나무 등에 의해 70% 이상을 차지하는 순간 고장과 선로 및 보호기기 등에서 발생하는 지락 또는 단락사고, 외부에서 발생하는 낙뢰 등에 의해 발생하는 보통 및 중대고장의 지속 사고가 발생하고 있다. 미래의 전력수요량 증가 추이 및 송전전압의 격상 등 네트워크화 되어가는 미래 전력망의 고장전류는 계속하여 증가할 수밖에 없을 것으로 예상되며 빠른 대응책이 마련되어야 할 것이다[1-2].

전력시스템 내에서 점점 증가하는 고장전류에 대한 대처방법으로는 현재 모선분리, 차단기 교체, 공심리액터 도입 등 여러 방안이 채택되고 있다. 모선분리 방안은 현재 네트워크화되어 있는 전력망을 분리하여 고장전류의 파급을 감소시키는 방안으로 계통간 안정도 및 공급 신뢰도를 저하시키고, 고장시 광역권 정전의 가능성을 안고 있다. 차단기 교체 방안은 345kV 선로에서는 기존에 사용하고 있는 40kA에서 63kA급 차단기로 교체하고 있으며, 154kV 선로에서는 31.5kA급에서 50kA급 차단기로 교체가 진행 중이다. 차단기 용량의 증대에 따른 비용 증대와 더불어 하위 선로의 고장전류 부담 증대의 문제점이 제기되고 있다. 또한 추후 교체된 차단기의 용량을 넘어선 고장전류 발생시 재 교체해야 하는 부담을

안고 있다[3-5].

공심리액터 도입 방안은 선로에 상시 투입되는 방식으로 부하전류 대 인덕턴스의 선형성이 우수하며, 과도 과전압에 대한 영향이 적고, 공해 및 화재의 위험이 없다. 또한 대지간의 절연이 간단하며, 소음이 없고, 경중량으로 운반취급이 용이하다. 그러나 상시 선로 임피던스를 증가시켜 전력손실이 발생하며, 공심리액터의 부피가 커서 변전소의 규모 증가 및 새로운 변전소 설치 등의 문제점을 동시에 안고 있다. 이러한 대처방안들은 당면한 고장전류의 문제점만을 해결하는 한시적인 방법들이며, 지능화되어가는 전력망 내에 또 다른 문제점을 만들고 있는 실정이다.

네트워크화 되어가고 있는 전력망 내에서 급증하는 고장전류에 대한 현재 방안들의 문제점을 가장 효과적으로 해결할 수 있는 방법으로 초전도 한류기(Superconducting fault current limiter: SFCL)가 많이 연구되고 있다. 초전도 한류기는 초전도 소자의 영저항 특성에 의해 사고전류를 제한하는 저항형, 유도형, 자속구속형, 변압기형 초전도 한류기 등과 고속도의 켄치특성을 이용하는 선로변경식 하이브리드형 초전도 한류기 등으로 분류할 수 있다[6-19].

초전도 한류기를 송전급 또는 배전급 전력망에 적용하기 위해서는 초전도 한류기의 한류용량 증대가 필수적이다. 전력망에서 발생하는 사고전류의 한류용량의 증대를 위해서는 초전도 소자의 직·병렬 연결이 필수적이다. 그러나 초전도 소자의 재료 특성상 균일한 특성으로 제작하기 어려워 직·병렬 연결시 불균일한 켄치특성을 보이고 있다[20].

이러한 불균일한 켄치특성을 개선하기 위해 초전도 소자의 임계특성을 개선하는 방안들이 많이 연구되고 있으나 그 연구결과가 미미하다. 또한 전력망에 초전도 한류기가 적용되어 사고전류를 저감하기 위해서는 전력망에서 발생하는 지락 및 단락사고에 대한 초전도 한류기의 동작특성이 분석되어야 한다[21-22]. 이러한 연구결과는 많이 나오고 있으나 기본적인 전류제한 특성만이 분석되고 있어 전력망에 적용하기 위한 초전도 한

류기의 다양한 과도특성 해석 결과가 요구되고 있다.

복잡한 전력망에 사용되고 있는 전력용 차단기는 순간사고와 지속사고를 구분하여 선로를 사고구간으로부터 보호하기 위해 재폐로 차단방식을 채용하고 있다. 이에 전력망에 적용될 초전도 한류기는 전력용 차단기의 재폐로 방식 내에서 신뢰성있는 한류동작을 수행해야 한다[23-24]. 이는 초전도 한류기를 전력망에 적용하여 안정적인 동작을 수행하는데 필수적인 연구라 할 수 있다.

본 논문에서는 다수의 초전도 소자를 직렬로 연결하였을 때 발생하는 동시퀵치 문제를 해결하기 위해 변압기의 2차 권선과 초전도 소자 사이에 중성선을 연결하였다. 이러한 중성선을 갖는 단상 변압기형 초전도 한류기의 동작 메커니즘을 분석하여, 초전도 소자의 동시퀵치 문제를 해결하고 초전도 한류기의 용량증대에 유리함을 입증하고자 한다.

또한 3상 변압기형 초전도 한류기를 설계·제작하여 전력망에서 발생하는 다양한 사고 유형 및 조건, 재폐로 동작책무에 따른 전력용 차단기의 동작 등을 실험을 통해 모의함으로써 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기의 안정적인 동작특성을 과도해석을 통해 입증하고자 한다.

복잡한 전력망을 실험을 통해 모의하기에는 많은 어려움이 있다. 이에 EMTP/ATP 프로그램을 이용하여 2회선 배전선로를 구성하였으며, 변압기형 초전도 한류기의 동작 모듈을 설계하였다. 전력망에서 발생하는 다양한 사고를 시뮬레이션을 통해 모의하였으며, 과도해석을 통해 변압기형 초전도 한류기의 동작특성을 분석하였다.

## II. 초전도 한류기의 개요

초전도 한류기에 사용되는 초전도 소자는 그림 2-1과 같이 임계온도 이하에서 임계전류와 임계자장에 의해 초전도 상태를 유지한다. 이러한 3가지의 임계특성 중 한 가지만이라도 임계값을 초과하게 되면 상전도 상태로 전이된다. 이때 초전도 소자의 내부에서는 국부적으로 열이 발생하게 되고, 초전도 소자의 전체로 열이 전파되면서 초전도 소자의 상전이가 빠르게 진행된다. 이러한 현상을 퀘칭이라 한다.

초전도 한류기에 이용되는 초전도 소자는 초전도 상태에서 영저항 특성을 지니고 있으므로 무손실 전력기기로 적용된다. 이때 초전도 소자의 외부에서 3가지의 임계특성 중 한 가지라도 임계값을 초과하는 조건이 발생하면 상전도 상태로 전이되면서 특정값의 저항이 발생하게 된다. 이러한 저항은 전력망에서 발생하는 사고전류를 제한하게 된다.

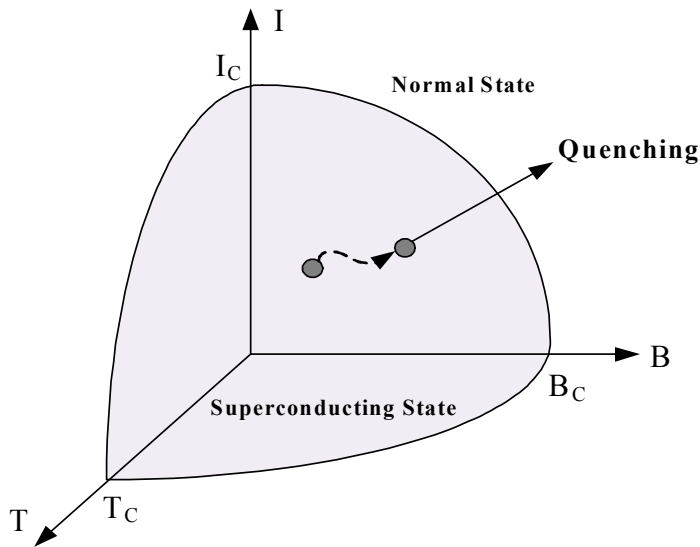


그림 2-1 초전도 소자의 임계특성 곡선

Fig. 2-1 Critical surface curve of a superconducting unit



## A. 변압기형 초전도 한류기의 원리

### 1. 구조 및 동작원리

변압기형 초전도 한류기는 그림 2-2와 같이 1·2차 권선과 철심을 갖는 변압기와 초전도 소자로 구성되어 있다. 또한 1·2차 권선과 초전도 소자 사이에 중성선으로 연결되어 있다. 여기서  $V_0$ 는 인가전압이고,  $L_P$ ,  $L_{SA}$ ,  $L_{SB}$ 는 각각 1·2차 권선의 인덕턴스를 나타낸 것이다.  $I_P$ 와  $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ 는 1·2차 권선에 흐르는 전류이며,  $I_{SN}$ 은 중성선에 흐르는 전류이다. 이때 변압기의 누설저항과 누설리액턴스에 의한 손실을 무시한다면, 정상상태의 전력망에서 2차측 권선에 연결된 초전도 소자의 저항이 0이기 때문에  $I^2 \cdot R$ 의 손실없이 전로전류  $I_P$ 를 흘릴 수 있다.

그러나 전력망에 어떠한 고장에 의해 사고전류가 흘러 1·2차 권선의 비( $a = N_P/N_S = I_S/I_P$ )에 의해 유도된 2차권선의 전류  $I_S$ 가 초전도 소자의 임계전류를 초과하게 되면 초전도 소자의 켄치로 인해 저항( $R_{SC}$ )이 발생하게 된다. 이로 인해 2차 권선에 흐르는 전류는 제한되고, 1·2차 권선의 비에 의해 사고전류  $I_P$  또한 줄어들게 된다.

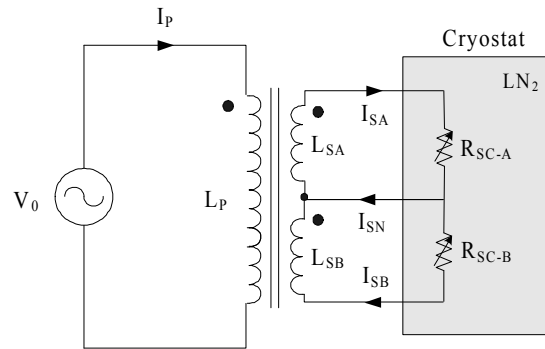


그림 2-2 변압기형 초전도 한류기의 구조

Fig. 2-2 Structure of a transformer-type SFCL

2차 권선에 흐르는 전류  $I_{SA}$ 와  $I_{SB}$ 는  $I_S$ 로 동일하고, 2차측 권선의 인덕턴스  $L_{SA}$ ,  $L_{SB}$ 는  $L_S$ 로 동일하다는 가정 하에서 전압-전류의 관계식을 식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 1·2차 권선 사이의 상호 인덕턴스는  $M_P$ 이고, 2차 권선간의 상호 인덕턴스는  $M_S$ 로 표현하였다.

$$V_0 = j\omega L_P I_P - 2j\omega M_P I_S \quad (1)$$

$$0 = -j\omega M_P I_P + (j\omega L_S - j\omega M_S + R_{SC}) I_S \quad (2)$$

## 2. 등가회로도 분석

그림 2-3과 4는 중성선의 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도를 나타낸 것이다. 1차 권선과 2차 권선에 흐르는 전류와 인덕턴스는 각각  $I_P$ ,  $I_S$ 와  $L_P$ ,  $L_{SA}$ ,  $L_{SB}$ 이다. 초전도 소자가 켜치되었을 때 발생하는 상전도 저항은 각각  $R_{SC-A}$ 와  $R_{SC-B}$ 이며, 중성선에 흐르는 전류는  $I_{SN}$ 이다. 1·2차 권선의 상호 인덕턴스는  $M_P$ 이며, 2차 권선간의 상호 인덕턴스를  $M_S$ 로 표기하였다.

여기서 초전도 소자에서 발생하는 저항  $R_{SC-A}$ ,  $R_{SC-B}$ 는  $R_{SC}$ 로 동일하고, 2차 권선의 인덕턴스인  $L_{SA}$ 와  $L_{SB}$ 는  $L_S$ 로 동일하며, 초전도 소자에 흐르는 전류  $I_{SC-A}$ 와  $I_{SC-B}$ 는  $I_{SC}$ 로 동일하다고 가정한다. 또한 1·2차 권선의 결합계수  $k$ 는 1이라 가정하였을 때  $M_P = \sqrt{L_P \cdot L_S}$  이고  $M_S = \sqrt{L_{SA} \cdot L_{SB}}$  이라 할 수 있다. 위의 가정하에서 중성선의 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기의 제한된 사고전류  $I_P$ , 전체 임피던스  $Z_{lim}$ , 사고 초기에 제한된 사고전류  $I_{ini}$ 는 다음과 같이 식 (3)~(8)로 나타낼 수 있다.

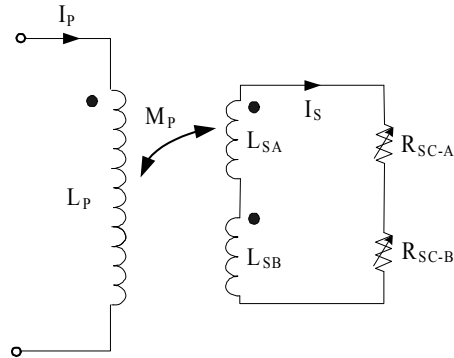


그림 2-3 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도  
 Fig. 2-3 Equivalent circuit of a transformer-type SFCL without a neutral line

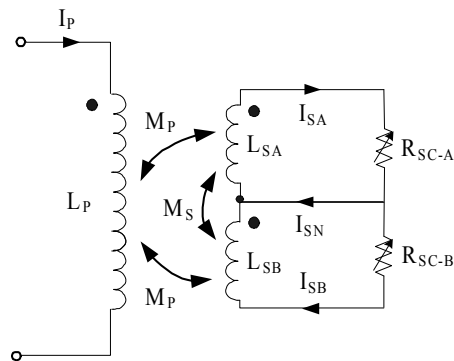


그림 2-4 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도  
 Fig. 2-4 Equivalent circuit of a transformer-type SFCL with a neutral line

1) 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기

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

$$Z_{\text{lim}} = \frac{V_0}{I_P} = \frac{2j\omega L_P R_{SC}}{j\omega L_S + 2R_{SC}} \quad (4)$$

$$I_{mi} = \frac{L_S}{M_P} \cdot I_Q \quad (5)$$

2) 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기

$$I_P = \frac{2j\omega L_S + R_{SC}}{j\omega M_P} \cdot I_S \quad (6)$$

$$Z_{\text{lim}} = \frac{V_0}{I_P} = \frac{j\omega L_P R_{SC}}{2j\omega L_S + R_{SC}} \quad (7)$$

$$I_{mi} = \frac{2L_S}{M_P} \cdot I_Q \quad (8)$$

식 (3)의 2차 권선에 흐르는 전류( $I_S$ )가 2차측 권선에 직렬로 연결된 초전도 소자의 임계전류값을 넘을 경우 켄치가 발생하게 된다. 그러나 증가된 2차 전류( $I_S$ )는 적은 임계전류값을 갖는 초전도 소자를 먼저 켄치시키며, 이렇게 켄치된 초전도 소자로부터 발생하는 저항( $R_{SC}$ )에 의해 사고전류는 제한된다. 그러므로 나머지 초전도 소자는 켄치가 안된 초전도 상태로 남아있게 된다. 이것은 초전도 소자간의 임계전류 차이 때문이며, 이 차이는 제작상 불가피하게 발생하는 문제점이다.

그러나 그림 2-4와 같이 초전도 소자와 2차 권선 사이에 중성선을 연결하면, 식 (6)과 같이 1·2차 권선비( $a = N_p/N_s = V_p/V_s$ )에 의해 유도된 각각의 2차 전압( $V_{SA}, V_{SB}$ )는 그림 2-5와 같이 각각의 초전도 소자에 전압원으로 작용한다. 그러므로 각 초전도 소자에 흐르는 전류는 식 (9)와 (10)으로 표현할 수 있다. 즉, 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기는 초전도 소자가 개별적으로 켜질 수 있도록 전류가 유도되기 때문에 초전도 소자의 불균일한 임계전류의 차이를 극복할 수 있게 된다.

여기서 사고 초기에 제한된 사고전류  $I_{mi}$ 는 2차 권선에 유도된 전류 ( $I_s$ )가 초전도 소자의 임계전류에 도달하는 순간의 제한된 사고전류이다. 이것은 식 (3)과 (6)에  $R_{SC}=0, I_s=I_Q, I_p=I_{mi}$ 를 대입함으로서 식 (5)와 (8)을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 사고 초기에 제한되는 사고전류( $I_{mi}$ )는 1·2차 권선의 비( $a = N_p/N_s = I_s/I_p$ )에 의해 제어할 수 있다는 것을 알 수 있다.

$$I_{SA} = \frac{V_{SA}}{R_{SC-A}} \quad (9)$$

$$I_{SB} = \frac{V_{SB}}{R_{SC-B}} \quad (10)$$

$$I_{SN} = I_{SA} - I_{SB} \quad (11)$$

또한 중성선에 흐르는 전류( $I_{SN}$ )는 각 초전도 소자에 흐르는 전류의 차에 의해 흐르기 때문에 만약 초전도 소자에서 발생하는 저항이 일치하여 흐르는 전류가 동일하다면 0이 될 것이다.

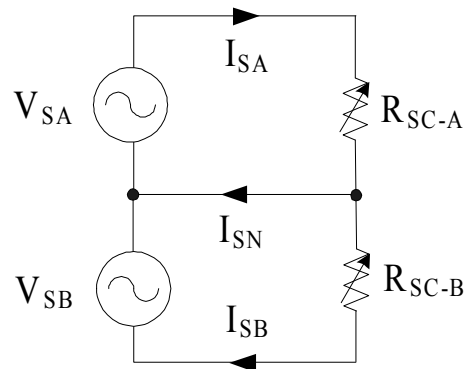


그림 2-5 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기의 2차 권선의  
등가회로도

Fig. 2-5 Equivalent circuit of secondary coil in the transformer-type  
SFCL with a neutral line

## B. 변압기형 초전도 한류기의 동작특성

변압기형 초전도 한류기는 전력망에 사고가 발생하기 전에 1·2차 권선의 비에 따라 전류와 전압이 결정된다. 그러나 사고가 발생하게 되면 2차 권선에 유도된 전류에 의해 초전도 소자는 켄치되어 저항을 발생하게 되고, 2차 권선에 흐르는 전류를 제한시킨다. 이것으로부터 2차 권선에서는 1차측 권선에 의해 발생된 자속에 상쇄되는 방향으로 자속이 발생하게 되어 1차 권선에 흐르는 전류를 제한하게 된다.

초전도 소자는 제작상 불균일한 임계전류를 갖는다는 것을 그림 2-6의 초전도 소자의  $V-I$  곡선을 통해 확인할 수 있다. 이러한 불균일한 임계전류는 다수의 초전도 소자를 직렬로 연결할 시 불균일한 켄치동작의 원인이 되며, 초전도 한류기의 용량증대시 고가의 초전도 소자를 파손시키는 요인으로 작용한다.

그림 2-7은 중성선의 유무에 따라 변압기형 초전도 한류기의 전압·전류 특성을 나타낸 곡선이다. 그림 2-7의 (a)와 같이 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기의 경우 2차 권선에 의해 유도된 전류( $I_S$ )가 직렬 연결된 2개의 초전도 소자의 임계전류( $I_Q$ )를 넘게 되면 초전도 소자는 켄치된다. 그러나 초전도 소자의 불균일한 임계전류에 의해 낮은 임계전류를 갖는 초전도 소자( $R_{SC-A}$ )가 먼저 켄치되어 전압( $V_{SC-A}$ )이 크게 발생하게 된다. 이로 인해  $I_S$ 와  $I_P$ 가 바로 제한되어 임계전류가 높은 초전도 소자( $R_{SC-B}$ )는 거의 켄치되지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

반면 그림 2-7(b)와 같이 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기는 2차 권선과 초전도 소자 사이에 중성선을 연결함으로써 각각의 2차 권선은 각각의 초전도 소자에 개별적인 전압원으로서 작용하게 된다. 이는 임계전류가 다른 초전도 소자가 각각의 2차 권선의 전류( $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ )를 가지므로 초전도 소자를 켄치시키는 전류( $I_{Q-SCA}$ ,  $I_{Q-SCB}$ )가 각각 다르게 된다. 이로부터 초전도 소자의 불균일한 임계전류를 무시하고 균일한 켄치특성

을 갖도록 도와주어 2개의 초전도 소자는 모두 켜치되며 전압  $V_{SC-A}$ 와  $V_{SC-B}$ 가 동일하게 발생한다는 것을 확인할 수 있다.

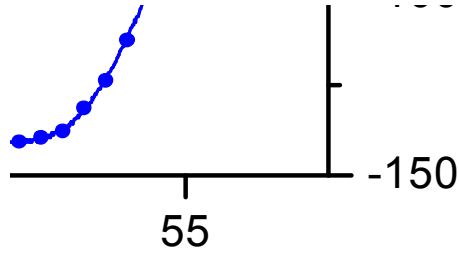
중성선에 흐르는 전류( $I_{SN}$ )는 식 (11)과 같이 2차 권선에 흐르는 전류  $I_{SA}$ 와  $I_{SB}$ 의 차에 의해 흐른다는 것을 확인할 수 있다.

그림 2-8은 중성선 유무에 따른 변압기형 초전도 한류기의 초전도 소자에서 발생하는 저항을 나타낸 곡선이다. 불균일한 켜치특성을 보인 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기는 켜치된 초전도 소자에서만 저항이 발생하게 된다. 그 크기는 균일한 켜치특성을 보인 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기의 것과 비교하여 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 이는 불균일한 켜치특성으로 인해 켜치된  $R_{SC-A}$ 의 초전도 소자가 모든 전력을 부담하기 때문이다.

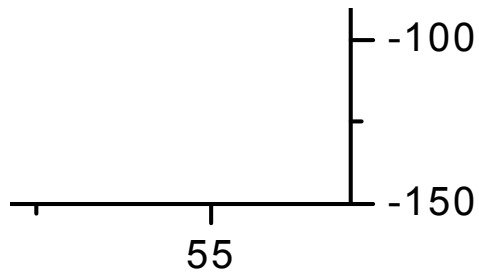
그림 2-6 초전도 소자의  $V-I$  곡선

Fig. 2-6  $V-I$  curves of superconducting units





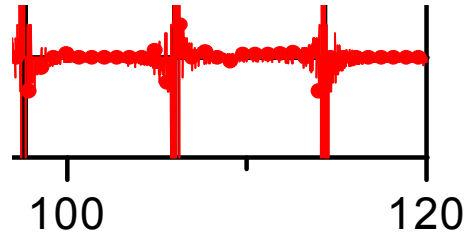
(a) A transformer-type SFCL without a neutral line



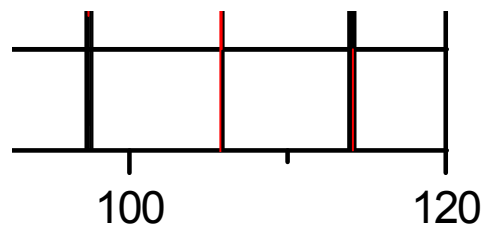
(b) A transformer-type SFCL with a neutral line

그림 2-7 변압기형 초전도 한류기의 전압·전류 특성곡선

Fig. 2-7 Voltage and current curves of a transformer-type SFCL



(a) A transformer-type SFCL without a neutral line



(b) A transformer-type SFCL with a neutral line

그림 2-8 변압기형 초전도 한류기의 저항 특성곡선

Fig. 2-8 Resistance curves of a transformer-type SFCL

## C. 변압기형 초전도 한류기 설계 및 제작

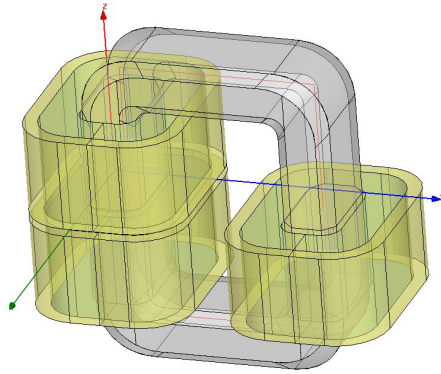
변압기형 초전도 한류기는 크게 변압기와 초전도 소자로 구성되어 있다. 초전도 소자는 전력망에서 사고발생시 변압기의 1·2차 권선의 비에 따라 유도된 전류로 인해 켄치되어 사고전류를 저감하게 된다.

### 1. 3상 변압기 설계 및 제작

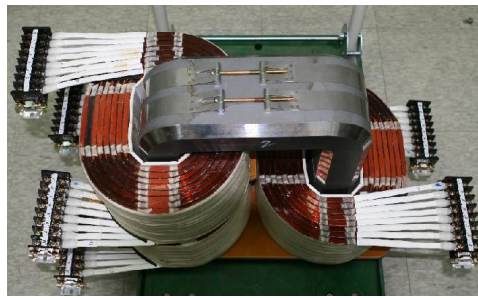
3상 변압기는 일반적으로 1차와 2차 권선이 철심을 통해 유도적으로 연결되어 있다. 본 논문에서 사용된 철심 또한 이러한 구조를 가지고 있다. 철심은 철손과 여자전류를 감소시키기 위해 0.35mm의 G9급 규소강판을 성층하여 제작하였다. 또한 철심의 맴돌이 손실을 줄이기 위해 규소강판 표면에 절연피막을 입혔다. 1·2차 권선은 8mm × 3mm의 각동선을 사용하였으며, 변압기의 턴수 변화에 따른 특성을 분석하기 위해 각상의 권선은 36.5턴을 1탭으로 하여 8개의 탭으로 권선되어 있다. 그림 2-9는 변압기의 설계도 및 제작된 변압기의 외형을 나타낸 것이다.

### 2. 초전도 소자

현재 많이 사용하고 있는 초전도 소자는 재료 및 형태에 따라 많은 연구가 진행 중이다. 초전도 한류기에 가장 많이 사용되고 있는 초전도 소자의 재료로는  $YB_2C_3O_7$ , BSCCO-2212,  $MgB_2$  등 많은 합금이 사용되고 있으며, 형태로는 사용장소에 따라 박막형, 벌크형, 테잎형 등 많은 구조로 제작되고 있다. 본 논문에서는 YBCO재질의 박막형 초전도체를 사용하였다. 이 초전도체는 그림 2-10과 같이 사파이어 기판에 증착되어 있으며, 상층에는 공기 및 수분, 급격히 증가하는 전류로부터 YBCO를 보호하기 위해 금이 증착되어 있다. 이러한 박막형 YBCO 초전도체는 meander-line 패턴으로 식각되어 전류의 경로를 만들었다.



(a) Drawing of a transformer



(b) Shape of a transformer

그림 2-9 변압기의 설계도 및 제작된 변압기 외형

Fig. 2-9 Drawing and shape of a manufactured transformer

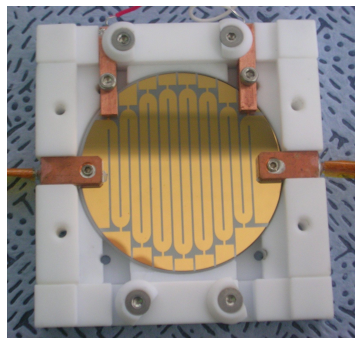


그림 2-10 Meander-line 패턴으로 식각된 박막형 YBCO

Fig. 2-10 YBCO thin film etched with meander-line pattern

### 3. 변압기형 초전도 한류기의 실험장치 구성

초전도 한류기의 실험을 위해서는 전원공급장치, 사고모의장치, 사고발생제어장치, 저온용기, 오실로스코프, 전압·전류 측정장치 등 많은 장치들이 필요하다. 초전도 한류기의 실험을 위한 장치들의 기능을 요약하면 다음과 같다.

- A) 초전도 소자 및 삼상 변압기 - 변압기형 초전도 한류기를 구성하는 기본 단위로서 전원공급장치를 통해 변압기의 1차 권선으로 전원이 인가되고 2차측 권선에 초전도 소자가 연결되어 있음.
- B) LN2 및 탱크저온용기 - 초전도 소자의 상태 유지를 위한  $-196^{\circ}\text{C}$ 의 LN2를 공급하는 장치 및 초전도 소자를 담귀 실험하기 위한 저온 냉각장치.
- C) 사고발생 시스템 - 계통의 사고를 모의할 수 있는 장치로서 전원장치와 사고발생스위치, 사고발생제어기로 구성되며, 신호선을 통해 상호연결되어 사고종류, 위상각, 사고주기 등 제어가 가능함.
  - a) 전원장치 - 초전도 한류기의 전원 공급 장치.
  - b) 사고발생스위치 - 초전도 한류기에 전원을 공급하는 스위치와 다양한 종류의 사고를 발생시키기 위한 스위치로 나누어지며, 이 스위치들은 전력용 SCR을 사용하여 3상을 제어함. 또한 1선, 2선, 3선 지락 및 단락사고를 모의할 수 있는 기능이 있음.
  - c) 사고발생제어기 - 전원장치 및 사고발생스위치에서 들어온 신호를 기준으로 사고 on/off, 사고 주기, 사고 위상각을 제어할 수 있으며, 사고의 trigger signal을 오실로스코프로 보내줌.
- D) 데이터 백업장치 - 실험을 통해 얻은 데이터를 전송받기 위한 백업장치로서 컴퓨터를 연결하여 사용함.

이러한 실험 장치들의 구성도와 실험사진을 그림 2-11과 12에 나타내었다.

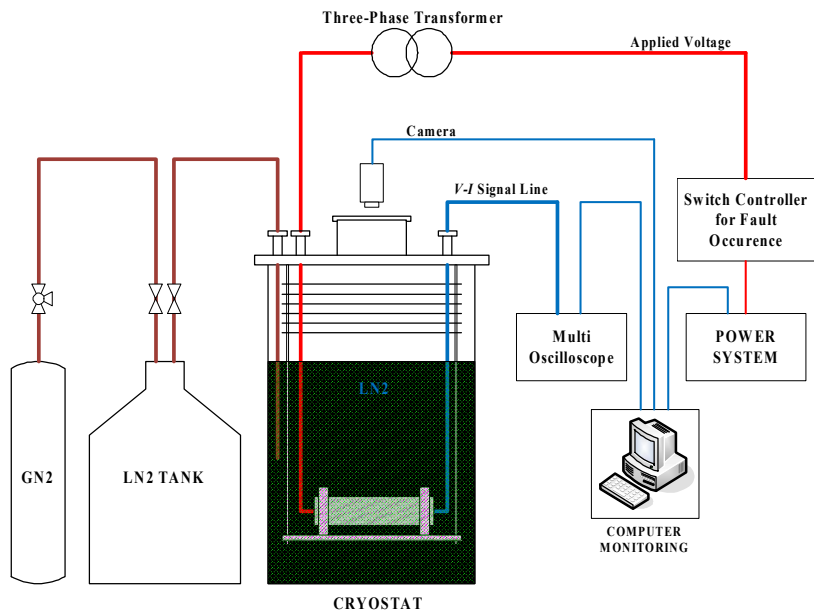


그림 2-11 실험을 위한 시스템 구성도

Fig. 2-11 System composition for the SFCL experiment



그림 2-12 실제 실험사진

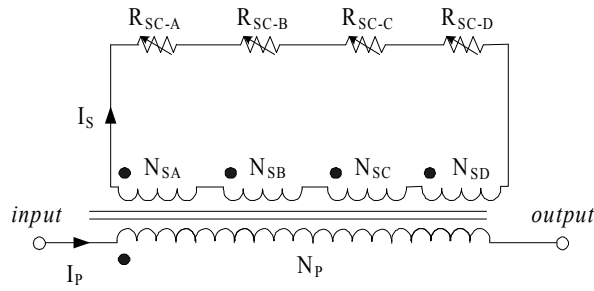
Fig. 2-12 Real experimental picture

## D. 변압기형 초전도 한류기의 용량증대 방안

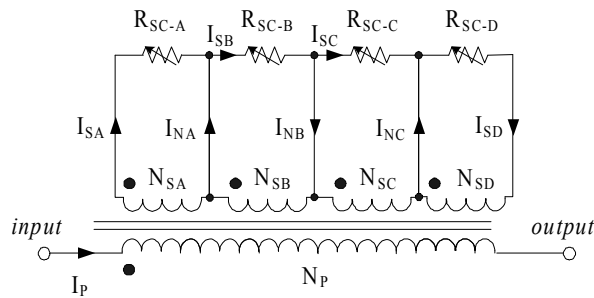
초전도 한류기를 전력망에 적용하기 위해서는 해당 전력망의 용량에 맞도록 다수의 초전도 소자가 직·병렬로 연결되어야 한다. 그러나 초전도 소자의 불균일한 임계특성에 의해 다수의 직렬 연결시 불규칙한 퀘치 특성을 보인다. 이는 초전도 소자의 전력분담을 불균일하게 하여 초전도 한류기의 사고전류 제한동작에 큰 악영향을 미치게 된다.

변압기형 초전도 한류기는 초전도 소자의 직렬연결 방안을 그림 2-13과 같이 3가지 방법으로 구성하여 도출하고자 한다. (a)는 초전도 소자가 중성선 없이 직렬 연결된 경우로 Case-1이고, (b)는 2차 권선과 초전도 소자 사이에 중성선을 연결하여 4개의 초전도 소자를 연결한 경우로 Case-2이며, (c)는 (b)의 방법에서 중성선 연결의 최소 단위인 2개의 초전도 소자를 나누어 유도적으로 연결한 경우로 Case-3이다. 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기는 초전도 소자에 개별적으로 전류를 유도할 수 있는 구조를 가지고 있어 초전도 소자의 임계특성의 차이를 무시하여 퀘치특성을 균일하게 한다는 것을 앞 장에서 확인하였다.

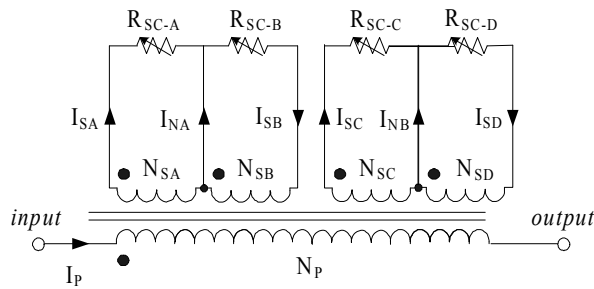
본 장에서는 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기의 용량증대를 위해 3가지의 Case로 구성하여 사고전류 제한 및 퀘치특성과 초전도 소자의 전력부담에 대한 특성, 초전도 소자의 회복특성을 분석하였다. 초전도 소자의 불균일한 퀘치특성은 퀘치된 초전도 소자의 전력부담을 가중시킨다. 이것은 전력망에 적용될 초전도 한류기의 동작 신뢰성을 저하시키는 요인이므로, 초전도 소자의 전력부담을 균일하게 분배시키는 동작특성은 중요하다 할 수 있다. 또한 초전도 소자가 상전도 상태로의 퀘치 후 다시 초전도 상태로 복귀하는 회복특성은 현 전력망으로의 적용에 있어 중요한 요소로 작용하고 있다. 이에 초전도 소자의 퀘치특성을 개선할 수 있는 변압기형 초전도 한류기의 회복특성을 분석하여 전력망에서의 동작 신뢰성을 분석하고자 한다.



(a) General series connection\_Case-1



(b) Electrical series connection using neutral lines\_Case-2



(c) Inductive series connection using neutral lines\_Case-3

그림 2-13 연결방법에 따른 변압기형 초전도 한류기의 용량증대 방안  
 Fig. 2-13 Methods of power capacity increase in the transformer-type  
 SFCL according to connection types



그림 2-14는 Case별 단상 변압기형 초전도 한류기의 실험을 위해 구성한 회로도이다. 인가전압( $V_0$ )은 360V, 선로저항( $I_0$ )과 부하저항( $R_L$ )은 각각 1 $\Omega$ 과 50 $\Omega$ 으로 설정하였다. *input*과 *output*단자에 연결된 변압기형 초전도 한류기에 전압을 인가하기 위해  $SW_1$ 을 동작시키며, 부하저항을 단락시키는  $SW_2$ 를 통해 전력망에서의 지락사고를 모의하였다. 지락사고는 0°를 기준으로 5주기 동안 발생시켜 특성을 분석하였다.

표 2-2는 변압기형 초전도 한류기에 사용된 변압기의 1:2차 권선의 비를 Case별로 나타낸 것이다. 실험에 사용된 4개의 초전도 소자는 그림 2-6과 같은 불균일한  $V-I$  특성을 가지고 있다.

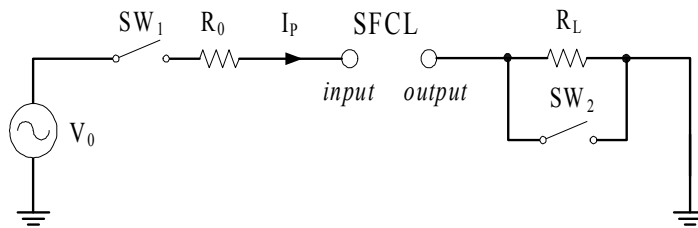


그림 2-14 변압기형 초전도 한류기의 실험 회로도

Fig. 2-14 Experimental circuit of a transformer-type SFCL

표 2-1 Case별 변압기 1:2차 권선의 턴수비

Table 2-1 Turn ratios between primary and secondary coils of a transformer according to Cases

Case	Primary and secondary windings	Value
Case-1	$N_P$	8
	$N_{SA} + N_{SB} + N_{SC} + N_{SD}$	4
Case-2	$N_P$	8
	$N_{SA} : N_{SB} : N_{SC} : N_{SD}$	1:1:1:1
Case-3	$N_P$	8
	$N_{SA} : N_{SB} : N_{SC} : N_{SD}$	1:1:1:1

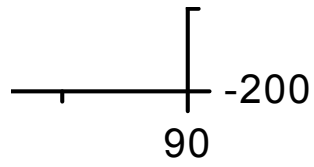
## 1. 사고전류 제한 및 켄치특성

변압기형 초전도 한류기는 변압기의 1·2차 권선과 2차 권선에 초전도 소자가 연결된 구조를 가지고 있다. 이에 초전도 소자의 켄치특성을 이용하여 전력망에서 발생된 고장으로부터 사고전류를 전력용 차단기의 차단용량 이하의 전류로 제한하는 역할을 수행하게 된다.

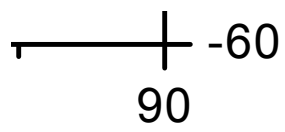
그림 2-15는 그림 2-13의 각 Case별 변압기형 초전도 한류기의 사고전류 제한 및 켄치특성을 나타내기 위해 제한된 사고전류( $I_p$ ), 초전도 소자에 흐르는 전류( $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ ,  $I_{SC}$ ,  $I_{SD}$ ), 켄치된 초전도 소자에서 발생하는 전압( $V_{SC-A}$ ,  $V_{SC-B}$ ,  $V_{SC-C}$ ,  $V_{SC-D}$ )을 나타낸 곡선이다. 각 Case별로 제한된 사고전류( $I_p$ )는 각각 14.9, 15.4, 15.5A이었다. 이로부터 실험을 통해 발생된 사고전류를 90% 이상 제한하게 된다는 것을 입증할 수 있다.

Case-1의 경우 2차 권선에 흐르는 전류( $I_S$ )는 29.8A이었다. Case-2의 경우( $I_{SA}$ ,  $I_{SB}$ ,  $I_{SC}$ ,  $I_{SD}$ )에는 각각 29.2, 34.4, 33.6, 27.7A이었고, Case-3의 경우에는 각각 28.8, 34.6, 33.7, 28A이었다. Case-1의 2차 권선에는 권선비에 의해 1개의 전류( $I_S$ )가 흘러 임계전류가 낮은 초전도 소자부터 켄치시키게 된다. 이로 인해 켄치된 초전도 소자에서 발생하는 저항이 2차 권선의 전류를 먼저 제한함으로써 다른 초전도 소자가 켄치되는 것을 방해하게 된다. 그러나 Case-2의 경우 중성선으로 인해 구분된 각각의 초전도 소자에는 각각의 2차 권선에서 유도된 전류가 흐르므로 초전도 소자를 개별적으로 켄치시키게 된다는 것을 그림 2-15(b)를 확대한 그림 2-16에서 확인할 수 있다. 여기서 각각의 2차 권선에 흐르는 전류는 임계전류가 다른 각각의 초전도 소자를 개별적으로 켄치시키기 위해 켄치전류( $I_Q$ )가 다르게 흐른다는 것을 확인할 수 있다.

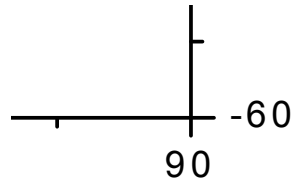
초전도 소자는 켄치로 인해 발생된 상전도의 저항으로부터 전압이 발생하게 된다. 그러므로 초전도 소자의 켄치특성은 초전도 소자에서 발생하는 전압( $V_{SC-A}$ ,  $V_{SC-B}$ ,  $V_{SC-C}$ ,  $V_{SC-D}$ )으로 확인할 수 있다. Case-1의 경우  $V_{SC-D}$ (138V)만이 발생하여 4개의 초전도 소자 중 1개의 초전도 소자



(a) Case-1



(b) Case-2



(c) Case-3

그림 2-15 변압기형 초전도 한류기의 Case별 전압·전류 특성곡선  
 Fig. 2-15 Voltage and current curves according to cases of a transformer-type SFCL

만 켜진다는 것을 확인할 수 있다. 초전도 소자에 흐르는 하나의 2차 권선의 전류( $I_s$ )에 의해 가장 낮은 임계전류를 갖는 초전도 소자만이 켜진다. 그러나 Case-2와 Case-3의 경우 초전도 소자에 개별적으로 흐르는 2차 권선의 전류에 의해 4개의 모든 초전도 소자에서 각각 36, 35.8, 35.3, 34.4V(Case-2)와 35.7, 34.8, 34.7, 33.8V(Case-3)의 전압이 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 발생한 전압의 미세한 차이는 초전도 소자에 흐르는 전류의 차이에 기인한다.

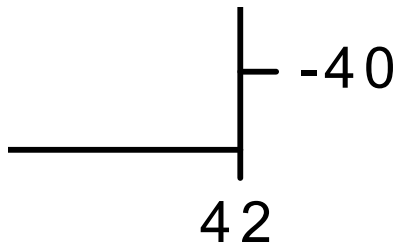
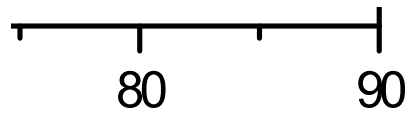


그림 2-16 Case-2에서 초전도 소자의 전압·전류 확대곡선  
 Fig. 2-16 Extended curves of voltage and current of the superconducting units in the Case\_2

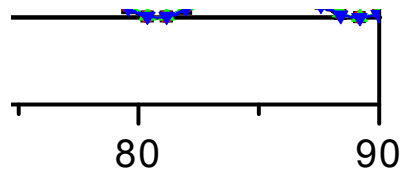
## 2. 초전도 소자의 소비전력특성

초전도 소자는 퀘치로 인해 상전도의 저항이 발생하게 되고, 이로 인해 전압이 발생하게 된다. 초전도 소자에 흐르는 전류와 발생하는 전압으로 인해 초전도 소자에서 소비되는 전력특성을 분석할 수 있다.

그림 2-17은 각 Case별 변압기형 초전도 한류기 내에 있는 4개의 초전도 소자에서 소비되는 전력( $P_{SC-A}$ ,  $P_{SC-B}$ ,  $P_{SC-C}$ ,  $P_{SC-D}$ )을 나타낸 곡선이다. (a)의 Case-1의 경우 SD의 초전도 소자만이 퀘치되었으므로 초전도 소자에서 소비되는 전력 또한 SD만이 1,646W의 전력을 소비한다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 (b)의 Case-2의 경우 4개의 초전도 소자가 모두 퀘치되어 소비되는 전력이 각각 609, 693, 707, 543W이었다. 또한 (c)의 Case-3의 경우 각각 551, 667, 705, 583W의 전력을 소비한다는 것을 확인할 수 있다. Case-1은 불균일한 초전도 소자의 퀘치특성으로 인해 1개의 초전도 소자만이 전력을 소비한다. 그러므로 불균일한 전력분담으로 더 큰 사고전류의 발생시 초전도 소자의 파손 우려가 높다. 그러나 Case-2와 Case-3의 경우 모든 균일한 퀘치특성으로 인해 초전도 소자에서 균일하게 전력을 분배하여 소비하므로 초전도 한류기의 용량 증대에 유리하다는 것을 알 수 있다.



(a) Case-1



(b) Case-2



(c) Case-3

그림 2-17 Case별 초전도 소자의 소비전력 특성곡선

Fig. 2-17 Consumption power curves according to cases of superconducting units

### 3. 초전도 소자의 회복특성

초전도 한류기가 적용될 전력망은 사고 발생시 순간사고 및 지속사고를 구분하기 위해 재폐로 동작책무를 수행하는 전력용 차단기를 도입하고 있다. 재폐로 동작은 사고발생 초기, 전력용 차단기를 개로(open: O)하여 전력망으로부터 사고발생 구간을 분리시킨다. 그 후 재폐로 동작책무에 따라 차단기를 다시 폐로(close: C)하여 전력망에 사고구간을 다시 연결한다. 전력망에서 발생하는 사고전류에 의해 초전도 한류기는 초전도 소자에서 발생하는 상전도 저항에 의해 사고전류 제한동작을 수행하고, 전력용 차단기의 개로동작에서 제한동작을 수행한 초전도 소자가 다시 초전도 상태로 복귀하여 전력용 차단기의 재폐로에 의한 사고전류 제한동작을 준비하여야 한다. 이때 초전도 소자의 회복특성은 상전도체에서 초전도 상태로 다시 복귀하는 시간을 의미한다.

재폐로 동작을 수행하는 전력용 차단기의 동작을 모의하기 위해 그림 2-14에서 SW<sub>2</sub>의 ON에 의해 지락사고 모의주기인 5주기 이후 SW<sub>1</sub>을 OFF하여 초전도 한류기로 흐르는 전류의 흐름을 차단시킴으로써 전력용 차단기의 개로동작을 모의하였다. 이후 재폐로 동작책무에 따라 SW<sub>1</sub>을 ON/OFF함으로서 전력용 차단기의 재폐로 및 개로 동작을 모의하였다.

그림 2-18은 그림 2-13의 Case별 초전도 소자의 회복시간을 나타낸 곡선이다. 초전도 소자의 회복시간은 차단기의 개로동작에 의해 초전도 소자에 전류가 흐르지 않는 상태에서 상전도체에서 초전도체로의 복귀시간으로 정의된다. 그러므로 회복시간은 초전도 소자가 초전도 한류기의 사고전류 제한동작에 의해 받은 전력을 차단기의 개로시간 내에 소비하는 시간으로 결정된다. Case-1과 같이 중성선이 없는 초전도 한류기의 경우 초전도 소자가 초전도 상태로 회복하기 위해 소비하는 전력량은 초전도 소자가 사고주기 동안 받은 전력량( $W_S$ )을 나타내는 식 (12)에 식 (3)을 대입함으로서 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 Case-2와

Case-3과 같이 중성선이 있는 초전도 한류기의 경우 식 (12)에 식 (6)을 대입함으로써 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_S = V_{SC} \cdot I_S \cdot t[wh] \quad (12)$$

$$W_S = \left( \frac{jwM_P}{jwL_S + 2R_{SC}} \right) \cdot I_P \cdot V_{SC} \cdot t[wh] \quad (13)$$

$$W_S = \left( \frac{jwM_P}{2jwL_S + R_{SC}} \right) \cdot I_P \cdot V_{SC} \cdot t[wh] \quad (14)$$

여기서,  $V_{SC}$ 는 초전도 소자에서 발생하는 전압이고,  $I_S$ 는 초전도 소자에 흐르는 전류이다.

즉, 초전도 소자가 사고주기 동안 받은 전력량은 재폐로 동작을 수행하는 차단기가 개로되어 있는 동안에  $H = 0.24I_S^2 \cdot R_{SC} \cdot t = 0.24W_S$ 에 의해 열로서 소비하게 되는 시간이 초전도 소자의 회복시간이라 할 수 있다. 초전도 소자가 불균형 켜치된 Case-1의 경우 사고주기 동안 소비전력이 크기 때문에 그림 2-18(a)와 같이 회복시간이 279.4msec로 길다는 것을 확인할 수 있다. 반면 Case-2와 Case-3의 경우 초전도 소자의 회복시간은 각각 37.7과 38.1msec로 짧다는 것을 알 수 있다. 이는 4개의 초전도 소자가 개별적으로 흐르는 전류에 의해 동시에 켜치되면서 사고주기 동안 받은 전력이 균일하여 회복되는 시간도 빨라지게 되는 것이다. 이로부터 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기는 전력용 차단기의 재폐로 동작에 적용시 차단기의 개로주기 동안 초전도 소자가 빠르게 회복한다는 것을 확인할 수 있다. 전력망에서 발생하는 지속사고에 의한 사고전류를 초전도 한류기가 전력용 차단기의 차단용량 이하로 제한하게 된다. 이후 전력용 차단기의 재폐로 동작시 제 2의 사고전류를 제한하기 위해 초전도 한류기는 원래의 초전도 상태로 복귀하는 것이 중요하다.

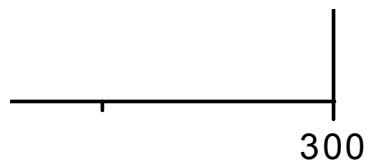


이에 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기는 초전도 소자의 동시적인 켄치특성으로부터 균일한 전력분담으로 초전도 소자가 빠르게 회복하는 특성을 가지고 있어 전력망으로의 적용시 재폐로 동작을 수행하는 전력용 차단기와 상호 협조가 원활히 이뤄질 것으로 예상된다.



(a) Case-1

(b) Case-2



(c) Case-3

Fig. 2-18 Case별 초전도 소자의 회복 특성곡선

Fig. 2-18 Recovery curves according to cases of superconducting units

### III. 3상 변압기형 초전도 한류기의 동작특성

#### A. 3상 변압기형 초전도 한류기

##### 1. 실험조건

현재 사용되고 있는 전력망은 3상 교류전력으로 송·배전 선로를 통해 공급하고 있으므로, 전력망에 적용될 초전도 한류기 또한 3상으로 제작되어야 한다. 그러므로 전력망에서 발생하는 여러 가지의 지락 및 단락 사고에 대해서도 초전도 한류기는 신뢰성있는 동작을 수행해야 한다.

3상 전력망으로의 초전도 한류기 적용 실험을 수행하기 위해 그림 3-1과 같은 3상 전력계통을 구성하였다. 3상 전원( $V_R$ ,  $V_S$ ,  $V_T$ )은 전원인가 스위치( $SW_{R-1}$ ,  $SW_{S-1}$ ,  $SW_{T-1}$ )를 통해 인가되며, 부하저항(R-Load, S-Load, T-Load:  $50\Omega$ )을 사고발생 스위치( $SW_{R-2}$ ,  $SW_{S-2}$ ,  $SW_{T-2}$ )로 단락시킴으로써 지락사고를 모의한다.

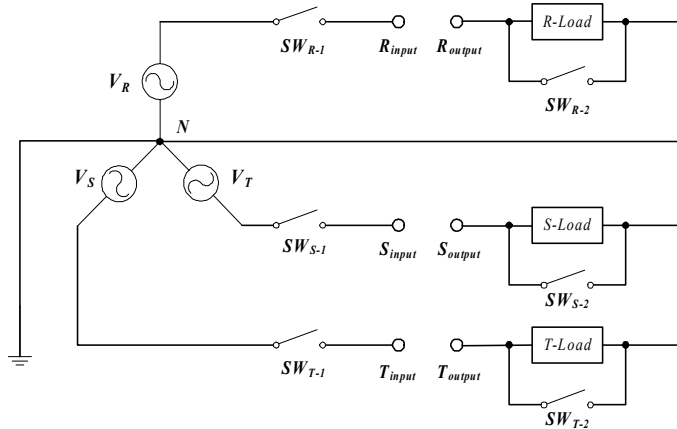


그림 3-1 변압기형 초전도 한류기의 실험을 위한 3상 계통도  
 Fig. 3-1 Three-phase power system of transformer-type SFCLs for the experiment

그림 3-2는 중성선을 갖는 3상 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도를 나타낸 것이다. 앞 장에서 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기가 초전도 소자의 퀘치특성 및 회복특성이 우수하다는 것을 실험을 통해 입증하였다. 이를 바탕으로 각 상에는 1·2차 권선이 하나의 철심에 의해 유도적으로 연결되어 있는 3상 변압기형 초전도 한류기를 구성하였다.

또한 전력망에 사용하는 전력용 차단기가 재폐로 동작을 수행하므로 발생하는 사고 또한 재폐로 동작에 의해 발생하도록 하였다. 현재 전력망에 적용되고 있는 재폐로 방식은 CO-0.3sec-CO-3min-CO(O: open, C: close)의 동작책무를 적용하고 있다. 이에 재폐로 방식에 따른 초전도 한류기의 동작주기는 그림 3-3과 같이 설정하였다. 재폐로 동작을 수행하기 위해 전력망에서 발생하는 지속적인 지락사고는 각 상의 사고발생 스위치(SW<sub>R-2</sub>, SW<sub>S-2</sub>, SW<sub>T-2</sub>)를 폐로하여 사고를 모의하였다. 또한 전력용 차단기의 개로동작은 고장점을 선로에서 분리하여 전원공급을 차단하는 것을 의미하므로 전원인가 스위치(SW<sub>R-1</sub>, SW<sub>S-1</sub>, SW<sub>T-1</sub>)를 개로하여 전원을 차단하도록 모의하였다. 전력망에 적용되는 전력용 차단기는 고속도 차단용인 경우 3주기 이내에 동작하고, 일반적으로는 5~8주기 이내에 차단동작을 수행한다. 이에 실험에서는 차단기의 폐로주기를 5, 7, 5주기로 설정하였고, 개로주기는 10, 20주기로 설정하였다.

3상 변압기형 초전도 한류기의 실험에 사용된 각 상의 초전도 소자는 그림 3-4와 같은 임계전류 특성을 갖는다. 각 상의 초전도 소자는 제작상 불가피하게 그림과 같이 임계전류의 차이를 가지고 있다. 그러나 중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기는 임계전류의 차이로 인해 발생하는 불균형 퀘치특성을 해결하여 동시에 퀘치되는 특성을 갖는다.

본 장에서는 전력망으로의 적용을 위한 중성선을 갖는 3상 변압기형 초전도 한류기의 동작을 전력용 차단기의 재폐로 방식에 따라 1선, 2선, 3선 지락사고를 모의함으로써 초전도 한류기의 사고전류 제한특성 및 초전도 소자의 회복특성을 분석하였다.

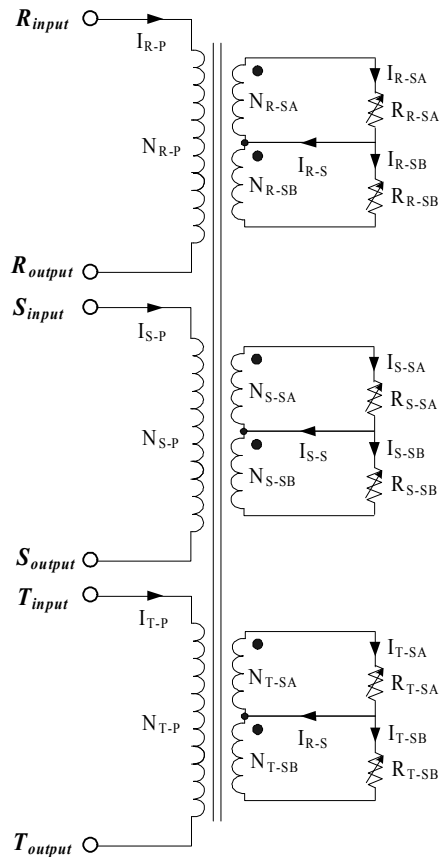


그림 3-2 중성선을 갖는 3상 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도  
 Fig. 3-2 Equivalent circuit of three-phase transformer-type SFCL with neutral lines

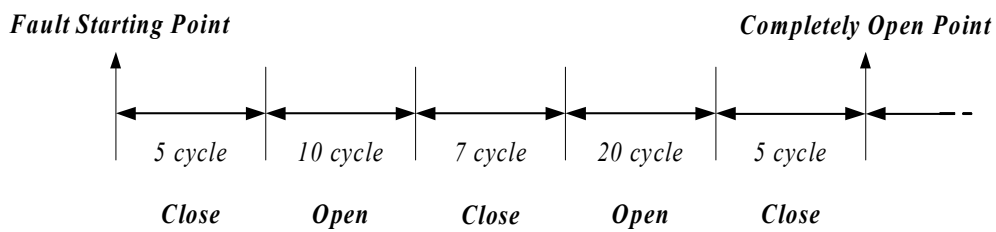


그림 3-3 재폐로 동작책무 설정값

Fig. 3-3 Setting scheme of reclosing operational duty



그림 3-4 초전도 소자의 임계전류 곡선

Fig. 3-4 Critical current curves of superconducting units

## 2. 사고유형별 특성 해석

전력망의 3상 전력시스템은 각 상이  $\pm 120^\circ$ 의 위상 차이를 가지고 평형상태를 유지하고 있다. 그림 3-5는 1개의 철심을 갖는 3상 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도를 나타낸 것이다. 평형상태에서 3상 변압기형 초전도 한류기의 각 상의 전압 방정식은 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{jP} &= L_{jP} \frac{di_{jP}}{dt} \pm M_{jSP} \frac{di_{jS}}{dt} \\
 V_{jS} &= (L_{jS} \frac{d}{dt} + R_{SC}) i_{jS} \pm M_{jPS} \frac{di_{jP}}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

여기서, j는 R, S, T의 각 상을 나타내고,  $\pm$ 는 자속의 방향을 표시한다.

전력망의 어떠한 상에 1선 지락사고가 발생하면, 그 상의 2차 권선에 유도된 사고전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과하게 되면 초전도 소

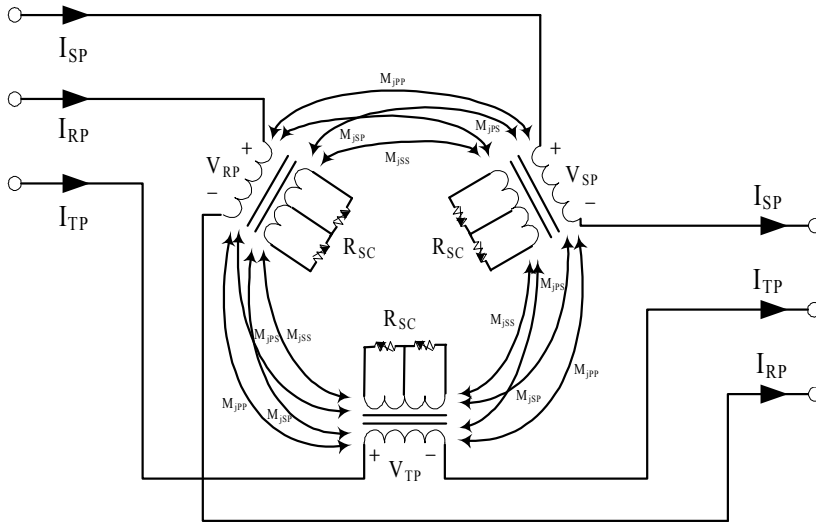


그림 3-5 1개의 철심을 갖는 3상 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도  
 Fig. 3-5 Equivalent circuit of three-phase transformer-type SFCL  
 with an iron core

자의 퀘치로 인해 2차 권선의 전류가 제한되며, 1차 권선에 흐르는 사고 전류 또한 권선비(a)에 의해 제한된다.

이때 각 상의 1·2차 권선은 하나의 철심에 연결되어 있으므로 사고전류로 인해 사고상의 1·2차 권선에서 발생하는 자속이 건전상의 1·2차 권선의 자속에도 영향을 주게 된다. 그러므로 건전상의 2차 권선에 유도된 전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과한다면 건전상에 있는 초전도 소자가 퀘치되어 유도된 전류를 제한하게 된다. 이는 사고상에 있는 초전도 소자뿐만 아니라 건전상에 있는 초전도 소자도 1선 지락사고로 인해 발생하는 사고전류를 제한하는 역할을 수행하게 된다는 것을 의미한다.

전력망의 어떠한 2개 이상의 상에서 지락사고가 발생하게 되면 위에서 설명한 것과 같이 사고상의 초전도 소자는 그 상의 사고전류를 제한하게 된다. 이때 하나의 사고상에서 발생하는 1·2차 권선의 자속은 다른 사고상 및 건전상의 1·2차 권선에도 영향을 주게 된다. 즉, 사고상의 1차 권

선에 흐르는 선로전류는 그 상에 있는 초전도 소자에 의해 전류가 제한되지만 타 사고상의 사고전류로부터 유도된 전류가 결합되어 흐르게 된다. 이것은 1선 지락사고와는 달리 2선 이상의 지락사고에서는 사고상의 사고전류가 다른 사고상의 권선에도 영향을 주므로 1선 지락사고의 제한된 사고전류보다 더 큰 전류로 제한된다는 것을 예상할 수 있다. 전력망의 어떠한 상에서 지락사고가 발생할 때 각 상의 1·2차 권선의 전압방정식을 식 (16), (17), (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{RP} &= L_{RP} \frac{di_{RP}}{dt} \pm \frac{d}{dt} (M_{RSP} i_{RS} + A) \\ V_{RS} &= (L_{RS} \frac{d}{dt} + R_{SC}) i_{RS} \pm \frac{d}{dt} (M_{RPS} i_{RP} + A) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_{SP} &= L_{SP} \frac{di_{SP}}{dt} \pm \frac{d}{dt} (M_{SSP} i_{SS} + B) \\ V_{SS} &= (L_{SS} \frac{d}{dt} + R_{SC}) i_{SS} \pm \frac{d}{dt} (M_{SPS} i_{SP} + B) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} V_{TP} &= L_{TP} \frac{di_{TP}}{dt} \pm \frac{d}{dt} (M_{TPS} i_{TS} + C) \\ V_{TS} &= (L_{TS} \frac{d}{dt} + R_{SC}) i_{TS} \pm \frac{d}{dt} (M_{TPS} i_{TP} + C) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, A와 B, C는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 타 상에서 받는 자속의 영향을 나타낸다.

$$\begin{aligned} A &= M_{SPS} i_{SP} + M_{SSP} i_{SS} + M_{TPS} i_{TP} + M_{TSP} i_{TS} \\ B &= M_{RPS} i_{RP} + M_{RSP} i_{RS} + M_{TPS} i_{TP} + M_{TSP} i_{TS} \\ C &= M_{RPS} i_{RP} + M_{RSP} i_{RS} + M_{SPS} i_{SP} + M_{SSP} i_{SS} \end{aligned}$$

## B. 3상 변압기형 초전도 한류기의 사고유형별 동작특성

### 1. 1선 지락사고

그림 3-2의 증성선을 갖는 3상 변압기형 초전도 한류기에 1선(R상) 지락사고가 발생한 경우 전력용 차단기의 재폐로 동작책무에 따른 사고전류의 제한특성 곡선을 그림 3-6에 나타내었다. 이때 각 상의 1·2차 권선의 비는  $N_p:N_{SA}:N_{SB}=4:1:1$ 이고, 인가전압( $V_R, V_S, V_T$ )은 360V이다. 재폐로 동작에 따라 차단기가 3번의 폐로 동작을 수행하는 동안 사고전류는 각각 39.3, 37.5, 38.4A로 제한되었다. 첫 번째 사고는 재폐로 동작에 따른 나머지 사고와는 달리 정상상태의 전류가 흐르는 동안에 발생된다. 그러므로 1선 지락사고로 인해 발생하는 사고전류가 큰 값을 가지므로 변압기형 초전도 한류기에 의해 비교적 큰 값으로 제한된다.

R상에서 지락사고로 인해 발생한 사고전류는 R상의 2차 권선으로 유도되어 초전도 소자를 켜치시킨다. 초전도 소자에서 발생하는 저항에 의해 2차 권선의 전류는 제한되고, 2차 권선에 자속을 유지시킨다. 하나의 철심에 의해 3상이 유도적으로 결합되어 있으므로 이 자속은 사고상(R상) 및 건전상(S, T상)의 1·2차 권선에 영향을 준다. 사고상인 R상은 그림 3-7(a)과 같이 사고전류를 제한하게 되며, (b)와 (c)같이 건전상인 S상과 T상은 2차 권선에 전류가 유도된다. 이때 건전상의 1차 권선의 전류에도 전류가 유도되어 기존의 전류와 결합하여 흐르게 된다는 것을 확인할 수 있다. 이 건전상의 2차 권선에 유도된 전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과하게 되면 초전도 소자의 켜치로 인해 저항이 발생하고, 이 저항은 R상의 초전도 소자와 같이 사고상의 사고전류를 제한하게 된다. 즉, 하나의 철심 사용으로 인해 1선 지락사고시 사고상에 있는 R상의 초전도 소자 뿐만 아니라 건전상에 있는 S상과 T상의 초전도 소자도 유도전류에 의해 켜치되어 사고전류를 제한하는 역할을 수행하게 된다.



이는 사고상의 초전도 소자만 사고전류를 부담하는 것이 아니라 건전상에 있는 초전도 소자도 사고전류를 부담하여 사고상에 있는 초전도 소자의 전력부담을 줄여주는 것을 의미한다.

그림 3-7에서 각 상의 2차 권선의 중성선에 흐르는 전류가 0이 아니라는 것을 알 수 있다. 이는 2차 권선의 인덕턴스의 차이와 다른 상과의 상호자속에 의해 각각의 초전도 소자에 흐르는 전류가 다르기 때문이다.

그림 3-8은 각 상에 있는 초전도 소자의 켄치로 인해 발생한 전압을 나타낸 곡선이다. R상 1선 지락사고로 인해 그 상에 있는 초전도 소자는 켄치되어 발생한 저항으로 인해 전압이 발생한다. 사고상의 1·2차 권선의 제한된 전류는 건전상의 2차 권선에도 전류를 유도시켜 건전상의 초전도 소자도 켄치시킨다는 것을 건전상에 있는 초전도 소자의 전압곡선을 통해 확인할 수 있다. 각 상에서 발생하는 초전도 소자의 전압은 각각 62, 74, 81.6V로 같은 상에서 발생하는 전압은 동일하다. 즉 같은 상에 있는 중성선을 통해 연결된 2개의 초전도 소자는 균일한 켄치로부터 동일한 전압이 발생한다는 것을 알 수 있다.

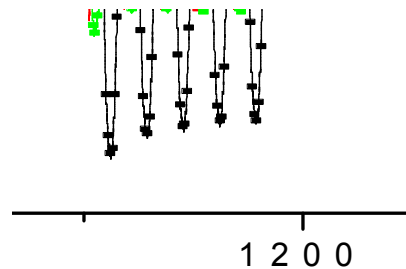
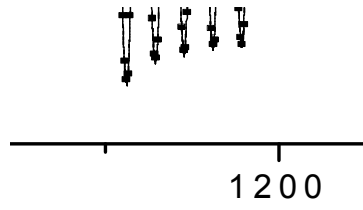
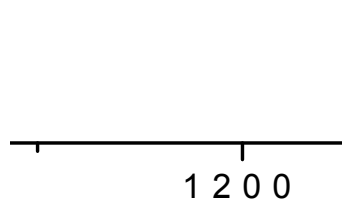


그림 3-6 1선 지락사고시 제한된 사고전류 특성곡선

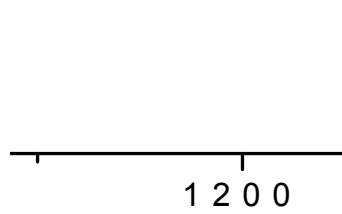
Fig. 3-6 Limiting fault current curves during the single line-to-ground fault



(a) R-phase



(b) S-phase



(c) T-phase

그림 3-7 1선 지락사고시 각 상의 전류 특성곡선

Fig. 3-7 Current curves of each phase during the single line-to-ground fault

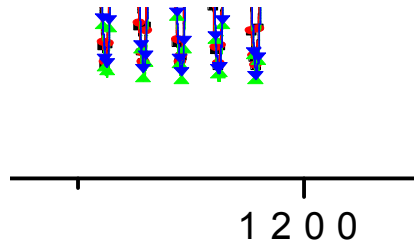


그림 3-8 1선 지락사고시 초전도 소자의 전압 특성곡선

Fig. 3-8 Voltage curves of superconducting units during the single line-to-ground fault

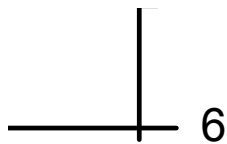


그림 3-9 1선 지락사고시 인가전압에 따른 제한된 사고전류 및 제한율( $I_P/I_{FCL}$ ) 추이곡선

Fig. 3-9 Limiting fault currents and limiting rate ( $I_P/I_{FCL}$ ) changing curves of a transformer-type SFCL according to applied voltage during the single line-to-ground fault

그림 3-9는 각 상의 인가전압 증가에 따라 제한된 사고전류의 값과 그 제한율을 재폐로 동작의 사고순서에 따라 나타낸 것이다. 인가전압의 증가는 사고전류의 증가를 나타내며, 이에 각각의 사고순서에 따라 제한된 사고전류의 값도 증가하게 된다. 첫 번째 사고는 정상상태에서 사고가 발생하므로 재폐로 동작에 의한 3번의 사고 중 가장 큰 사고전류가 흐른다. 그러므로 제한된 사고전류는 인가전압의 증가에 따라 커진다는 것을 알 수 있다. 그러나 초전도 한류기가 없는 경우의 사고전류( $I_{FCL}$ )와 초전도 한류기로부터 제한된 사고전류( $I_P$ )와의 비로부터 나타내는 사고전류 제한율은 인가전압의 증가에 따라 감소하게 된다. 이는 초전도 소자에 유입되는 사고전류의 증가에 따라 퀘칭으로 인해 발생하는 저항의 증가율 및 값이 커지기 때문이다.

그림 3-10은 재폐로 동작에 따라 3상 변압기형 초전도 한류기에 있는 초전도 소자의 회복특성을 나타낸 곡선이다. 설정된 재폐로 주기(CO-t-CO-t-CO))는 5-10-7-20-5 주기로 하였다. 재폐로 시스템에 적용된 초전도 한류기는 첫 번째 사고에 의해 사고전류를 제한하고, 차단기가 개로되는 시간 이내에 초전도 소자가 모두 상전도 상태로 복귀하여 차단기의 폐로로 인한 두 번째 사고를 대비하여야 한다. 차단기가 개로되는 3번의 시간동안 초전도 소자의 회복시간은 각각 75.3, 59.7, 63.1msec으로 모든 초전도 소자가 동시에 회복된다는 것을 알 수 있다. 이 시간은 차단기의 개로시간 동안 초전도 소자가 모두 회복되는 시간으로 변압기형 초전도 한류기는 재폐로 동작에서 차단기의 폐로동작 이전에 사고전류를 제한하기 위한 동작을 준비한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 초전도 소자의 균일한 퀘칭특성으로 인해 초전도 소자의 전력부담이 균일하게 분담되기 때문이다.

그림 3-11은 인가전압의 증가에 따라 각 상 초전도 소자의 회복시간 변화를 나타낸 곡선이다. 여기서  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ 는 재폐로 동작책무에 의해 초전도 소자가 3번의 회복동작을 수행한다는 것을 의미한다. 인가전압의

300

2000

그림 3-10 1선 지락사고시 초전도 소자의 회복특성 곡선

Fig. 3-10 Recovery curves of superconducting units during the single line-to-ground fault

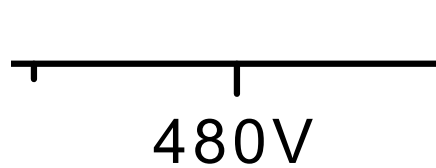


그림 3-11 1선 지락사고시 인가전압에 따른 초전도 소자의 회복시간  
추이곡선

Fig. 3-11 Recovery time changing curves of superconducting units according to applied voltage during the single line-to-ground fault

증가로 인해 초전도 소자에 흐르는 전류 및 발생하는 전압이 증가하여 초전도 소자의 전력부담이 증가한다. 이로 인해 초전도 소자가 받은 전력량의 소비시간으로 나타내는 회복시간은 인가전압이 증가함에 따라 증가하게 된다.  $t_1$ 과  $t_3$ 는 전력망에서 발생한 사고가 5주기로 동일하지만 첫 번째 사고인  $t_1$ 은 정상상태에서 사고가 발생하므로 초전도 소자의 소비전력이 더 커서 좀 더 긴 시간동안 회복된다. 그러나  $t_2$ 는 사고주기가 7주기로 길지만, 사고발생 시점의 차이로 인해 초전도 소자가 받은 전력량이 다른 사고 때보다 적어져 회복시간이 더 적어진다는 것을 알 수 있다.

## 2. 2선 지락사고

그림 3-1의 3상 계통도에서 R상과 S상의 2선 지락사고를 발생시키기 위해  $SW_{R-2}$ 와  $SW_{S-2}$ 를 동작시켰다. 그림 3-12는 2선 지락사고시 재폐로 시스템에 적용된 3상 변압기형 초전도 한류기의 각 상의 제한된 사고전류를 나타낸 곡선이다. 재폐로 동작 중 첫 번째 사고에서 R상과 S상의 사고전류는 각각 118.8A와 -113.1A로 제한되었다.

또한 두 번째와 세 번째 사고에서 R상과 S상의 사고전류는 각각 117.3, -111A와 117.3, -109.5A로 제한되었다. R상의 0°기준으로 2선 지락사고가 발생되었으므로 S상의 위상이 120° 앞서 -방향으로 사고전류가 발생한다. 1선 지락사고와 비교할 때 제한된 R상의 사고전류가 3배 가까이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 다른 사고상인 S상과 건전상인 T상의 1·2차 권선에서 발생하는 자속이 R상 1차 권선의 자속과 쇄교하여 증가하기 때문이다. S상 또한 R상과 T상의 영향으로 제한된 사고전류가 증가한다. 그림 3-13(a)과 (b)에서 1차 권선에 흐르는 전류는 권선비(a)에 의해 2차 권선에 전류를 유도하고, 이 유도전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과하면 켄치되어 발생한 저항에 의해 전류가 제한된

다.

이로 인해 2차 권선에는 반대방향으로 자속이 발생되고, 다른 사고상 및 건전상의 1·2차 권선에 영향을 주게 된다. 그림 3-13(c)과 같이 건전상은 사고상에 의해 2차 권선에 유도된 전류와 동상의 1차 권선에 의해 유도된 전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과하게 되면 켄치되고 발생된 저항에 의해 전류를 제한하게 된다. 이는 1선 지락사고와 동일하게 초전도 소자의 전력부담을 줄여주게 된다.

그림 3-14는 각 상의 초전도 소자에서 발생하는 전압을 나타낸 곡선이다. 사고상인 R상과 S상의 초전도 소자가 모두 켄치되어 전압이 발생하며, 건전상인 T상의 초전도 소자도 사고상에서 유도된 전류에 의해 켄치되는 것을 확인할 수 있다. 각 상에서 발생하는 초전도 소자의 전압은 각각 39.8, 73.9, 38.6V로 같은 상의 초전도 소자에서 발생하는 전압이 거의 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 즉 2차 권선과 초전도 소자를 중성선으로 연결함으로써 2개의 초전도 소자는 균일한 켄치가 발생하며, 이로 인해 거의 같은 전압이 발생한다는 것을 알 수 있다.

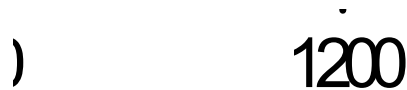
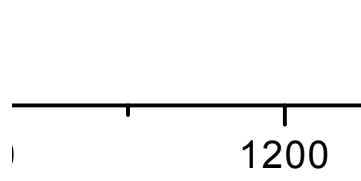
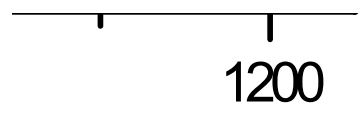


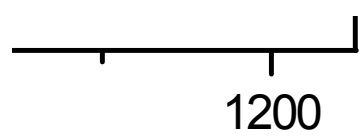
그림 3-12 2선 지락사고시 제한된 사고전류 특성곡선  
Fig. 3-12 Limiting fault current curves during the double  
line-to-ground fault



(a) R-phase



(b) S-phase



(c) T-phase

그림 3-13 2선 지락사고시 각 상의 전류 특성곡선

Fig. 3-13 Current curves of each phase during the double line-to-ground fault



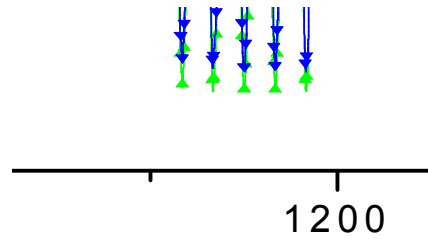


그림 3-14 2선 지락사고시 초전도 소자의 전압 특성곡선

Fig. 3-14 Voltage curves of superconducting units during the double line-to-ground fault

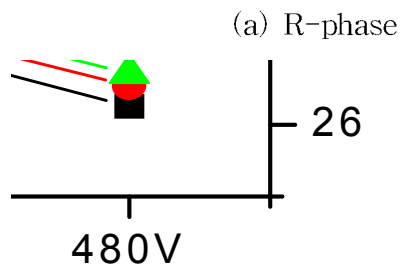
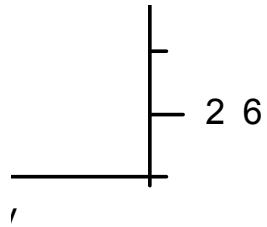
그림 3-15는 재폐로 시스템의 사고순서별로 인가전압의 증가에 따라 3상 변압기형 초전도 한류기의 제한된 사고전류를 나타낸 것이다. 인가전압의 증가에 따라 발생하는 사고전류가 증가하므로 제한된 사고전류의 크기 또한 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 재폐로 시스템에서 발생하는 3번의 사고에 따라 제한된 사고전류도 거의 같다. 1선 지락사고의 경우 첫 번째 사고는 정상상태에서 발생하기 때문에 사고전류가 가장 크다. 그러나 2선 지락사고에서는 다른 사고상에서 유도되는 자속의 영향이 크기 때문에 첫 번째 사고와는 상관없이 사고마다 제한된 전류의 크기가 거의 같게 되는 것이다. R상과 S상의 인가전압별 제한된 사고전류의 크기를 비교해 보면 거의 차이가 없다는 것을 확인할 수 있다. 이는 2선 지락사고시 사고가 발생한 R상과 S상이 서로 연결되어 반대방향의 동일한 크기의 사고전류가 흐르기 때문이다.

초전도 한류기가 없는 경우의 사고전류( $I_{FCL}$ )와 제한된 사고전류( $I_p$ )와의 비로 사고전류의 제한율( $I_p/I_{FCL}$ )을 그림 15에 나타내었다. R상의 경우 68%, S상의 경우 70%정도로 사고전류가 제한된다는 것을 확인할 수 있

다. 이는 인가전압이 증가하더라도 2선 지락사고시 3상 변압기형 초전도 한류기가 사고상의 사고전류를 약 70% 정도로 제한할 수 있다는 것을 의미한다.

그림 3-16은 2선 지락사고시 켄치된 초전도 소자의 회복시간을 나타낸 곡선이다. 재폐로 시스템에 적용된 변압기형 초전도 한류기는 2선 지락사고시 차단기의 개로주기 이내에 모든 초전도 소자가 회복된다는 것을 알 수 있다. 차단기가 개로되는 3번의 시간 중 초전도 소자의 회복시간은 각각 103.6, 81.7, 102.8msec이었다. 또한 각 상의 모든 초전도 소자가 동시에 회복된다. 이는 각 상이  $120^\circ$ 의 위상차이로 인해 발생하는 사고전류의 크기가 틀리므로 초전도 소자가 받은 전력량은 다르지만 하나의 철심으로 인해 모든 초전도 소자가 동시에 회복된다는 것을 알 수 있다.

그림 3-17은 2선 지락사고시 인가전압의 증가에 따라 각 상의 초전도 소자의 회복시간의 변화를 나타낸 것이다. 인가전압의 증가로 인해 발생하는 사고전류의 크기가 커지므로 초전도 소자가 받은 전력량이 증가하여 회복되는 시간이 증가한다. 첫 번째 사고와 세 번째 사고는 사고 발생주기가 5주기로 동일하므로 회복되는 시간 또한 거의 같다는 것을 알 수 있다. 두 번째 사고의 경우 사고주기가 7주기로 길지만, 사고발생 시점의 차이로 인해 초전도 소자가 받은 전력량이 다른 사고때보다 적어 회복되는 시간이 적어진다.



(b) S-phase

그림 3-15 2선 지락사고시 인가전압에 따른 제한된 사고전류 및 제한율  
( $I_P/I_{FCL}$ ) 추이곡선

Fig. 3-15 Limiting fault currents and limiting rate ( $I_P/I_{FCL}$ ) changing  
curves of a transformer-type SFCL according to applied voltage  
during the double line-to-ground fault

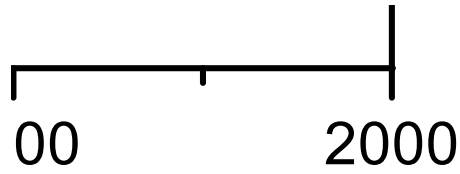


그림 3-16 2선 지락사고시 초전도 소자의 회복시간 특성곡선  
 Fig. 3-16 Recovery curves of superconducting units during the double line-to-ground fault

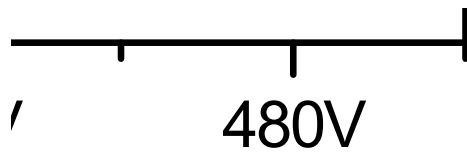


그림 3-17 2선 지락사고시 인가전압에 따른 초전도 소자의 회복시간  
 추이곡선  
 Fig. 3-17 Recovery time changing curves of superconducting units according to applied voltage during the double line-to-ground fault

### 3. 3선 지락사고

3선 지락사고는 3상이 모두 지락되는 평형사고에 해당된다. 그림 3-18은 재폐로 동작에 의해 3상 변압기형 초전도 한류기가 제한하는 각 상의 사고전류를 나타낸 곡선이다. 재폐로 동작에 의해 첫 번째 사고에서는 각 상의 전류가 120.8, -114.1, 28.4A로 제한되었다. 또한 두 번째 사고에서는 119.3, 111.4, 25.5A로, 세 번째 사고에서는 119.4, -110.2, 25.7A로 각 상의 사고전류가 제한되었다. 2선 지락사고의 제한된 사고전류와 비교할 때 R상과 S상은 거의 같은 사고전류 제한특성을 보인다는 것을 알 수 있다. T상의 제한된 사고전류가 R상과 S상의 것보다 작은 이유는 T상이 240°의 위치에서 사고가 발생하므로 초전도 소자가 다른 상보다 먼저 켜치되어 사고전류를 제한하기 때문이다. 또한 제작된 변압기에서 R상과 S상은 같은 레그에 위치해 있는 반면, T상은 다른 레그에 위치하여 각 상의 상호자속이 서로 틀리기 때문이다.

그림 3-19에서 각 상의 초전도 소자에 흐르는 전류는 그 상의 1차 권선과의 비에 의해 유도된 전류와 다른 사고상의 1·2차 권선에 의해 유도

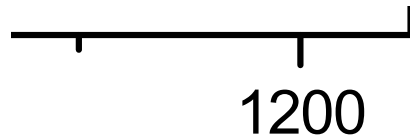
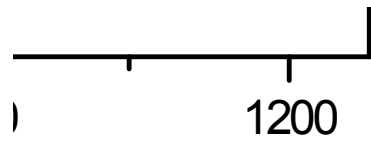
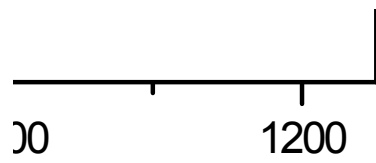


그림 3-18 3선 지락사고시 제한된 사고전류 특성곡선

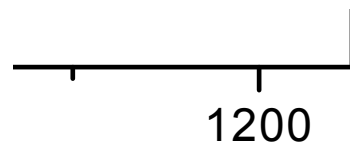
Fig. 3-18 Limiting fault current curves during the triple line-to-ground fault



(a) R-phase



(b) S-phase



(c) T-phase

그림 3-19 3선 지락사고시 각 상의 전류 특성곡선

Fig. 3-19 Current curves of each phase during the triple line-to-ground fault

된 전류가 결합되어 흐르게 된다. 이 합성전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과하게 되면 켄치되어 사고전류를 제한하게 된다. 제한된 사고전류는 다시 권수비에 의해 각 상의 1차 권선에 유도되어 그림 3-18의 전류와 같이 제한된다.

그림 3-20은 각 상의 초전도 소자의 켄치로 인해 발생하는 전압을 나타낸 곡선이다. 각 상의 2차 권선에 흐르는 전류에 의해 모든 초전도 소자가 켄치되었으며, 각 상의 초전도 소자에서 각각 41.6, -53, 50V의 전압이 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 각 상의 초전도 소자에 흐르는 전류는 변압기의 2차 권선과 초전도 소자 사이에 중성선을 연결함으로써 초전도 소자의 켄치로 인해 발생하는 저항의 비로 결정된다. 그러므로 각 상의 초전도 소자에서 발생하는 전압은 거의 동일하게 된다.

그림 3-21은 3선 지락사고시 재폐로 시스템의 사고순서별로 인가전압에 따라 3상 변압기형 초전도 한류기의 제한된 사고전류와 그 제한율 ( $I_P/I_{FCL}$ )을 나타낸 것이다. 재폐로 시스템에 의해 발생된 3번의 사고로 인해 인가전압의 증가에 따라 각 상의 제한된 사고전류는 거의 같다는

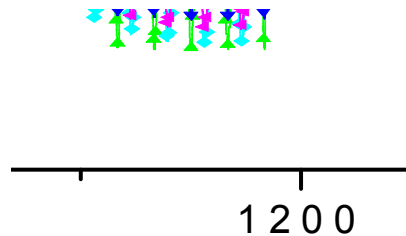


그림 3-20 3선 지락사고시 초전도 소자의 전압 특성곡선

Fig. 3-20 Voltage curves of superconducting units during the triple line-to-ground fault

(a) R-phase

480V

(b) S-phase

480V

(c) T-phase

그림 3-21 3선 지락사고시 인가전압에 따른 제한된 사고전류 및 제한율  
( $I_P/I_{FCL}$ ) 추이곡선

Fig. 3-21 Limiting fault currents and limiting rate ( $I_P/I_{FCL}$ ) changing  
curves of a transformer-type SFCL according to applied voltage  
during the triple line-to-ground fault



것을 확인할 수 있다. 3번의 사고 중 가장 큰 사고전류가 발생하는 첫 번째 사고에서 사고전류가 작게 제한된다. 이것은 또한 초전도 한류기가 없는 경우의 사고전류( $I_{FCL}$ )와 제한된 사고전류( $I_p$ )와의 비로 나타낼 수 있는 사고전류의 제한율이 가장 작다는 것을 의미한다. 하지만 R상과 S상은 전체 사고전류의 67~70%를, T상의 경우 90%이상을 일정하게 제한한다는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-22는 3선 지락사고시 차단기의 개로 주기동안 각 상의 초전도 소자가 회복되는 시간을 나타낸 곡선이다. 재폐로 시스템에 의한 3번의 차단기 개로동작 중 각 상의 켜진 초전도 소자의 회복시간은 각각 89.8, 80.5, 90msec로 동일하게 회복된다는 것을 확인할 수 있다. 서로 다른 전력량을 받은 초전도 소자는 병렬로 연결된 2차 권선에 의해 전력량을 소비하게 되고, 2차 권선은 상호 유도작용에 의해 하나의 철심으로 연결되어 있으므로 각 상의 초전도 소자의 전력량이 균일하게 된다. 그러므로 각 상에 있는 초전도 소자의 회복시간은 동일하게 되는 것이다.

그림 3-23은 인가전압의 증가에 따라 각 상의 초전도 소자가 회복하는 시간의 변화를 나타낸 것이다. 인가전압의 증가로 인해 발생하는 사고전류의 크기가 커지므로 초전도 소자가 받은 전력량이 증가하여 회복되는 시간이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 2선 지락사고시의 것과 동일하게 첫 번째 사고와 세 번째 사고에서 각 상의 회복시간은 발생하는 사고주기가 같으므로 거의 같은 시간에 회복되는 것을 확인할 수 있으며, 두 번째 사고는 사고주기가 7주기로 길지만 사고발생 시점의 차이로 인해 초전도 소자가 받은 전력량이 다른 사고때보다 적어 회복되는 시간이 적어진다는 것을 알 수 있다.

1800      2000

그림 3-22 3선 지락사고시 초전도 소자의 회복시간 특성곡선  
Fig. 3-22 Recovery curves of superconducting units during the triple line-to-ground fault

IV      480V

그림 3-23 3선 지락사고시 인가전압에 따른 초전도 소자의 회복시간  
추이곡선

Fig. 3-23 Recovery time changing curves of superconducting units according to applied voltage during the triple line-to-ground fault

## C. 3상 변압기형 초전도 한류기의 사고유형별 과도해석

### 1. 과도해석법

전력계통에서 발생하는 사고는 불평형 사고와 평형 사고로 구분된다. 불평형 사고는 1선이나 2선 지락 및 단락사고이고 평형 사고는 3선 지락 및 단락사고이다. 이러한 사고들의 고장을 해석하기 위해 일반적으로 대칭좌표법(symmetrical components calculus)을 많이 사용한다. 초전도 한류기에 흐르는 각 상의 사고전류를 영상전류( $I_0$ ), 정상전류( $I_1$ ), 역상전류( $I_2$ )로 분해하여 계산함으로써 실제의 불평형 사고를 해석한다. 각 상에 흐르는 사고전류( $I_{FCL-R}$ ,  $I_{FCL-S}$ ,  $I_{FCL-T}$ )는 벡터 오퍼레이터  $a$ 를 이용하여 다음 식 (19)와 같은 대칭분(sequence component) 전류로 분해할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{FCL-R} \\ I_{FCL-S} \\ I_{FCL-T} \end{pmatrix} \quad (19)$$

여기서,  $a = 1\angle 120 = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $a^2 = 1\angle 240 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $1+a+a^2=0$

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{3}(I_{FCL-R} + a^2 I_{FCL-R} + a I_{FCL-R}) = 0 \\ I_1 &= \frac{1}{3}(I_{FCL-R} + a^3 I_{FCL-R} + a^3 I_{FCL-R}) = I_a \\ I_2 &= \frac{1}{3}(I_{FCL-R} + a^4 I_{FCL-R} + a^2 I_{FCL-R}) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

정상상태의 전력망에는  $120^\circ$ 의 위상차를 갖는 3상의 전류( $I_{FCL-R}$ ,  $I_{FCL-S} = a^2 \cdot I_{FCL-R}$ ,  $I_{FCL-T} = a \cdot I_{FCL-R}$ )가 흐르게 된다. 그러므로 정상 상태에서 전력시스템에 흐르는 선로전류에 의해 대칭분 전류(sequence current)는 다음 식 (20)과 같이 계산된다.

영상전류( $I_0$ )는 각 상별로 같은 크기와 위상을 갖는 단상전류로서 통신선에 전자유도장해를 일으키게 된다. 정상전류( $I_1$ )는 평형 3상 교류전류로서 전원과 같은 상회전 방향으로 발생하며, 전동기의 회전토크를 발생시키는 전류이다. 그러므로 부하에 공급되는 평상시의 전류는 정상전류를 포함하고 있다. 이와 반대로 전원과 반대방향의 3상 교류전류인 역상전류( $I_2$ )는 전동기를 제동하는 역할을 수행하여 출력을 감소시키게 된다.

초전도 한류기가 적용된 전력계통에서 사고가 발생하면 사고전류로 인해 켄치된 초전도 소자에서 발생하는 저항에 의해 사고전류는 제한된다. 이로 인해 상전류(phase current)로 구성된 대칭분 전류도 줄어들 것으로 예상된다. 이것은 불평형 사고가 발생한 전력망의 전류 불평형률(current unbalance factor)을 줄여주게 된다.

## 2. 변압기형 초전도 한류기의 사고유형별 과도해석

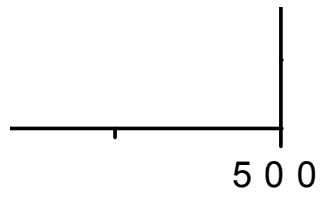
### a. 1선 지락사고

중성선을 갖는 변압기형 초전도 한류기의 과도해석을 위해 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기와 1·2차 권선의 비에 따라 비교하였다. 그림 3-24는 중성선의 유무에 따라 1선 지락사고 발생시 대칭분 전류를 나타낸 곡선이다. 각 상에 흐르는 사고전류로 계산되는 대칭분 전류는 중성선의 유무에 따라 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 변압기형 초전도 한류기에서 2차 권선과 초전도 소자 사이에 연결되는 중성선은 초전

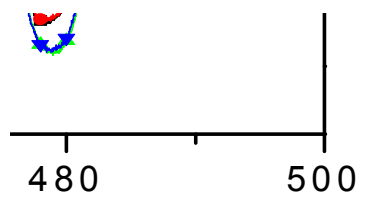
도 소자의 켄치특성을 개선시키는 역할을 수행한다. 초전도 소자가 불균형적으로 켄치되는 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기와 초전도 소자를 균형적으로 켄치시키는 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기가 서로 동일한 사고전류로 제한한다면 대칭분 전류들은 동일하게 계산된다. 그러나 초전도 한류기의 용량이 증대되면 초전도 한류기들의 사고전류 제한율이 서로 상이하게 되어 대칭분 전류들이 달라질 것이다.

그림 3-24(a)에서 1·2차 권선비가 줄어들수록 영상전류( $I_0$ )가 작아진다는 것을 확인할 수 있다. 2차 권선수가 작아질수록 초전도 한류기의 사고전류 제한율이 좋아진다. 그러므로 대칭성분 중 영상전류 또한 줄어들게 된다. 1선 지락사고 발생시 영상전류는 인근 통신선에 전자유도장해를 발생시키는 요인으로 작용한다. 초전도 한류기가 없다면 발생하는 사고전류에 의해 큰 전자유도장해가 발생하지만, 초전도 한류기가 적용되면 사고전류를 제한함으로써 전자유도장해가 줄어든다는 것을 확인할 수 있다.

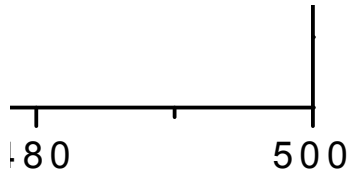
그림 3-24(b)와 (c)는 1선 지락사고시 정상전류( $I_1$ )와 역상전류( $I_2$ )의 크기를 나타낸 곡선으로써 2차 권선의 비가 줄어들수록 작아진다는 것을 확인할 수 있다. 정상전류는 전동기에 회전토크를 발생시키는 전류로서 평상시 6A가 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 사고가 발생하면 초기에 정상전류가 18.3A로, 역상전류가 11.7A로 증가한다. 그림 3-25에서도 확인할 수 있듯이 정상상태에서의 정상전류와 역상전류의 차가 사고상태에서의 것보다 0.6A 정도가 적다. 이것은 정상상태에서 전동기의 토크를 발생시키는 정상전류가 사고가 발생하더라도 0.6A로 적게 증가한다는 것을 의미한다. 1선 지락사고로 인해 사고가 발생하는 동안 부하인 전동기의 회전토크에는 거의 영향없이 안정적인 전동기 운전이 가능하다는 것이다.



(a) Zero sequence current



(b) Positive sequence current



(c) Negative sequence current

그림 3-24 1선 지락사고시 변압기형 SFCL의 대칭전류 곡선  
 Fig. 3-24 Sequence current curves of a transformer-type SFCL during the single line-to-ground fault

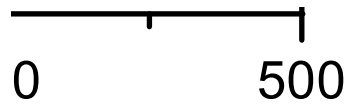
그림 3-25 1선 지락사고시 정상전류와 역상전류의 차

Fig. 3-25 Difference between positive and negative sequence currents during the single line-to-ground fault

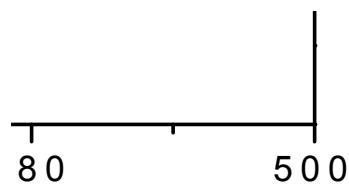
1선 지락사고와 같은 과도상태가 전력망에서 발생하여 발전기와 전동기의 상차각의 차이가  $90^\circ$  이상으로 증가하면 발전기는 탈조하게 된다. 그러나 초전도 한류기가 전력망에 투입됨으로서 사고가 발생하더라도 전동기에 회전토크를 발생시키는 정상전류를 거의 변화시키지 않는다면 발전기의 탈조를 예방할 수 있어, 전력망의 과도 안정도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### b. 2선 지락사고

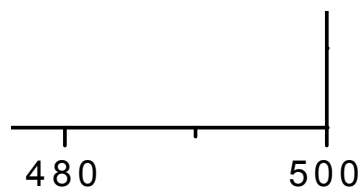
그림 3-26은 2선 지락사고시 변압기형 초전도 한류기의 중성선 유무와 1·2차 권선의 턴수비에 따라 대칭분 전류를 나타낸 곡선이다. 중성선이 있는 변압기형 초전도 한류기의 영상전류는 사고초기 중성선이 없는 경우와 거의 비슷하게 흐르지만, 반주기 이후 2A 정도로 작게 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 또한 1·2차 권선의 턴수비가 동일한 경우 영상전



(a) Zero sequence current



(b) Positive sequence current



(c) Negative sequence current

그림 3-26 2선 지락사고시 SFCL의 대칭전류 곡선

Fig. 3-26 Sequence current curves of a transformer-type SFCL during the double line-to-ground fault



류의 크기가 동일하여 턴수비와 영상전류와는 상관없이 없다는 것을 예측할 수 있다. 1선 지락사고의 것과 비교하여 2선 지락사고의 경우 사고초기 6A의 영상전류가 흘러 인근 통신선으로의 전자유도장해가 더 작아진다는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-26(b)와 (c)는 2선 지락사고시 정상전류( $I_1$ )와 역상전류( $I_2$ )의 크기를 나타낸 곡선으로서 2차 권선의 비에 상관없이 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 2선 지락사고시 정상전류는 평상시에 6A가 흘러 1선 지락사고의 경우와 동일하며, 사고발생 후 정상전류는 약 60A로, 역상전류는 약 35A로 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

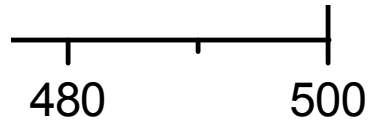
2선 지락사고시 정상전류와 역상전류의 차를 나타내는 그림 3-27과 같이 두 전류의 차가 사고발생 전보다 증가한 만큼 부하인 전동기의 회전토크가 증가한다는 것을 예측할 수 있다. 1선 지락사고의 경우 정상전류와 역상전류의 차가 사고전·후에 거의 변화가 없다는 결과와 비교할 때 2선 지락사고시 전력망의 과도 안정도가 1선 지락사고의 경우보다 저하될 것으로 예상할 수 있다.

그림 3-27 2선 지락사고시 정상전류와 역상전류의 차

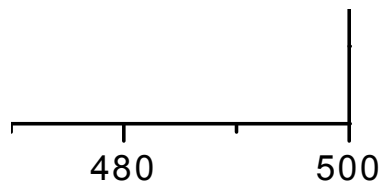
Fig. 3-27 Difference between positive and negative sequence currents during the double line-to-ground fault

### c. 3선 지락사고

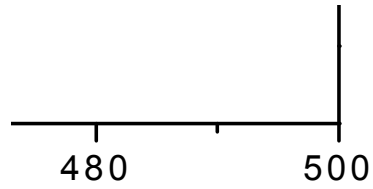
그림 3-28은 3선 지락사고가 발생한 경우 변압기형 초전도 한류기의 중성선 유무와 1·2차 권선의 턴수비에 따른 대칭분 전류를 나타낸 곡선이다. 3선 지락사고는 평형사고이기 때문에 영상전류( $I_0$ )가 거의 흐르지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 이는 인근 통신선에 전자유도장해를 발생시키지 않는다는 것을 의미한다. 그러나 사고발생 초기에 80A의 정상전류( $I_1$ )와 19A의 역상전류( $I_2$ )가 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 정상전류와 역상전류와의 차이는 그림 3-29에 나타내었다. 정상전류와 역상전류와의 차이는 부하인 전동기의 회전토크를 결정짓는 요인으로 그 차가 커질수록 전동기의 회전력은 증가하게 된다. 3선 지락사고의 경우 그 전류차가 63A로 계산되어 2선 지락사고의 28A보다 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 전동기의 회전력 증가로 인해 발전기와 전동기의 상차각이 증가하게 되며, 90° 이상으로 증가될 경우 발전기가 탈조하게 된다. 전력망의 사고로 인해 발생하는 사고전류를 초전도 한류기가 제한하지 않는다면 정상전류와 역상전류와의 차이는 더욱 증가하여 발전기의 탈조로 인해 전력망의 과도 안정도가 저하될 것으로 예상된다.



(a) Zero sequence current



(b) Positive sequence current



(c) Negative sequence current

그림 3-28 3선 지락사고시 SFCL의 대칭전류 곡선

Fig. 3-28 Sequence current curves of a transformer-type SFCL during the triple line-to-ground fault

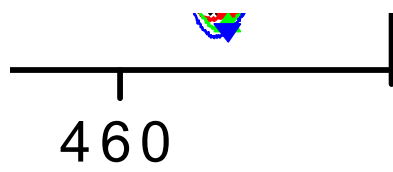


그림 3-29 3선 지락사고시 정상전류와 역상전류의 차

Fig. 3-29 Difference between positive and negative sequence currents during the triple line-to-ground fault

## IV. 3상 변압기형 초전도 한류기의 전력망 적용

### A. 전력망 적용을 위한 전력망 모델 구성

현재의 전력망은 복잡한 네트워크식 구조로 구성되어 있다. 다양한 전력기기들이 설치된 전력망으로 초전도 한류기가 적용될 때 여러 형태의 고장에 대한 동작 신뢰도가 확보되어야 하며, 전력기기 및 보호 계전기와의 보호협조 또한 확보되어야 한다. 초전도 한류기를 전력망에 적용하기 위한 실계통 적용연구는 현재 배전시스템을 기준으로 수행되고 있다.

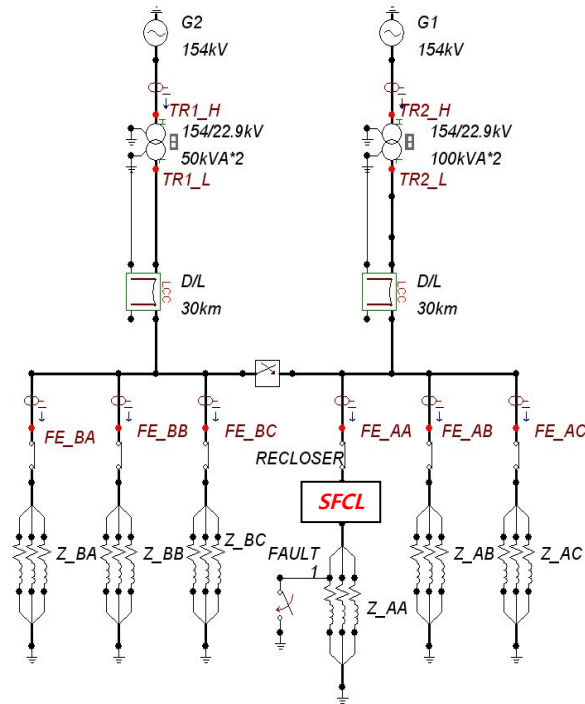


그림 4-1 22.9kV급 배전망 모델

Fig. 4-1 22.9kV class distribution power system model

표 4-1 피더의 파라미터

Table 4-1 Parameters of Feeders

Feeder	Parameter	Value
Fe_AA ~ Fe_AC	Resistance [ $\Omega$ ]	60
Fe_BA ~ Fe_BC	Inductance [mH]	0.0796

표 4-2 배전선로의 전력선 및 가공지선의 파라미터

Table 4-2 Parameters of power line and overhead earth line in the distribution power system

Parameter of Power Line	
Nominal sectional area [ $\text{mm}^2$ ]	ACSR 410
Inside Diameter [mm]	10.5
Outside Diameter [mm]	28.5
Conductive Resistance [ $\Omega/\text{km}$ ]	0.0686
Horizontal Distance [m]	4.29
Ground Clearance [m]	20.71
Overhead Ground Line	
Nominal sectional area [ $\text{mm}^2$ ]	ACSR 160
Inside Diameter [mm]	9.6
Outside Diameter [mm]	16
Conductive Resistance [ $\Omega/\text{km}$ ]	0.2981
Ground Clearance [m]	32.14

초전도 한류기와 전력망으로의 모의를 위해 EMTP/ATP를 이용하여 그림 4-1과 같이 154kV급 송전선로에서 6개의 피더로 전력을 공급하는 22.9kV급 배전선로를 구성하였다. 배전급 변압기의 1·2차 권선은 Y결선 되어 있으며 중성선의 접지 임피던스는  $0.5+j1.8\Omega$ 으로 설정하였다. 각 피더에 연결된 부하는 집중정수회로를 사용하여 표 4-1과 같은 파라미터로 구성하였다. 배전선로는 30km의 선로를 거쳐 각각의 피더로 공급되며, 완전연가를 통해 선로정수가 평행되도록 설정하였다. 배전선로 및 가공지선의 설정에 사용된 선로정수는 표 4-2와 같다.

그림 4-1과 같이 모델링된 전력망에서 FE\_AA의 선로에서 사고가 발생하였을 때 실제 전력망에서 사용하고 있는 재폐로 동작책무를 수행하는 리클로저 차단기를 사용하여 선로를 차단하였다. 재폐로 동작책무는 그림 4-2와 같이 설계하였다. 정상상태에서 선로에 지속적인 사고가 발생한 것으로 가정하고 재폐로 동작책무에 의해 5주기 이내에 차단기가 동작하고, 140msec 이후 다시 재폐로하여 5주기 동안 차단기가 동작한다. 또한 모의된 지락사고는 어떠한 피조물에 의한 사고로서 지락저항을  $1\Omega$ 으로 설정하였으며, 단락사고는 단락저항을  $10^{-6}\Omega$ 으로 설정하였다.

초전도 한류기는 사고가 발생하는 FE\_AA에 설치되어 있으며, 변압기형 초전도 한류기의 모델을 그림 4-3과 같이 모의하였다. 실험에서 사용된 변압기는 3상의 권선이 하나의 철심에 유도적으로 연결되어 있다. 그러므로 2상 이상에서 사고가 발생한 경우 사고상들과 건전상과의 상호 쇄교자속으로 인해 사고전류의 제한율이 저하되었다. 그러나 실제 전력계통에서 사용되고 있는 변압기는 주로 단상 변압기 3대를 이용한 사례가 많다. 이에 EMTP/ATP를 이용한 변압기형 초전도 한류기의 시뮬레이션에서는 단상 변압기 3대의 2차 권선에 각 상의 초전도 한류기가 연결되어 있다고 가정하여 변압기형 초전도 한류기를 설계하였다.

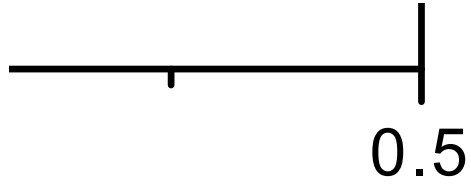


그림 4-2 차단기의 재폐로 동작책무

Fig. 4-2 Reclosing operational duty of power circuit breaker

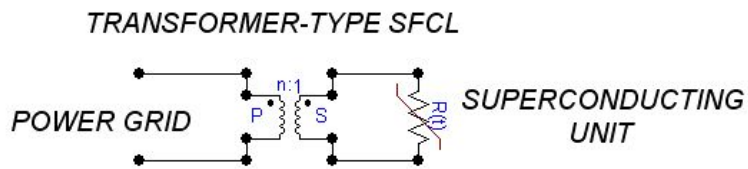


그림 4-3 변압기형 초전도 한류기의 모델

Fig. 4-3 Modeling of a transformer-type SFCL



변압기의 1·2차 권선비는 실험을 통해 얻은 데이터를 기초로 2:1로 하였으며, 중성선을 사용하기 때문에 동시 켜지는 초전도체의 특성을 고려하여 각 상의 초전도체는 하나의 가변저항으로 모의하였다. 모의된 초전도체의 저항은 실험을 통해 얻은 초전도체 저항으로부터 그림 4-4와 같이 모의하였다. 초전도체는 재폐로 동작책무에 의해 사고가 발생할 때마다 초전도 한류기가 동작하여 동일한 저항이 발생하도록 설정하였다.

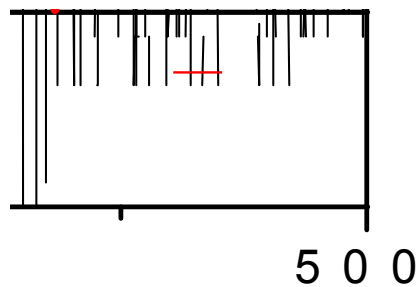


그림 4-4 초전도 소자에서 발생하는 저항 모의

Fig. 4-4 Modeling of resistance generated in a superconducting unit

## 1. 초전도 한류기의 모의 결과

배전 시스템으로의 적용 시뮬레이션을 위해 설계된 변압기형 초전도 한류기와 실험결과와의 비교를 위해 그림 4-5와 같이 지락사고의 회로를 구성하였다. 초전도 한류기에 사용된 변압기는 단상으로서 각 상의 권선이 독립적이다. 즉, 실험을 통해 2상 이상에서의 사고 발생시 사고상간의 유도결합이 성립되지 않으므로 각 상의 사고전류는 사고상의 초전도 한류기에 의해서만 제한된다. 400V가 인가된 3상 회로에서 R상 1선 지락사고가 발생한 경우 그림 4-6(a)과 같이 각 상의 사고전류가 406A로 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러나 변압기형 초전도 한류기를 투입한 경우 1선 지락사고시 사고전류는 40A로 제한되었다. 이는 앞의 1선 지락사고 실험 결과와 거의 같은 사고전류 제한특성이라는 것을 알 수 있다.

또한 2선 지락사고가 발생한 경우 사고상인 R상과 S상의 사고전류는 각각 40A와 -68A로 제한되었다. 실험을 통해 제한된 사고전류는 각각 130A와 -124A이었다. 이는 하나의 철심을 사용하므로 사고상간의 상호 유도작용에 의해 자속이 서로 상쇄되기 때문이다. 그러나 단상 변압기 3대를 사용하여 각 상의 초전도 한류기가 개별적으로 동작하였을 경우 사고상간의 상호 유도작용이 없으므로 사고전류의 제한율이 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

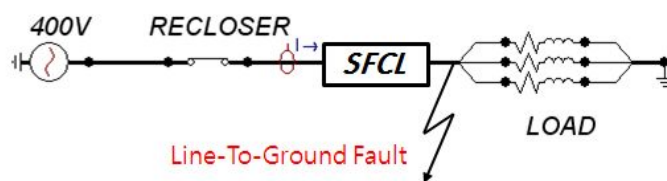
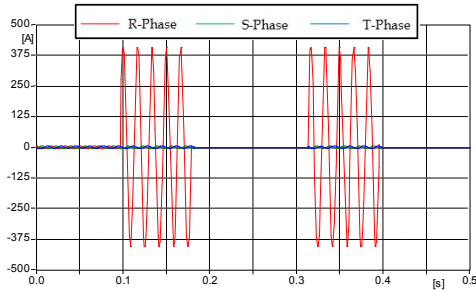
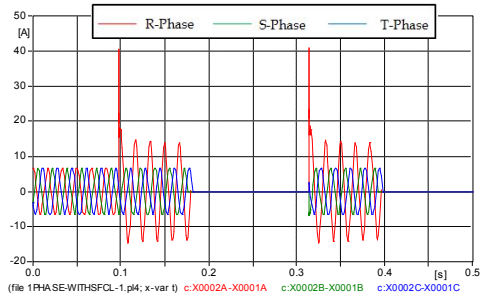


그림 4-5 지락사고시 변압기형 초전도 한류기 모델

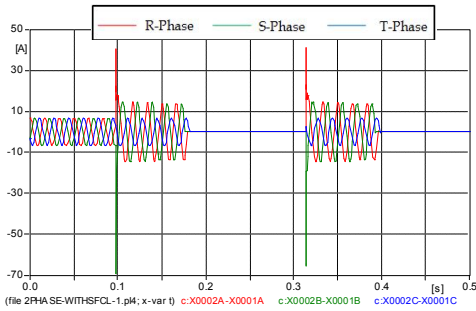
Fig. 4-5 Modeling of a transformer-type SFCL during the line-to-ground fault



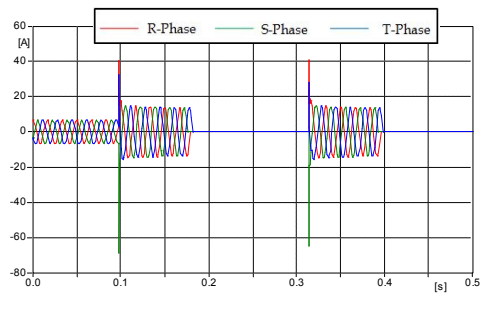
(a) Power system without the SFCL during the single line-to-ground fault



(b) Power system with the SFCL during the single line-to-ground fault



(c) Power system with the SFCL during the double line-to-ground fault



(d) Power system with the SFCL during the triple line-to-ground fault

그림 4-6 사고의 유형과 변압기형 초전도 한류기의 유무에 따른 사고전류 곡선

Fig. 4-6 Fault current curves according to the fault types and with or without a transformer-type SFCL

또한 3선 지락사고의 경우 각 상의 사고전류는 38.5, -69, 30.5A로 제한되었다. 2선 지락사고와 동일하게 각 상의 변압기형 초진도 한류기는 개별적으로 동작하므로 실험을 통한 제한된 사고전류보다 더 저감된 제한율을 갖게 된다. 이로써 사고상간의 상호 유도작용을 무시하고 각 상의 초진도 한류기를 단상 변압기로 구성한 모델이 사고유형에 따라 사고전류를 제한한다는 것을 확인하였다.

## B. 초전도 한류기가 적용된 전력망 시뮬레이션

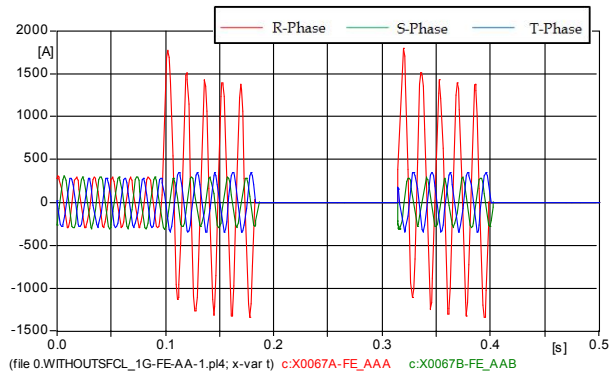
### 1. 1선 지락사고

그림 4-1의 22.9kV급 배전망에서 FE\_AA에 초전도 한류기가 설치되지 않은 경우 구간별 선로전류를 그림 4-7에 나타내었다. 사고는 계통에서 가장 많이 발생하는 1선 지락사고를 모의하였다. 선로전류의 모의 구간은 변압기형 초전도 한류기가 설치된 FE\_AA와 사고가 발생하지 않은 FE\_AC, 그리고 TR2의 2차 권선에 흐르는 선로전류를 측정하였다. 초전도 한류기가 없는 경우 사고가 발생한 FE\_AA에는 1.77kA의 사고전류가 발생하였다. 그리고 타 선로인 FE\_AC에서는 사고상인 FE\_AA의 R상의 전류가 지락으로 인해 사고주기 동안 29A로 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 건전상의 피더는 불평형의 선로전류가 유입된다. 그리고 TR2의 2차 권선에 흐르는 전류는 턴수비에 따른 FE\_AA ~ FE\_AC에 흐르는 전류의 합으로서 R상에 1.83kA가 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 초전도 한류기가 설치되지 않은 현재의 전력망에서는 지락사고시 사고가 발생한 피더의 선로전류가 급증하고 있으며, 건전한 피더 또한 불평형 전류가 사고주기 동안 흐르게 된다. RECLOSER는 보호계전기가 이러한 사고전류를 감지하여 재폐로 동작책무에 의해 동작하게 된다.

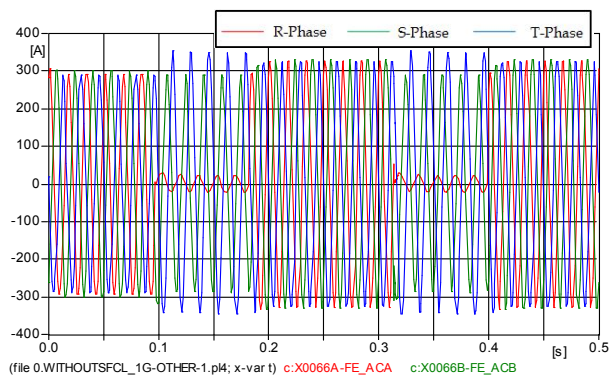
변압기형 초전도 한류기가 FE\_AA에 설치된 경우 그림 4-8과 같이 사고가 발생한 피더의 전류가 550A로 약 70%가 저감된다는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 전력망에 변압기형 초전도 한류기를 설치할 경우 사고전류의 저감으로 인해 건전한 피더인 FE\_AC의 선로전류도 257A가 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 정상전류인 293A의 약 13%가 저감된 전류로서 이 피더에 연결된 삼상 부하의 출력에는 거의 변화가 없게 된다. 또한 TR2의 2차 권선에 흐르는 사고상의 전류는 정상상태의

879A에서 1,062A로 증가하게 된다. 이는 정상상태의 전류와 비교하여 약 20%의 증가율로서 보호계전기의 설정치 이하로 초전도 한류기가 없는 경우의 110%보다 훨씬 적은 증가율이다. 사고가 발생하면 그 피더에 설치된 보호계전기의 동작에 의해 차단기가 동작하여 사고 피더가 차단된다. 그러나 초전도 한류기가 없는 경우 사고전류는 정상전류의 약 600%가 증가한다. 그러므로 사고 피더에 있는 차단기의 차단용량 초과로 주보호 장치인 차단기가 차단실패를 할 수 있으며, 이로 인해 후비보호 장치인 변압기의 2차측에 설치된 차단기가 동작하게 된다. 이럴 경우 전력망의 정전범위는 증가하여 건전한 피더가 정전범위 내에 들어가게 되어 전력망의 과도안정도가 떨어지게 된다. 그러나 초전도 한류기가 설치된 경우 사고 피더의 선로전류가 정상전류의 약 190%가 증가하게 되어 차단기의 차단용량을 증대시킬 수 있게 된다. 이로부터 전력망의 정전구간을 최소화 시킬 수 있으며, 이는 계통의 과도안정도를 증대시킬 수 있다는 것을 의미하게 된다.

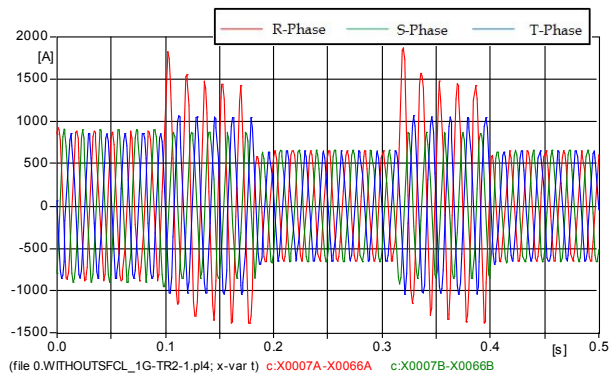
그림 4-9와 10은 1선 지락사고시 각 구간별 전류를 대칭분 전류인 영상( $I_0$ ), 정상( $I_1$ ), 역상 전류( $I_2$ )로 RMS로서 나타낸 것이다. 초전도 한류기가 없는 경우 사고피더인 FE\_AA에서는 최대  $280A_{rms}$ 의 영상전류가 흐르며 또한 FE\_AC와 TR2에도 각각  $90A_{rms}$ 와  $162A_{rms}$ 가 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 정상시에는 3상 평형으로 인해 흐르지 않는 영상전류는 지락사고로 인해 3상이 불평형 상태로 되면 인근 통신선에 전자유도장해를 유발시키므로, 인근 통신선은 차폐효과가 뛰어난 케이블을 사용하거나, 전력망과 멀리 떨어지도록 해야 한다. 그러나 초전도 한류기가 설치될 경우 FE\_AA에는  $52A_{rms}$ 로 약 5.4배 적은 영상전류가 흐르며, FE\_AC와 TR2에도 각각  $12A_{rms}$ 와  $31A_{rms}$ 로 작아진다는 것을 확인할 수 있다. 이는 초전도 한류기의 설치로 인해 통신선과의 유도장해를 유발시키는 영상전류를 저감시킬 수 있다는 것을 의미한다.



(a) Fault currents in the FE\_AA



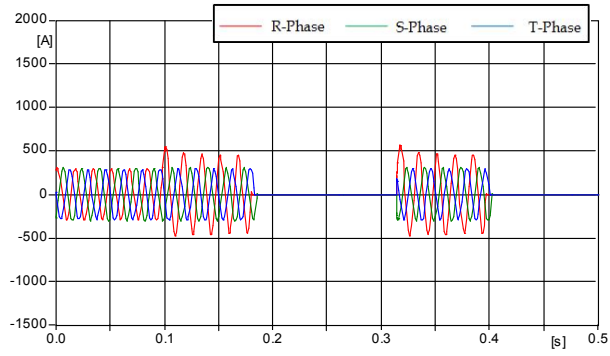
(b) Line currents in the FE\_AC



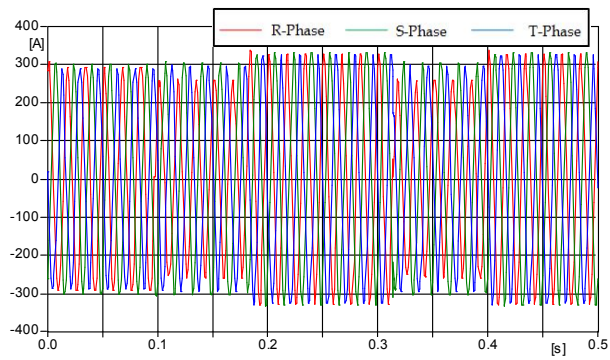
(c) Line currents in the TR2

그림 4-7 초전도 한류기가 없는 경우 구간별 전류 곡선(1선 지락사고)

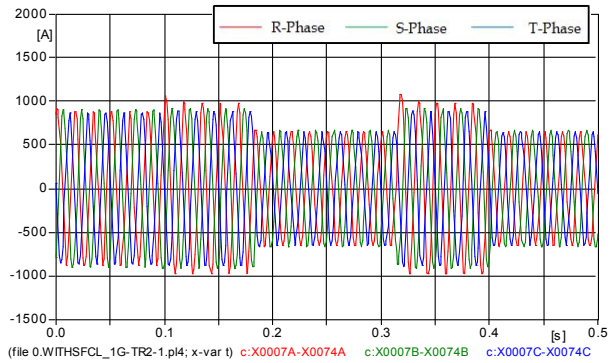
Fig. 4-7 Current curves of three sections in power system without the SFCL (the single line-to-ground fault)



(a) Fault currents in the FE\_AA



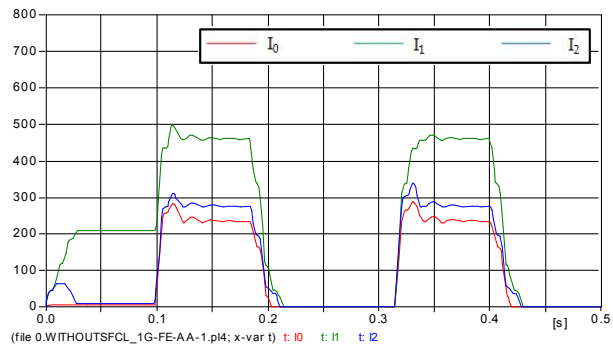
(b) Line currents in the FE\_AC



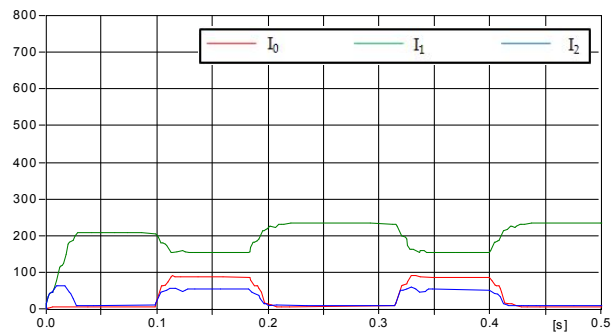
(c) Line currents in the TR2

그림 4-8 초전도 한류기가 있는 경우 구간별 전류 곡선(1선 지락사고)  
 Fig. 4-8 Current curves of three sections in power system with the SFCL (the single line-to-ground fault)

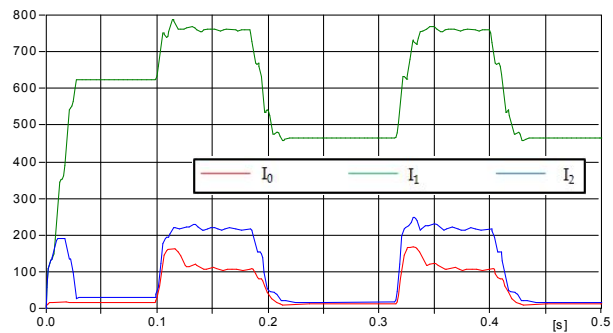




(a) Sequence currents in the FE\_AA (RMS)



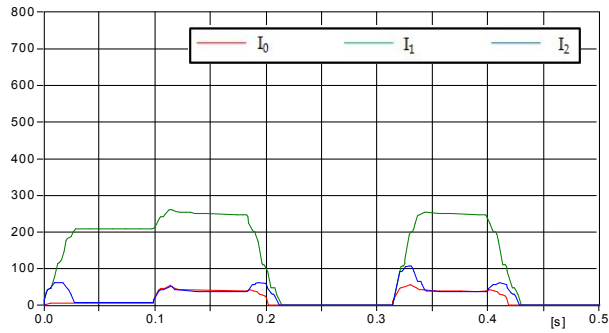
(b) Sequence currents in the FE\_AC (RMS)



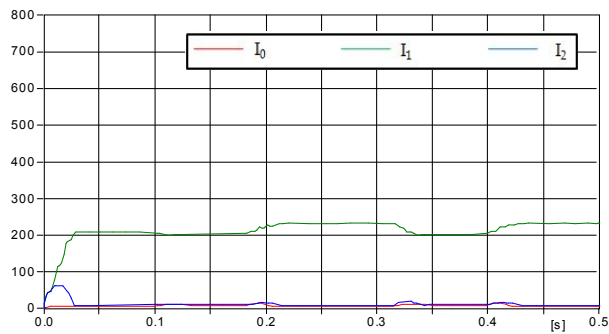
(c) Sequence currents in the TR2 (RMS)

그림 4-9 초전도 한류기가 없는 경우 구간별 대칭분 전류곡선  
(1선 지락사고)

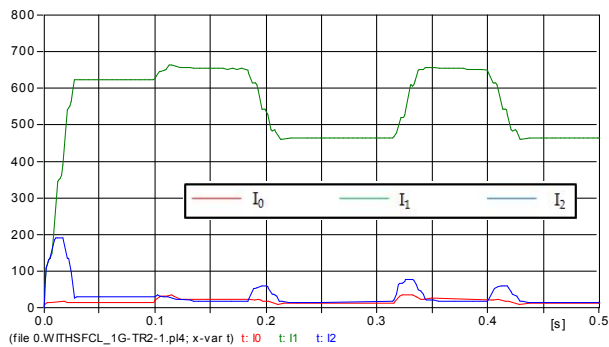
Fig. 4-9 Sequence current curves of three sections in power system  
without the SFCL (the single line-to-ground fault)



(a) Sequence currents in the FE\_AA (RMS)



(b) Sequence currents in the FE\_AC (RMS)



(c) Sequence currents in the TR2 (RMS)

그림 4-10 초전도 한류기가 있는 경우 구간별 대칭분 전류곡선  
(1선 지락사고)

Fig. 4-10 Sequence current curves of three sections in power system with the SFCL (the single line-to-ground fault)

3장에서 언급한 것처럼 정상전류( $I_1$ )는 전동기의 회전토크를 발생시키고, 역상전류( $I_2$ )는 전동기의 제동토크를 발생시키는 전류이다. 즉, 정상상태에서의 정상전류와 역상전류와의 차가 사고로 인해 변화된다면 전동기의 회전토크가 변화한다는 것을 의미하게 된다. 1선 지락사고로 인한 구간별 정상전류와 역상전류를 비교하여 표 4-3에 정리하였다. 초전도 한류기가 없는 경우 사고피더인 FE\_AA에서 정상전류와 역상전류의 사고 전·후를 비교하여  $14A_{rms}$ 가 감소하였다. 그러나 초전도 한류기가 있는 경우  $13A_{rms}$ 가 증가하였다. 이는 사고전류의 감소로 인해 정상전류 및 역상전류가 동시에 감소되기 때문이다. 그러나 사고 전·후 정상전류와 역상전류의 차가 거의 변화가 없으며, 초전도 한류기가 없는 경우는 전동기의 회전토크가 약간 감소하고, 초전도 한류기가 설치된 경우에는 약간 증가한다는 것을 알 수 있다.

그러나 건전한 FE\_AC는 초전도 한류기가 없는 경우 정상전류와 역상전류의 차가  $88A_{rms}$ 로 나타난 반면, 초전도 한류기가 설치된 경우  $11A_{rms}$ 로 그 차가 크게 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 초전도 한류기가 없는 경우 이 차로 인해 전동기의 회전토크가 크게 감소한다는 것을 알 수 있다. 이로 인해 전력을 공급하는 발전기와 전동기와의 상차각이 크게 벌어져 발전기가 탈조될 수 있는 요인이 된다. 그러나 초전도 한류기가 설치된 경우 그 차이가 거의 없어 전력망의 과도안정도에 변화가 없다는 것을 확인할 수 있다.

TR2에서의 정상전류와 역상전류와의 차는 초전도 한류기가 없는 경우  $29A_{rms}$ , 초전도 한류기가 설치된 경우  $33A_{rms}$ 이었다. 이로부터 초전도 한류기의 사고전류 제한동작에 의해 정상전류 및 역상전류의 변화가 크게 없어 전력망의 과도안정도가 증대될 것으로 사료된다.

표 4-3 1선 지락사고시 구간별 정상전류와 역상전류의 비교

Table 4-3 Comparison between the positive and negative sequence currents of three section during the single line-to-ground fault

구간	초전도 한류기가 없는 경우						초전도 한류기가 있는 경우					
	I <sub>1</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>1</sub> -I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>1</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>1</sub> -I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]	
	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후
FE_AA	208	493	9	308	199	185	208	263	9	51	199	212
FE_AC	208	160	9	49	199	111	208	201	9	13	199	188
TR2	624	789	27	221	597	568	624	663	27	33	597	630

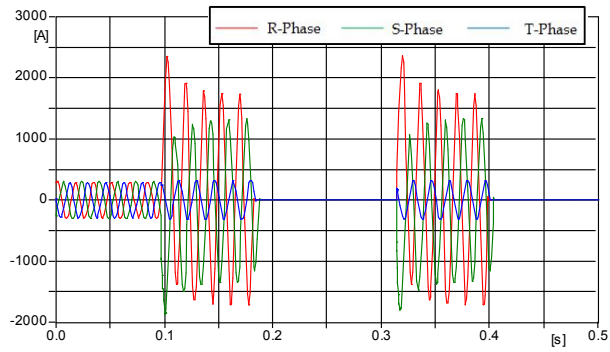
## 2. 2선 지락사고

초전도 한류기가 설치되지 않은 전력망에서 2선 지락사고가 발생하면 그림 4-11과 같이 사고 피더인 FE\_AA에서 최대 2.35kA의 사고전류가 발생한다. FE\_AC에서는 사고주기 동안 38A로 줄어들며, TR2의 2차 권선에는 2.43kA의 전류가 흐르게 된다. 정상상태에서 FE\_AA에 흐르는 294A로 약 8배의 사고전류가 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 초전도 한류기가 설치되면 사고전류는 약 580A로 저감되어 정상전류의 2배까지 증가하고, 사고전류의 약 75%가 저감된다는 것을 그림 4-12와 비교하여 확인할 수 있다. 또한 건전한 피더인 FE\_AC에는 약 271A가 흘러 정상전류의 약 10%만 줄어든다는 것을 알 수 있다. 전체 피더에 전력을 공급하는 TR2의 2차 권선에는 초전도 한류기의 설치로 인해 1.1kA의 사고전류가 흘러 정상전류의 약 2.6배의 전류가 사고 주기동안

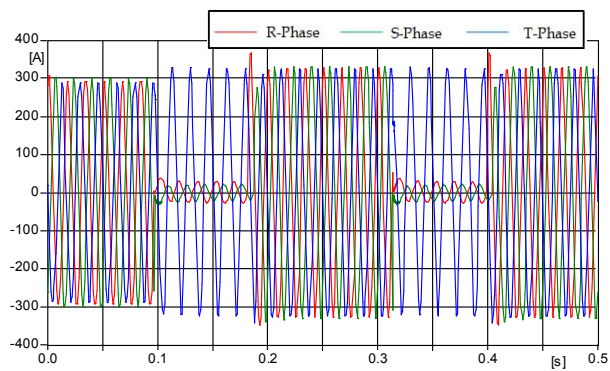
호르게 된다. 이로부터 초전도 한류기의 설치로 인해 사고피더에서 발생하는 사고전류를 75%로 저감함으로써 건전한 피더 및 변압기에 흐르는 전류의 크기가 크게 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이는 각 피더를 보호하는 보호계전기의 설정값을 줄여 절연 등급을 낮출 수 있으며, 또한 차단기의 차단용량을 증대시킬 수 있는 효과를 동시에 얻을 수 있다.

그림 4-13과 14는 2선 지락사고시 초전도 한류기의 유무에 따라 구간별 대칭분 전류를 RMS로 표현한 곡선이다. 초전도 한류기가 없는 경우 2선 지락사고로 인해 사고피더에서는  $200A_{rms}$ 의 영상전류( $I_0$ )가 흐르게 된다. 또한 건전한 피더인 FE\_AC에도  $72A_{rms}$ 가 흐르며, TR2의 2차 권선에는  $81A_{rms}$ 의 영상전류가 흐른다. 이 영상전류로 인해 인근 통신선에 전자유도 장애를 유발시키게 된다. 그러나 초전도 한류기의 설치로 인해 사고피더인 FE\_AA에서는  $44A_{rms}$ 로, 건전한 피더인 FE\_AC에서는  $15A_{rms}$ 로 TR2의 2차 권선에는  $9A_{rms}$ 로 감소된다는 것을 확인할 수 있다. 사고가 발생한 피더의 사고전류 저감으로 인해 전력망 전체의 영상전류는 저감되어 유도장애가 줄어들게 된다.

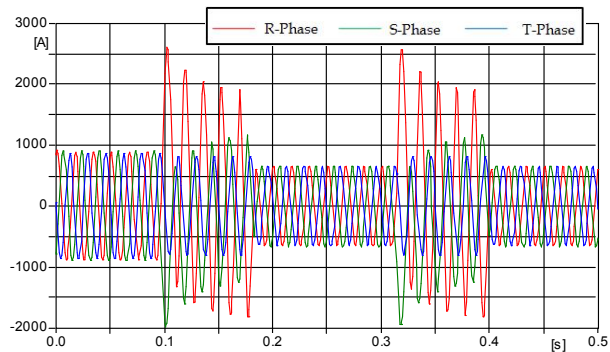
사고전 전력망의 각 피더에 연결된 전동기 부하는  $208A_{rms}$ 의 정상전류( $I_1$ )와 9A의 역상전류( $I_2$ )의 차에 의해 회전토크가 발생한다. 그러나 초전도 한류기가 없는 경우 2선 지락사고 발생으로 인해 사고 피더의  $I_1$  및  $I_2$ 가 증가하게 되어 그 차이가 정상시보다 약 1.8배 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 건전한 피더인 FE\_AC에서는 사고후  $I_1$ 와  $I_2$ 의 차이가 9.5배 감소하게 된다. 1선 지락사고와는 다르게 사고피더의 차이가 크게 증가하고, 건전한 피더의 차이가 크게 감소한다는 것을 알 수 있다. 그러나 TR2의 2차측은 약 1.1배 증가한다. 이로 인해 발전기와의 상차각 차이에는 크게 변화가 없다는 것을 알 수 있다.



(a) Fault currents in the FE\_AA



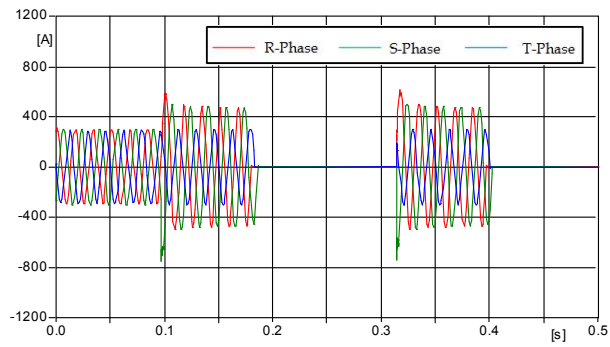
(b) Line currents in the FE\_AC



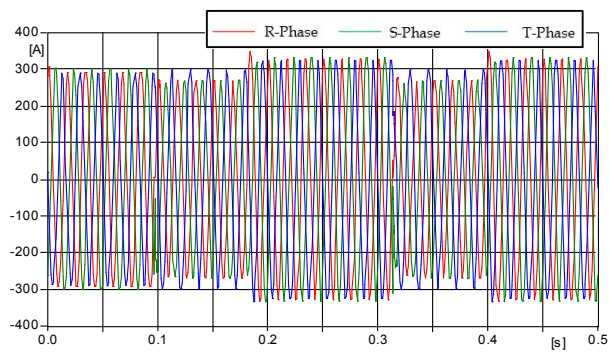
(c) Line currents in the TR2

그림 4-11 초전도 한류기가 없는 경우 구간별 전류 곡선 (2선 지락사고)

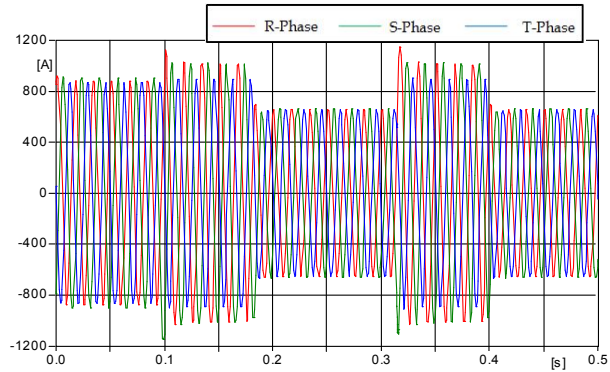
Fig. 4-11 Current curves of three sections in power system without the SFCL (the double line-to-ground fault)



(a) Fault currents in the FE\_AA

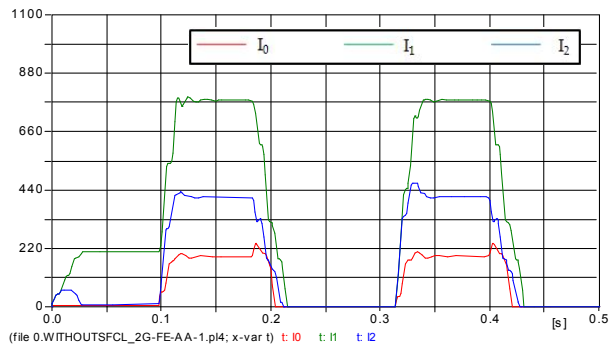


(b) Line currents in the FE\_AC

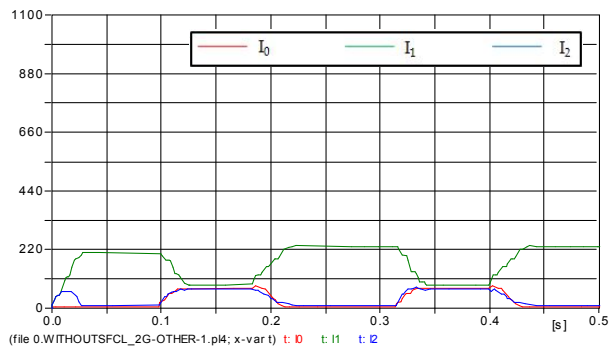


(c) Line currents in the TR2

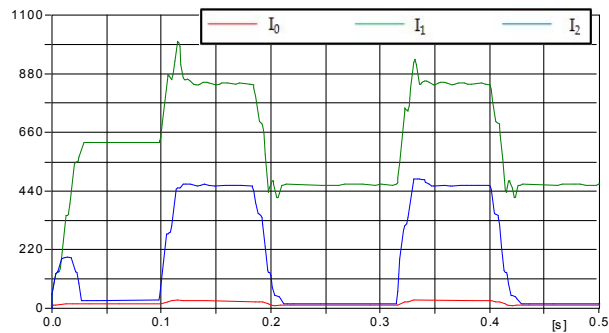
그림 4-12 초전도 한류기가 있는 경우 구간별 전류 곡선 (2선 지락사고)  
 Fig. 4-12 Current curves of three sections in power system with the SFCL (the double line-to-ground fault)



(a) Sequence currents in the FE\_AA (RMS)



(b) Sequence currents in the FE\_AC (RMS)

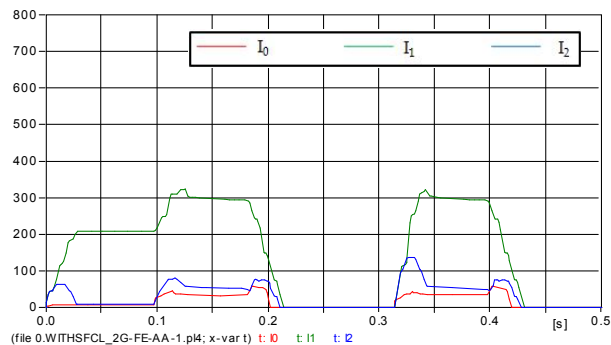


(c) Sequence currents in the TR2 (RMS)

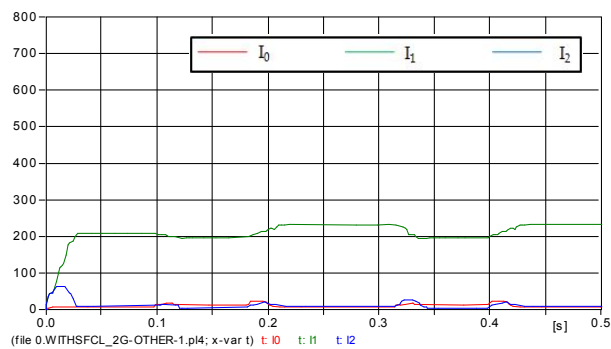
그림 4-13 초전도 한류기가 없는 경우 구간별 대칭분 전류(RMS) 곡선  
(2선 지락사고)

Fig. 4-13 Sequence current curves of three sections in power system  
without the SFCL (the double line-to-ground fault)

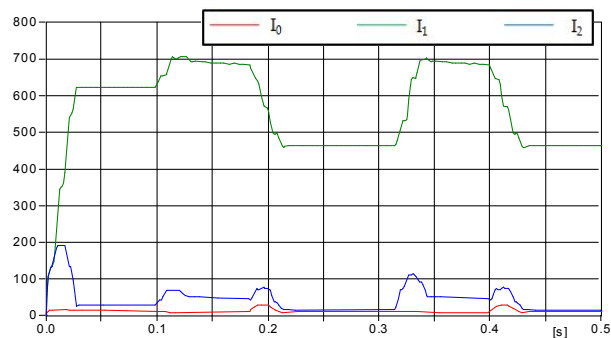




(a) Sequence currents in the FE\_AA (RMS)



(b) Sequence currents in the FE\_AC (RMS)



(c) Sequence currents in the TR2 (RMS)

그림 4-14 초전도 한류기가 있는 경우 구간별 대칭분 전류(RMS) 곡선  
(2선 지락사고)

Fig. 4-14 Sequence current curves of three sections in power system  
with the SFCL (the double line-to-ground fault)

표 4-4 2선 지락사고시 구간별 정상전류와 역상전류의 비교

Table 4-4 Comparison between the positive and negative sequence currents of three section during the double line-to-ground fault

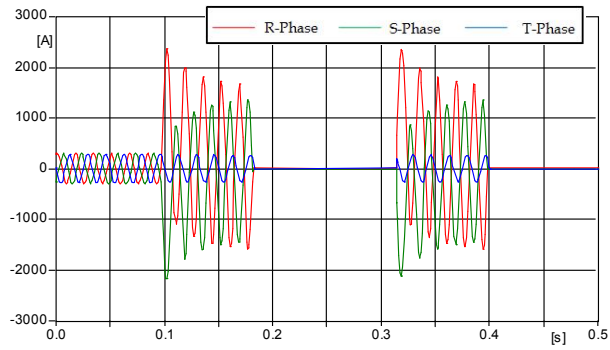
구간	초전도 한류기가 없는 경우						초전도 한류기가 있는 경우					
	I <sub>1</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>1</sub> -I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>1</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>1</sub> -I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]	
	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후
<b>FE_AA</b>	208	781	9	429	199	352	208	309	9	78	199	231
<b>FE_AC</b>	208	90	9	69	199	21	208	199	9	12	199	187
<b>TR2</b>	624	1,007	27	357	597	650	624	703	27	70	597	633

반면 초전도 한류기가 설치될 경우 사고피더에서 I<sub>1</sub>과 I<sub>2</sub>의 차가 사고 전보다 약 1.2배 증가하여 초전도 한류기가 없는 경우보다 약 1.5배 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 건전한 피더에서도 사고 전과 크게 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 이로부터 TR2에서는 초전도 한류기가 없는 경우보다 I<sub>1</sub>과 I<sub>2</sub>의 차이가 더 줄어든다는 것을 알 수 있다.

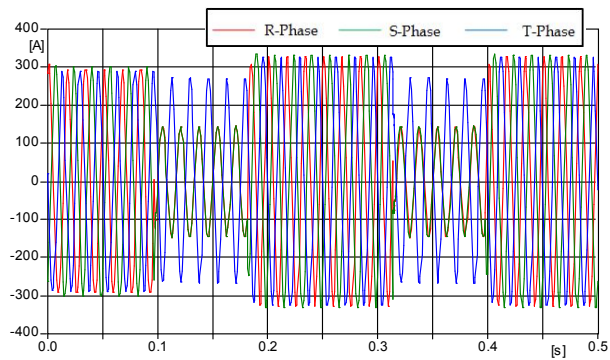
### 3. 2선 단락사고

2선 단락사고는 2선 이상이 합선되는 사고로서 이때 단락저항을  $10^{-6}$  Ω으로 설정하여 모의하였다. 그림 4-15는 초전도 한류기가 없는 전력망에서 2선 단락사고가 발생한 경우 구간별 전류의 곡선을 나타낸 것이다. 이 사고로 인해 사고전류는 293A에서 최대 2.37kA까지 약 8배 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 건전한 피더에서는 단락사고로 인해 사고상의 전류가 142A로 동일하게 된다. TR2의 2차 권선에는 사고피더에 의해 최대 2.6kA까지 전류가 증가한다. 그러나 초전도 한류기가 설치된 전력망에서는 그림 4-16과 같이 사고전류가 585A로 정상전류의 2배까지 감소된다. 또한 건전한 피더는 정상전류보다 약 10%가 감소되며, TR2의 2차 권선은 30%가 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 2선 단락사고는 2선 지락사고보다 더 가혹한 사고이다. 그림에도 불구하고 2선 지락사고와 거의 동일한 사고전류 제한을 하게 되어 전력망의 과도안정도를 유지한다는 것을 확인할 수 있다.

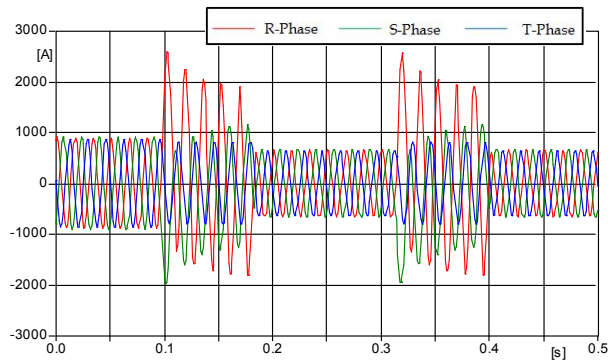
그림 4-17과 18은 2선 단락사고시 구간별 전류를 대칭분 전류의 RMS 값으로 표현한 곡선이다. 사고가 발생한 FE\_AA는 초전도 한류기가 없는 경우  $699A_{rms}$ 의 정상전류와  $553A_{rms}$ 의 역상전류가 흐른다. 그러나 초전도 한류기의 설치로 인해  $321A_{rms}$ 와  $81A_{rms}$ 의 정상 및 역상전류가 흘러 사고 전·후 정상전류와 역상전류의 차이가  $53A_{rms}$ 에서  $32A_{rms}$ 로 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 전동기 부하의 회전토크가 사고전과 비교하여 변화가 적어진다는 것을 의미한다. 또한 건전한 피더인 FE\_AC에서는 초전도 한류기가 없는 경우 정상 및 역상전류가 동일해진다는 것을 확인할 수 있다. 이는 2선 단락으로 인해 건전한 피더에 흐르는 전류가 동일한 크기로 되기 때문이다. 이것은 정상 및 역상전류의 차가  $0A_{rms}$ 로 되면서 전동기 부하의 회전토크를 상실하게 된다는 것을 의미한다. 그러나 초전도 한류기가 설치되면 사고 피더에서 발생하는 초전도 한류기의 임피던스로 인해 건전 피더와의 임피던스 차이가 줄어들게



(a) Fault currents in the FE\_AA



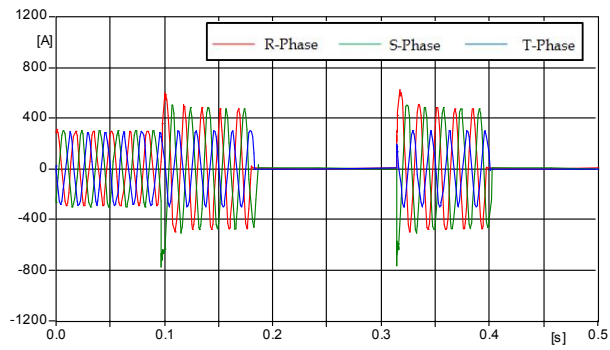
(b) Line currents in the FE\_AC



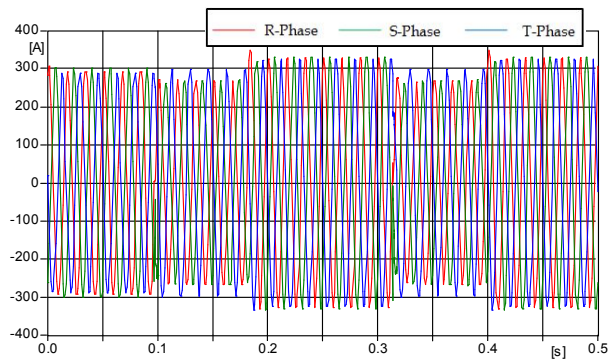
(c) Line currents in the TR2

그림 4-15 초전도 한류기가 없는 경우 구간별 전류 곡선 (2선 단락사고)

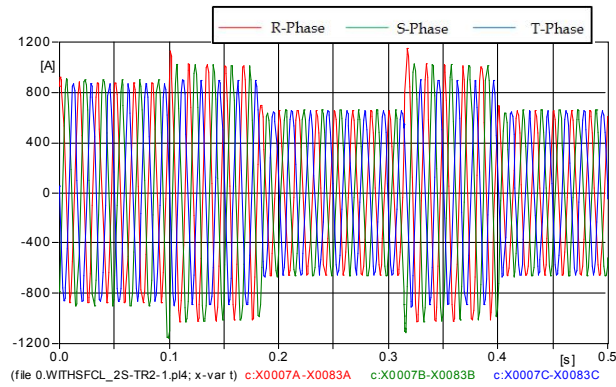
Fig. 4-15 Current curves of three sections in power system without the SFCL (the double line-to-line fault)



(a) Fault currents in the FE\_AA

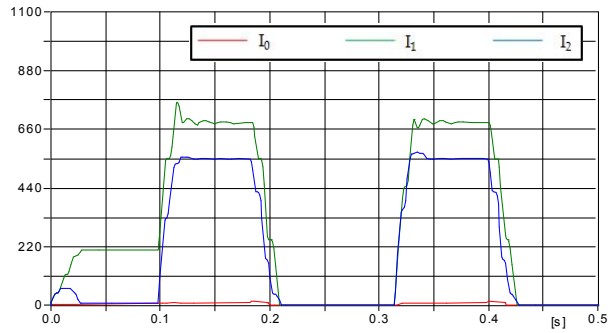


(b) Line currents in the FE\_AC

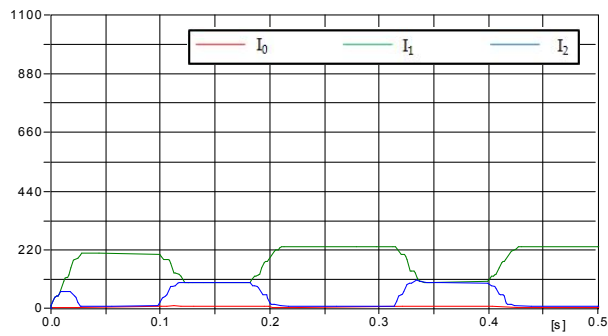


(c) Line currents in the TR2

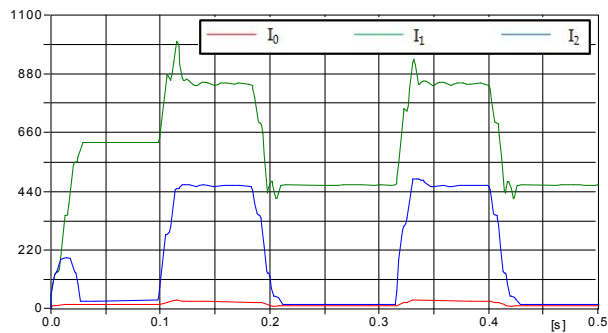
그림 4-16 초전도 한류기가 있는 경우 구간별 전류 곡선 (2선 단락사고)  
 Fig. 4-16 Current curves of three sections in power system with the SFCL (the double line-to-line fault)



(a) Sequence currents in the FE\_AA (RMS)



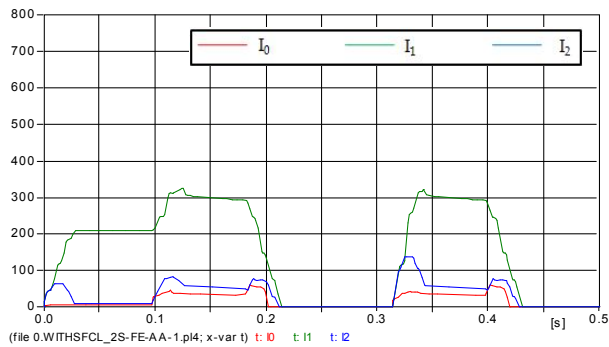
(b) Sequence currents in the FE\_AC (RMS)



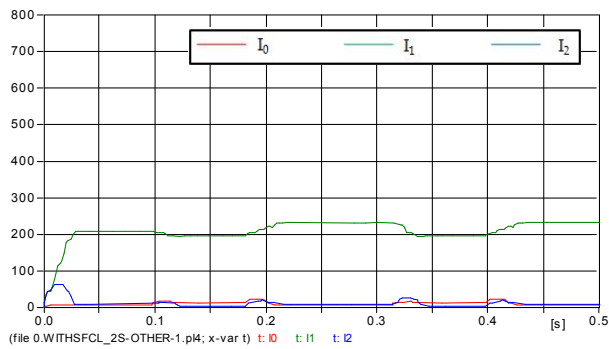
(c) Sequence currents in the TR2 (RMS)

그림 4-17 초전도 한류기가 없는 경우 구간별 대칭분 전류(RMS) 곡선  
(2선 단락사고)

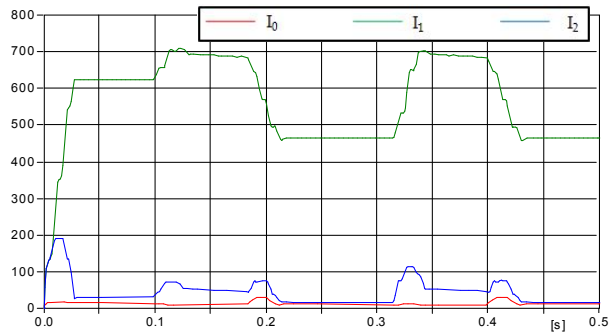
Fig. 4-17 Sequence current curves of three sections in power system  
without the SFCL (the double line-to-line fault)



(a) Sequence currents in the FE\_AA (RMS)



(b) Sequence currents in the FE\_AC (RMS)



(c) Sequence currents in the TR2 (RMS)

그림 4-18 초전도 한류기가 있는 경우 구간별 대칭분 전류(RMS) 곡선  
(2선 단락사고)

Fig. 4-18 Sequence current curves of three sections in power system  
with the SFCL (the double line-to-line fault)

표 4-5 2선 단락사고시 구간별 정상전류와 역상전류의 비교

Table 4-5 Comparison between the positive and negative sequence currents of three section during the double line-to-line fault

구간	초전도 한류기가 없는 경우						초전도 한류기가 있는 경우					
	I <sub>1</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>1</sub> -I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>1</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]		I <sub>1</sub> -I <sub>2</sub> [A <sub>rms</sub> ]	
	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후
FE_AA	208	699	9	553	199	146	208	312	9	81	199	231
FE_AC	208	97	9	97	199	0	208	195	9	2	199	193
TR2	624	860	27	466	597	394	624	707	27	68	597	639

되어 정상 및 역상전류의 차이가 줄어들게 된다. 이는 사고전의 차이와 크게 변화되지 않아 전동기 부하의 회전 토크가 변화되지 않는다는 것을 의미한다.

사고가 발생한 피더와 건전한 피더를 갖는 TR의 2차 권선에 흐르는 정상 및 역상전류의 사고 전·후 차이는 초전도 한류기의 설치유무에 따라 203A<sub>rms</sub>와 42A<sub>rms</sub>가 발생하였다. 초전도 한류기의 설치로 인해 사고 피더와 건전한 피더의 임피던스 차이가 줄어들면서 정상전류와 역상전류의 차이가 줄어들게 되며, 이는 전동기 부하의 회전토크의 변화를 결정하는 중요한 요인이 된다. 즉, 초전도 한류기의 설치로 인해 사고 피더 및 건전한 피더의 정상 및 역상전류의 차이가 줄어들게 되며, 전동기 부하의 회전토크의 변화가 줄어들어 전력망의 과도 안정도가 유지된다는 것을 의미한다.

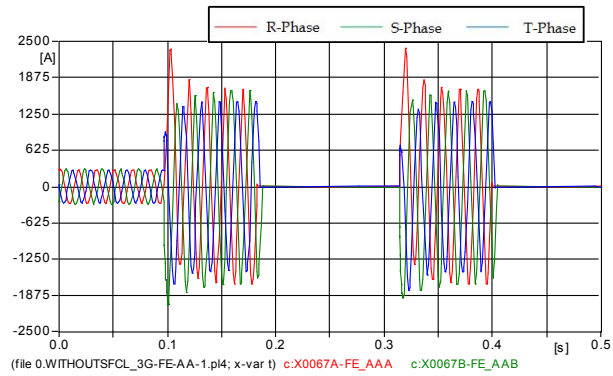


#### 4. 3선 지락사고

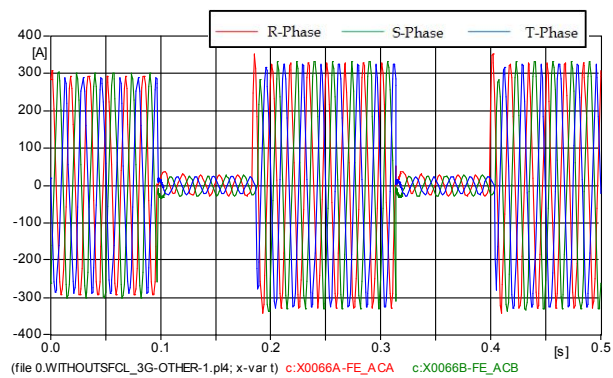
그림 4-19와 20은 평형사고인 3선 지락사고시 초전도 한류기의 유무에 따른 구간별 전류를 나타낸 곡선이다. 초전도 한류기가 설치되지 않은 전력망에서 3선 지락사고가 발생한 피더인 FE\_AA의 사고전류는 293A에서 최대 2.36kA까지 약 8배 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 건전한 피더인 FE\_AC의 전류는 24A로 약 12배가 감소하고, TR\_2의 2차 권선에 흐르는 전류는 2.43kA로 약 2.8배가 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러나 FE\_AA의 피더에 초전도 한류기를 설치함으로써 3선 지락사고시 FE\_AA의 사고전류는 578A로 정상전류의 약 2배가 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 초전도 한류기의 사고전류제한 동작으로 인해 건전한 피더인 FE\_AC의 전류는 271A로 정상시 전류보다 약 1.1배 감소한다. 또한 TR\_2의 전류는 1.1kA로 정상시 전류인 879A보다 약 1.3배 증가한다는 것을 그림 4-20에서 확인할 수 있다. 이는 3선 지락사고시 발생하는 사고전류를 약 75% 저감시킴으로서 건전상 및 TR\_2의 전류를 감소시켜 전력망의 과도 안정도가 향상된다는 것을 확인할 수 있다.

그림 4-21과 22는 3선 지락사고시 초전도 한류기의 유무에 따른 대칭분 전류를 RMS로 표현한 곡선이다. 초전도 한류기가 없는 경우 3선 지락사고는 평형사고이므로  $I_0$ 가  $31A_{rms}$ 로 거의 발생하지 않는다. 그러나 사고 종료시점에서 약  $120A_{rms}$ 의  $I_0$ 가 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 또한 FE\_AC와 TR\_2에 흐르는  $I_0$ 도 거의 없다는 것을 확인할 수 있다. 초전도 한류기가 설치된 전력망 또한 3상 평형 사고이므로  $I_0$ 가 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다.

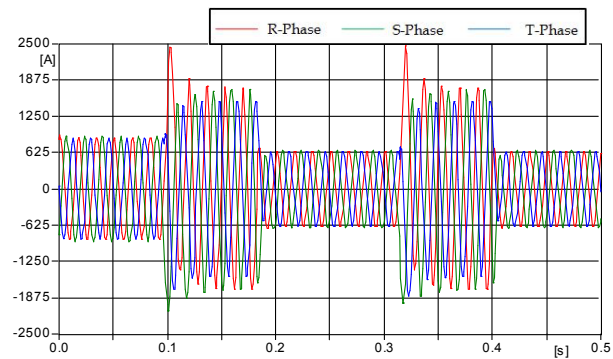
반면  $I_1$ 과  $I_2$ 는 그 차이가 사고전과 비교하여 크게 발생한다는 것을 표 4-6에서 알 수 있다. 초전도 한류기가 없는 경우 FE\_AA에서는  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차가  $830A_{rms}$ 로 사고전보다 약 5.2배 증가하게 된다. 이는 평형사고로 인해  $I_1$ 이 급격히 증가하기 때문이다. 반면 건전한 피더인 FE\_AC는 전



(a) Fault currents in the FE\_AA



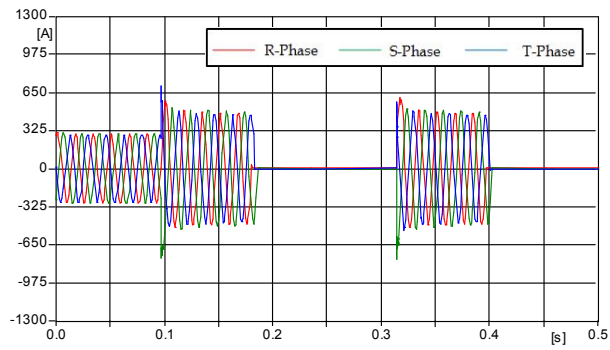
(b) Line currents in the FE\_AC



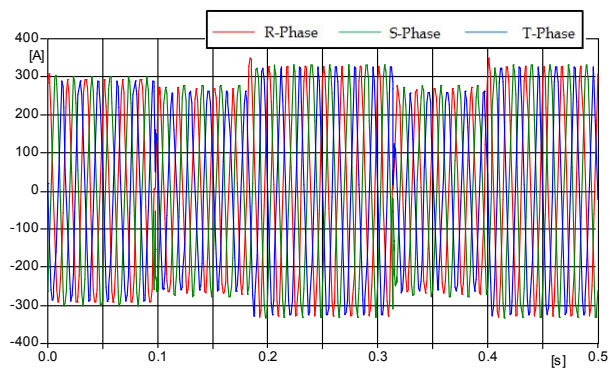
(c) Line currents in the TR2

그림 4-19 초전도 한류기가 없는 경우 구간별 전류 곡선 (3선 지락사고)

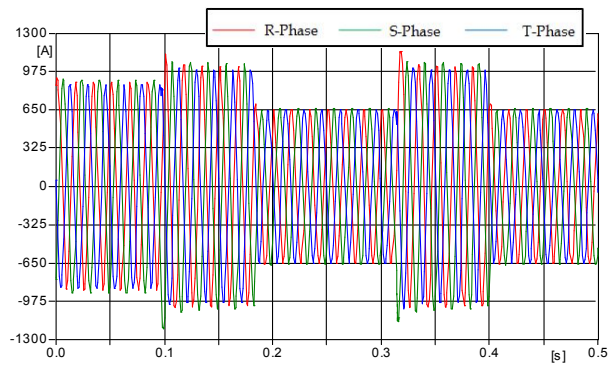
Fig. 4-19 Current curves of three sections in power system without the SFCL (the triple line-to-ground fault)



(a) Fault currents in the FE\_AA

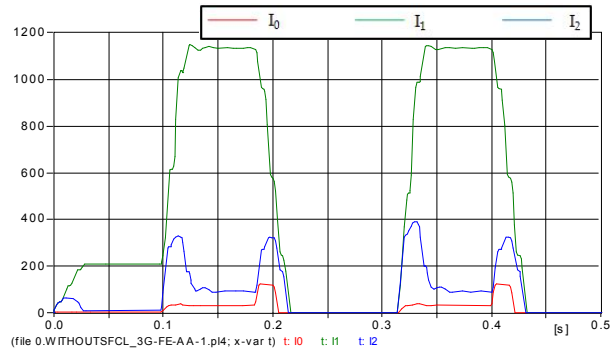


(b) Line currents in the FE\_AC

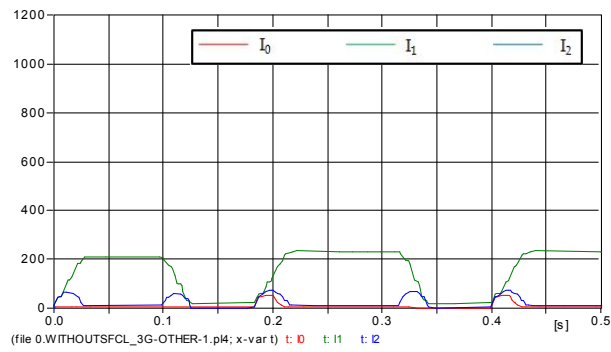


(c) Line currents in the TR2

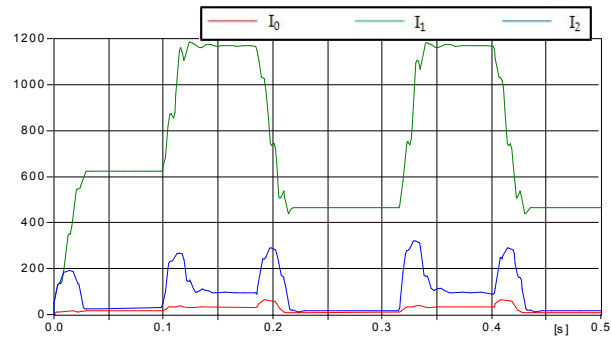
그림 4-20 초전도 한류기가 있는 경우 구간별 전류 곡선 (3선 지락사고)  
 Fig. 4-20 Current curves of three sections in power system with the SFCL (the triple line-to-ground fault)



(a) Sequence currents in the FE\_AA (RMS)



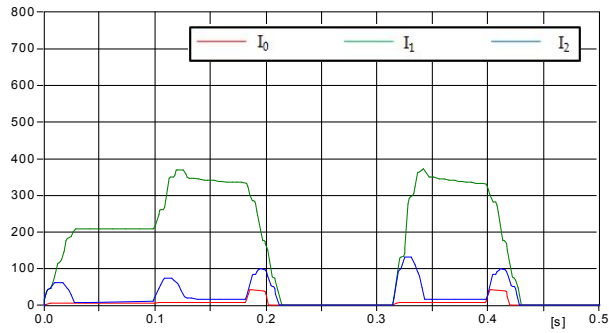
(b) Sequence currents in the FE\_AC (RMS)



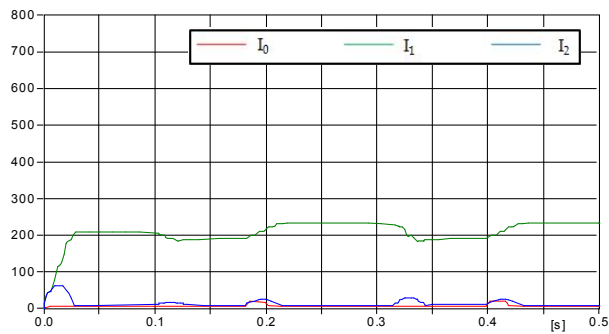
(c) Sequence currents in the TR2 (RMS)

그림 4-21 초전도 한류기가 없는 경우 구간별 대칭분 전류(RMS) 곡선  
(3선 지락사고)

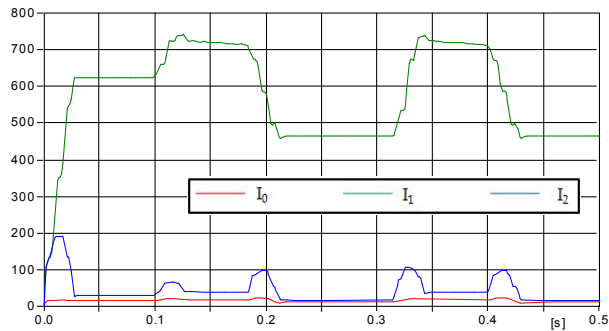
Fig. 4-21 Sequence current curves of three sections in power system  
without the SFCL (the triple line-to-ground fault)



(a) Sequence currents in the FE\_AA (RMS)



(b) Sequence currents in the FE\_AC (RMS)



(c) Sequence currents in the TR2 (RMS)

그림 4-22 초전도 한류기가 있는 경우 구간별 대칭분 전류(RMS) 곡선  
(3선 지락사고)

Fig. 4-22 Sequence current curves of three sections in power system  
with the SFCL (the triple line-to-ground fault)

표 4-6 3선 단락사고시 구간별  $I_1$ 과  $I_2$ 의 비교

Table 4-6 Comparison between the positive and negative sequence currents of three section during the triple line-to-ground fault

구간	초전도 한류기가 없는 경우						초전도 한류기가 있는 경우					
	$I_1$		$I_2$		$I_1-I_2$		$I_1$		$I_2$		$I_1-I_2$	
	[A <sub>rms</sub> ]		[A <sub>rms</sub> ]		[A <sub>rms</sub> ]		[A <sub>rms</sub> ]		[A <sub>rms</sub> ]		[A <sub>rms</sub> ]	
사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	
FE_AA	208	1,126	9	97	199	1,029	208	343	9	18	199	325
FE_AC	208	19	9	2	199	17	208	190	9	10	199	180
TR2	624	1,175	27	104	597	1,071	624	722	27	37	597	685

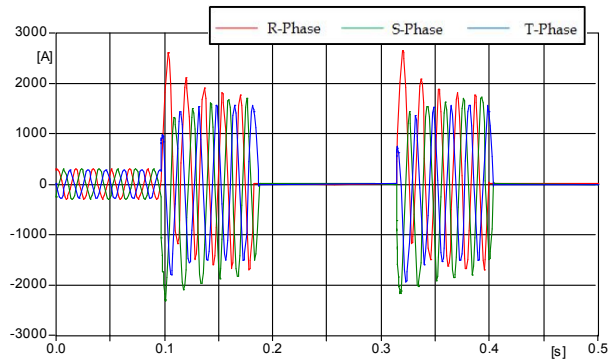
류의 급격한 감소로 인해 그 차이가 급격히 감소한다는 것을 알 수 있다. 그러나 초전도 한류기가 설치된 전력망에서는 초전도 한류기에서 발생하는 임피던스로 인해 FE\_AA의  $I_1$  및  $I_2$ 가 각각 1.6배와 2배로 증가하게 되어 그 차이가 325A<sub>rms</sub>만큼 발생하였다. 이는 정상상태에서의 차이와 비교하여 1.6배 증가한 것으로 초전도 한류기가 없는 전력망보다 약 2.5배 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한 건전한 피더인 FE\_AC는 정상상태와 사고상태에서의  $I_1$  및  $I_2$ 의 차이가 거의 발생하지 않는다. 이 또한 초전도 한류기에서 발생하는 임피던스로 인해 건전한 피더에 흐르는 전류가 사고전과 거의 차이가 발생하지 않기 때문이다. 이로 인해 TR2의 2차 권선에 흐르는 전류 또한 초전도 한류기가 없는 경우보다 약 1.6배 감소하게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 초전도 한류기의 설치로부터  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차가 감소하는 것은 3선 단락사고로 인해 전동기 부하와 발전기와의 상차각이 크게 발생하지 않으며, 전력망의 과도 안정도가 향상된다는 것을 의미하게 된다.

## 5. 3선 단락사고

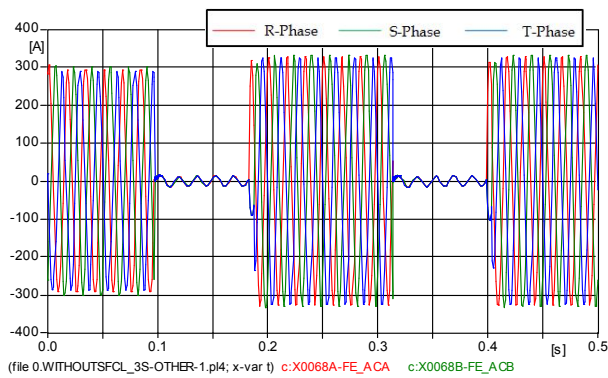
그림 4-23과 24는 3선 단락사고가 발생한 경우 초전도 한류기의 유무에 따라 구간별 흐르는 전류를 나타낸 곡선이다. 3선 단락사고는 전력망에 발생하는 사고 중 가장 사고전류가 크게 발생하는 평형사고이다. 초전도 한류기가 설치되지 않은 전력망에서 사고가 발생한 FE\_AA에 흐르는 전류는 2.6kA로 정상상태의 전류보다 8.8배 증가하는 것으로 지금까지 모의된 사고중 가장 크게 흐른다는 것을 알 수 있다. 또한 건전한 FE\_AC에서는 3상 평형사고이므로 3상이 12A로 동일한 전류가 흘러 정상시의 전류보다 24배 적은 전류가 흐른다는 것을 알 수 있다. TR2의 2차 권선에 흐르는 전류는 FE\_AA에서 발생한 사고로 인해 정상시 흐르는 879A보다 약 3배 큰 2.6kA가 흐른다.

반면 초전도 한류기가 설치된 전력망에서는 초전도 한류기의 사고전류 제한 동작에 의해 FE\_AA의 사고전류가 583A로 제한한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 3선 단락사고로 인해 발생하는 사고전류를 약 80%로 감소하는 전류제한 특성이다. 또한 초전도 한류기에서 발생하는 임피던스로 인해 건전한 FE\_AC의 전류를 271A로 증가시켜 사고전의 전류를 90% 이상 유지시킬 수 있게 한다. 그리고 TR2의 2차 권선에 흐르는 전류는 1.1kA로 감소시켜 초전도 한류기가 없는 전력망보다 2.3배 감소하게 된다. 가장 가혹한 사고로서 3선 단락사고는 전력용 차단기의 차단용량을 결정짓는 중요한 요인으로 초전도 한류기의 설치로 인해 차단기의 차단용량을 증대시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

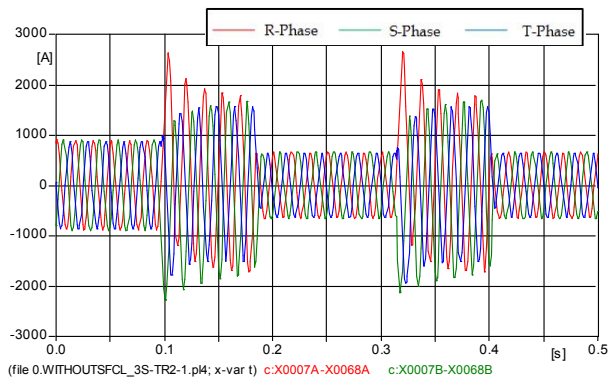
그림 4-25와 26은 3선 단락사고시 초전도 한류기의 유무에 따른 대칭분 전류를 RMS로 표현한 곡선이다. 초전도 한류기의 유무에 따라 사고전  $I_0$ 는 약  $5A_{rms}$ 가 동일하게 흐르게 된다. 그러나 사고가 발생한 FE\_AA에서  $9A_{rms}$ 의  $I_0$ 가 발생하게 된다. 또한 건전한 피더인 FE\_AC에서도  $9A_{rms}$ 가 발생한다. 그러나 초전도 한류기가 설치되지 않은 전력망의 TR2에서는 약  $28A_{rms}$ 가 발생하지만, 초전도 한류기가 설치된 경우에



(a) Fault currents in the FE\_AA



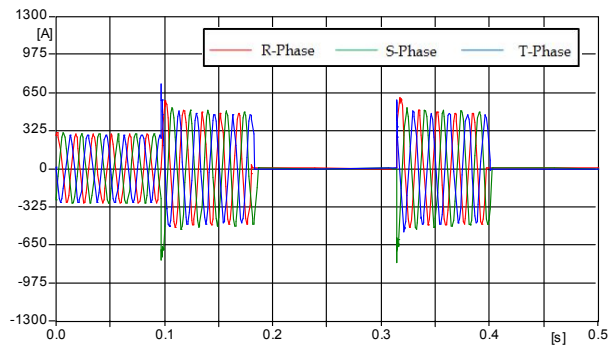
(b) Line currents in the FE\_AC



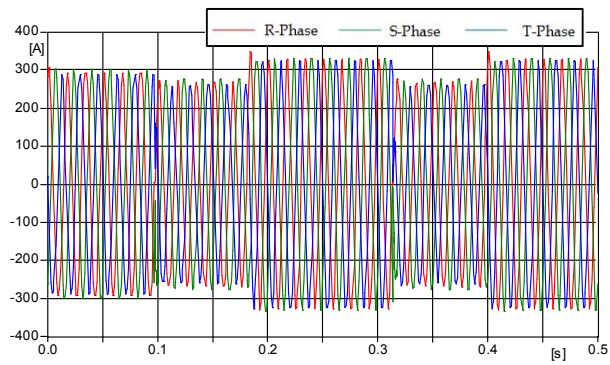
(c) Line currents in the TR2

그림 4-23 초전도 한류기가 없는 경우 구간별 전류 폭선 (3선 단락사고)  
 Fig. 4-23 Current curves of three sections in power system without the SFCL (the triple line-to-line fault)

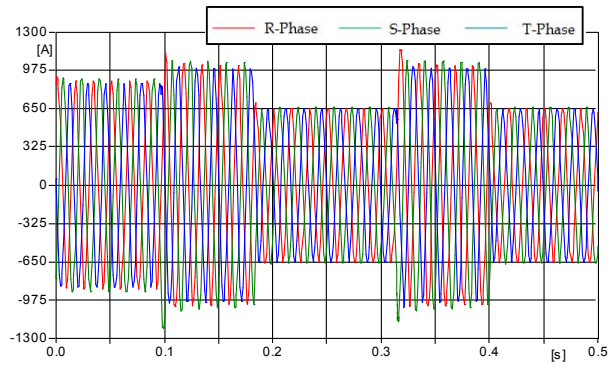




(a) Fault currents in the FE\_AA

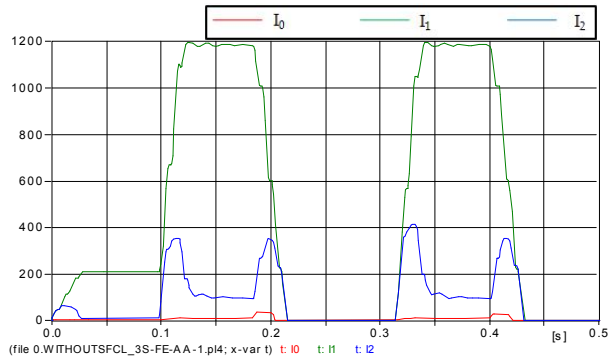


(b) Line currents in the FE\_AC

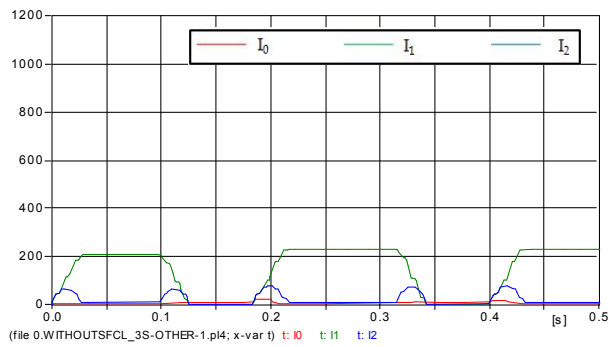


(c) Line currents in the TR2

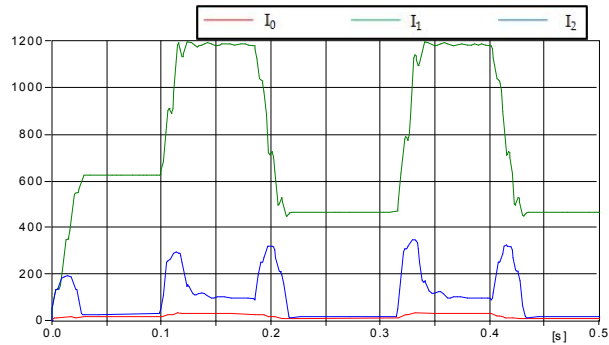
그림 4-24 초전도 한류기가 있는 경우 구간별 전류 곡선 (3선 단락사고)  
 Fig. 4-24 Current curves of three sections in power system with the SFCL (the triple line-to-line fault)



(a) Sequence currents in the FE\_AA (RMS)



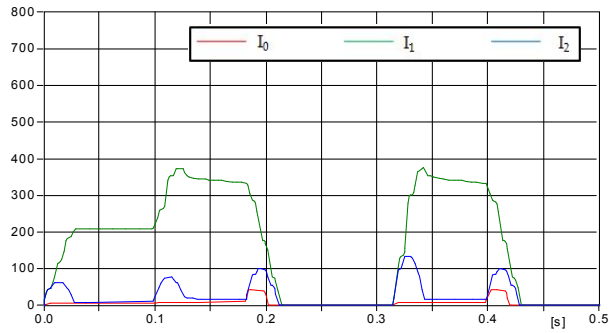
(b) Sequence currents in the FE\_AC (RMS)



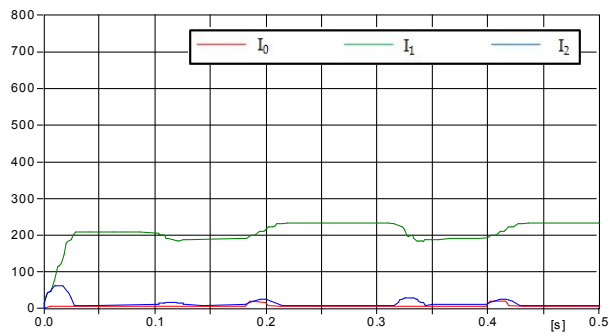
(c) Sequence currents in the TR2 (RMS)

그림 4-25 초전도 한류기가 없는 경우 구간별 대칭분 전류(RMS) 곡선  
(3선 단락사고)

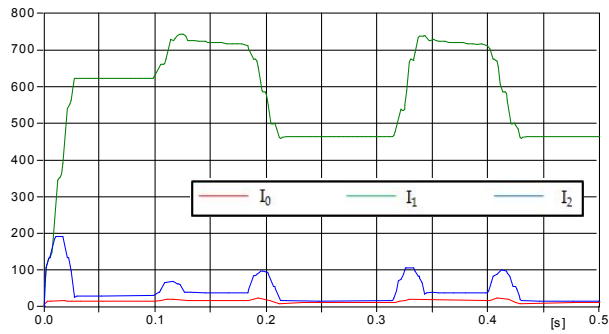
Fig. 4-25 Sequence current curves of three sections in power system  
without the SFCL (the triple line-to-line fault)



(a) Sequence currents in the FE\_AA (RMS)



(b) Sequence currents in the FE\_AC (RMS)



(c) Sequence currents in the TR2 (RMS)

그림 4-26 초전도 한류기가 있는 경우 구간별 대칭분 전류(RMS) 곡선  
(3선 단락사고)

Fig. 4-26 Sequence current curves of three sections in power system  
with the SFCL (the triple line-to-line fault)

표 4-7 3선 단락사고시 구간별  $I_1$ 과  $I_2$ 의 비교

Table 4-7 Comparison between the positive and negative sequence currents of three section during the triple line-to-line fault

구간	초전도 한류기가 없는 경우						초전도 한류기가 있는 경우					
	$I_1$		$I_2$		$I_1-I_2$		$I_1$		$I_2$		$I_1-I_2$	
	[A <sub>rms</sub> ]		[A <sub>rms</sub> ]		[A <sub>rms</sub> ]		[A <sub>rms</sub> ]		[A <sub>rms</sub> ]		[A <sub>rms</sub> ]	
	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후	사 고 전	사 고 후
FE_AA	208	1,180	9	99	199	1,081	208	343	9	17	199	326
FE_AC	208	1	9	1	199	0	208	190	9	10	199	180
TR2	624	1,179	27	100	597	1,079	624	723	27	37	597	686

는 약 17A<sub>rms</sub>로 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 3선 단락사고는 평형 사고로서  $I_0$ 가 거의 발생하지 않는다. 그러나 3선 단락사고로 증가된 3상의 사고전류는 사고전보다 큰  $I_0$ 가 발생하게 되며, 초전도 한류기의 설치로 인해  $I_0$ 를 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 인근 통신선의 전자유도장해를 감소시킬 수 있다는 것을 의미하게 된다.

앞에서도 언급하였듯이  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차이는 전동기 부하의 회전 토크를 결정짓는 중요한 요소이다. 사고로 인해 전동기의 회전토크가 변화하게 되면 발전기와의 상차각이 변화하게 되고, 그 차이가 90° 이상이 되면 발전기는 탈조하게 되어 전력망의 과도안정도가 저하하게 된다. 표 4-7은 3선 단락사고시 초전도 한류기의 설치 유무에 따라  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차이를 구간별로 나타낸 것이다. 초전도 한류기가 설치되지 않은 전력망의 사고가 발생한 FE\_AA에서는  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차이는 사고전보다 5.4배 증가한다. 그러나 초전도 한류기가 설치된 전력망에서는 약 1.6배 증가하여  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차이가 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 건전한 피더인

FE\_AC에서 초전도 한류기가 설치되지 않은 전력망에서는 사고후  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차이가  $0A_{rms}$ 이라는 것을 알 수 있다. 이는 3선 단락사고로 인해 건전한 피더에 흐르는 전류가 급격히 감소하기 때문이다.  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차이가  $0A_{rms}$ 이므로 3선 단락사고의 발생으로 인해 건전한 피더에서는 전동기의 회전토크가 발생하지 않게 되어 정지하게 되며, 이는 발전기와의 상차각이  $90^\circ$ 이상으로 증가하여 전력망의 과도안정도가 저하된다는 것을 알 수 있다. 그러나 초전도 한류기가 설치되면 건전한 피더에서의  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차이가 사고 전·후 약 0.1배 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 전동기와 발전기의 상차각이 거의 변화하지 않아 과도안정도가 유지된다는 것을 알 수 있다. 사고 및 건전한 피더를 가지고 있는 TR2에서의  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차이를 비교해보면 초전도 한류기가 없는 전력망에서는 사고전보다 1.8배 증가하고, 초전도 한류기가 설치된 전력망에서는 약 1.1배 증가한다는 것을 알 수 있다. 이로부터 초전도 한류기의 설치로 인해  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차이가 줄어들어 전동기 부하의 회전토크가 사고전과 비교하여 변화가 적어지게 된다. 이것은 3선 단락사고로 인한 발전기와 전동기와의 상차각 변화를 감소시키게 되어 과도안정도가 유지된다는 것을 의미한다.

## VI. 결 론

본 논문에서 제시하고 있는 변압기형 초전도 한류기는 저항형 초전도 한류기에 변압기가 결합된 구조를 가지고 있다. 1·2차 권선을 가지고 있는 변압기는 전력망의 선로와 변압기의 1차 권선이 직렬로 연결되고, 2차 권선에 초전도 한류기가 연결되어 있다.

본 논문에서는 변압기의 2차 권선과 직렬 연결된 초전도 소자 사이에 중성선을 연결함으로써 직렬 연결된 초전도 소자의 불규칙한 켄치현상을 해결하였다. 또한 초전도 한류기의 용량증대에 유리한 구조를 도출하기 위해 여러 형태의 초전도 한류기를 구성하여 실험을 통해 용량증대 방안을 분석하였다. 이러한 분석결과를 바탕으로 3상 전력망에서 발생하는 지락사고를 실험함으로써 3상 변압기형 초전도 한류기의 사고전류 제한 특성 및 과도특성을 분석하였다. 3상 변압기형 초전도 한류기를 실제 전력망으로 적용하는 것은 현실적으로 불가능하므로 전력망 해석 프로그램인 EMTP/ATP 프로그램을 이용하여 초전도 한류기를 적용하는 시뮬레이션을 수행하였다. 2회선 배전망을 설계하여 사고가 발생한 피더에 초전도 한류기의 설치유무에 따라 구간별 운전 특성을 분석하였으며, 대칭 좌표법을 통한 과도해석을 통해 초전도 한류기의 신뢰성을 입증하였다. 본 논문에서 얻은 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 초전도 소자의 제작시 발생하는 임계특성의 차이로 인해 불규칙한 켄치특성이 발생한다. 변압기형 초전도 한류기는 변압기의 2차 권선과 직렬 연결된 초전도 소자 사이에 중성선을 연결함으로써 초전도 소자들의 켄치가 균일하게 이루어졌다. 중성선 연결을 통해 변압기의 2차 권선이 초전도 소자가 개별적으로 켄치될 수 있도록 전류를 유도시킴으로써 임계특성의 차이를 극복하였다. 이로 인해 초전도 소자의 전압이 동일하게 발생하여 전력분담이 균일하게 이뤄진다.

2. 변압기형 초전도 한류기의 용량증대 방안 마련을 위해 변압기의 2차 권선에 4개의 초전도 소자를 3가지 형태로 직렬 연결하였다. 중성선을 사용하지 않은 일반적인 직렬연결인 경우 초전도 소자의 불균일한 켄치특성으로 1개의 초전도 소자만이 켄치되어 전력부담이 커진다. 그러나 중성선을 연결한 경우 변압기의 2차 권선이 초전도 소자의 켄치전류를 개별적으로 흘려주어 임계특성의 차이를 무시하고 균일한 켄치를 유도하게 된다. 이로 인해 4개의 초전도 소자는 모두 켄치되어 소비전력이 3배 이상 줄어들게 된다.
3. 4개의 초전도 소자를 중성선을 통해 연결한 변압기형 초전도 한류기는 상전도 상태에서 다시 초전도 상태로 전이되는 초전도 소자의 회복특성이 중성선이 없는 변압기형 초전도 한류기의 것보다 8배 이상 빠르게 회복된다. 이는 중성선의 연결을 통해 4개의 초전도 소자가 모두 균일한 소비전력을 갖도록 켄치를 유도할 수 있기 때문이다.
4. 3상 전력망에 적용된 변압기형 초전도 한류기는 1개의 철심을 통해 3상의 1·2차 권선이 연결되어 있으므로 사고가 발생한 상의 권선은 다른 건전상 및 사고상의 권선에도 상호유도작용에 의해 영향을 주게 된다. 이 유도전류는 건전상의 초전도 소자를 켄치시켜 사고상의 전력부담을 줄여주는 역할을 수행하나, 다른 사고상의 사고전류제한 동작을 방해한다. 재폐로 동작책무에 따라 3번의 사고발생시 1선, 2선 및 3선 지락사고에 따라 초전도 한류기가 최소 70% 이상의 사고전류를 제한하며, 초전도 소자들의 회복시간 또한 동일한 시간에 차단기의 개로주기 이내에서 회복하게 된다는 것을 실험을 통해 입증하였다. 이는 중성선의 사용으로 인해 초전도 소자들의 소비전력이 균일하게 분배되었기 때문이다.

5. 변압기의 2차 권선의 비가 작을수록 사고상의 전류가 더 감소하며 이로 인해 모든 상에 동일하게 존재하는 영상전류가 줄어들었다. 이로부터 인근 통신선으로의 전자유도장해를 줄일 수 있다. 또한 초전도 한류기가 설치되지 않은 경우 사고발생으로 인해 정상전류와 역상전류와의 차이가 커져 전동기 부하의 회전토크가 증가하게 된다. 변압기형 초전도 한류기의 설치를 통해 선로의 정상전류와 역상전류의 차이는 줄어들었으며, 이로부터 전동기 부하의 회전토크를 정상상태와 비교하여 크게 변화시키지 않아 전동기와 발전기 사이의 상차각을 유지할 수 있게 하여 전력망의 과도안전도가 유지된다.
  
6. EMTP/ATP 전력망 해석프로그램의 시뮬레이션 결과, 사고유형에 따라 사고가 발생한 피더에서의 사고전류는 약 70% 이상이 저감되며, 건전상 피더의 선로전류는 사고전의 약 90% 이상을 유지하여 전력을 공급하게 된다는 결과를 도출하였다. 또한 가장 큰 사고전류를 발생시키는 3선 단락사고의 경우 변압기형 초전도 한류기는 사고전류의 약 80% 이상을 감소시킬 수 있으며, 건전한 피더의 전력도 90% 이상이 유지되었다. 이로 인해 전력용 차단기의 차단용량을 증대시킬 수 있다는 것을 예상할 수 있다.
  
7. 대칭좌표법을 이용하여 전력망의 사고 유형별 과도해석을 분석한 결과, 사고가 발생한 피더의 정상전류와 역상전류의 차가 사고전의 15% 이내에서 발생하였다. 또한 건전한 피더에서 초전도 한류기가 없는 경우 사고전보다 정상전류와 역상전류가 줄어들어 전동기 부하의 회전토크가 최소 2배 이상 감소하였다. 그러나 초전도 한류기를 설치한 경우 사고 전·후 선로전류의 차이가 줄어들기 때문에 정상전류와 역상전류의 차가 줄어든다. 이로부터 사고후 발전기와 전동기의 상차각 변화가 작아 전력망의 과도안정도를 확보할 수 있다.



## 참 고 문 헌

- [1] 김준환, 이강완, “전력계통 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, Vol. 1 (1998), pp. 1-19.
- [2] “초전도 전력기기의 실계통 적용 기술개발(기획보고서)”, 지식경제부 (2009).
- [3] Charles W. Brice, Roger A. Dougal, Jerry L. Hudgins, “Review of technologies for current-limiting low-voltage circuit breakers”, IEEE Trans. on indust. appl., Vol. 32 (1996), pp. 1005-1010.
- [4] Teng Fa Tsao , Hong Chan Chang, “Composite Reliability Evaluation Model for Different Types of Distribution Systems”, IEEE trans. on power system, Vol. 18 (2003), pp. 924-930.
- [5] 김영선, 이강완, “고장전류 저감을 위한 345kV 직렬리액터 설치 검토”, 전기저널, Vol. 1 (2000), pp. 37-45.
- [6] S. Lee, J. Yoon, B. Lee, “Analysis model development and specification proposal of hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)”, Physica C, Vol. 470 (2010), pp. 1615-1620.
- [7] Lei Chen, Yuejin Tang, Jing Shi, Zheng Sun, “Simulations and experimental analyses of the active superconducting fault current limiter”, Physica C, Vol. 459 (2007), pp. 27-32.

- [8] K. Kaiho, H. Yamaguchi, K. Arai, M. Umeda, M. Yamaguchi, T. Kataoka, "A current limiter with superconducting coil for magnetic field shielding", *Physica C*, Vol. 354 (2001), pp. 115-119.
- [9] S. H. Lim, J. C. Kim, B. W. Lee, "Improvement of recovery characteristics of a flux-lock type SFCL using a superconductor's trigger", *IEEE Trans. on appl. super.*, Vol. 20 (2010), pp. 1182-1185.
- [10] B. C. Sung, J. W. Park, "Optimal parameter selection of resistive SFCL applied to a power system using eigenvalue analysis", *IEEE Trans. on appl. super.*, Vol. 20 (2010), pp. 1147-1150.
- [11] H. C. Seo, C. H. Kim, S. B. Rhee, J. C. Kim, O. B. Hyun, "Superconducting fault current limiter application for reduction of the transformer inrush current: A decision scheme of the optimal insertion resistance", *IEEE Trans. on appl. super.*, Vol. 20 (2010), pp. 2255-2264.
- [12] B. W. Lee, S. B. Rhee, "Test requirements and performance evaluation for both resistive and inductive superconducting fault current limiters for 22.9 kV electric distribution network in Korea", *IEEE Trans. on appl. super.*, Vol. 20 (2010), pp. 1114-1117.
- [13] O. B. Hyun, K. B. Park, J. W. Sim, H. R. Kim, S. W. Yim, I. S. Oh, "Introduction of a hybrid SFCL in KEPCO grid and local

points at issue", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 19 (2009), pp. 1946-1949.

[14] S. W. Yim, S. H. Sohn, S. D. Hwang, O. B. Hyun, S. H. Lim, Kohji Kishio, "Application of resistive type SFCL to protect Bi-2223/Ag tape against AC over-currents", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 16 (2006), pp. 669-702.

[15] S. H. Lim, "Operational characteristics of flux-lock type SFCL with series connection of two coils", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 17 (2007), pp. 1895-1898.

[16] H. S. Choi, B. I. Jung, Y. S. Cho, "Transient characteristics of a flux-coupling type superconducting fault current limiter according to winding direction", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 19 (2009), pp. 1827-1830.

[17] Lei Chen, Yuejin Tang, Zhi Li, Li Ren, Jing Shi, Shijie Cheng, "Current limiting characteristics of a novel flux-coupling type superconducting fault current limiter", IEEE Trans. on appl. super., Vol. 20 (2010), pp. 1143-1146.

[18] A. H. Moghadasi, H. Heydari, M. Salehifar, "Reduction in VA rating of the unified power quality conditioner with superconducting fault current limiters", 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference, (2010), pp. 382-387.

- [19] Y. S. Cho, H. S. Choi, "Improvement on the power capacity of the transformer-type SFCL with neutral lines between secondary windings", *Physica C*, Vol. 469 (2009), pp. 1749–1753.
- [20] S. H. Lim, J. C. Kim, "Quench and recovery characteristics of series-connected resistive type SFCLs with magnetically coupled shunt-reactors", *IEEE Trans. on appl. super.*, Vol. 18 (2008), pp. 729–732.
- [21] M. Yagami, T. Murata, S. Shibata, J. Tamura, "Improvement of power system transient stability by superconducting fault current limiter", *Trans. and Distri. Conf. and Exhi.* 2002, pp. 359–364.
- [22] S. J. Lee, C. J. Lee, T. K. Ko, O. B. Hyun, "Stability analysis of a power system with superconducting fault current limiter installed", *IEEE Trans. on appl. super.*, Vol. 11 (2001), pp. 2098–2101.
- [23] M. H. Kim, S. H. Lim, J. F. Moon, J. C. Kim, "Method of recloser-fuse coordination in a power distribution system with superconducting fault current limiter", *IEEE Trans. on appl. super.*, Vol. 20 (2010), pp. 1164–1167.
- [24] I. K. You, S. H. Lim, J. C. Kim, O. B. Hyun, "Study on protection coordination between protective devices in a power distribution system with an SFCL", *IEEE Trans. on appl. super.*, Vol. 20 (2010), pp. 1168–1171.

## 감사의 글

6년간의 대학원생활을 끝마치고 제가 이렇게 성장하기까지 한결같이 지켜봐 주신 모든 분들께 고개 숙여 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 대학원이라는 낯선 곳에 첫 발을 내디딜 때 열심히만 하면 되겠지라는 생각만 하였습니다. 그러나 많은 난관에 부딪히면서 좌절하고 있을 때면 언제나 아낌없이 격려해 주시고 학문적 성장과 함께 인간적인 부분의 지도까지도 해주신 최효상 지도교수님... 저를 부모님처럼 이렇게 키워주셔서 감사합니다. 바쁘신 가운데에서도 보잘것없는 저의 논문을 정성껏 심사해 주신 백형래 교수님, 오금곤 교수님, 이우선 교수님, 조근배 교수님께도 진심어린 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 옆에서 많은 격려의 말씀을 해주신 김용재 교수님, 김남훈 교수님과 지금은 퇴임하셨지만 저에게 아버지처럼 따뜻이 지도해 주신 정수복 교수님, 이상일 교수님께도 머리 숙여 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

이 자리에 첫 발을 디딜수 있도록 많은 이야기를 해준 전력계통실협실의 만형 박형민 선배, 지금은 먼저 사회생활을 하면서 많은 격려를 해준 우리 동기들 공현, 나영, 실험실 생활에 불편함이 없도록 항상 신경써주고 도와준 주형, 병익, 경훈, 수근 후배님들... 지금까지 고맙다라는 말을 한번도 못했는데... 너희들이 있었기에 지금의 내가 있을 수 있었다. 언제까지나 고마운 맘 잊지 않겠습니다. 그리고 많은 연구과제를 함께 수행하면서 많은 도움을 주신 전북대 한병성 교수님, 두호익 박사님, 우석대학교 정동철 교수님, 송실대학교 임성훈 교수님, 지금은 전력연구원에 계신 충렬이 형에게도 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

그리고 허물없이 다정하게 대해주신 최연옥 선배님, 이강연 선배님, 박정민 선배님과 주선, 승호, 채현, 승한, 국도, 승학, 인혁, 지혜, 규명 후배들에게도 감사드립니다.

오늘의 제가 있기까지 사랑으로 지켜봐 주시고, 격려해주신 우리 어머니, 아프신 몸으로도 저를 뒷바라지 해주셔서 감사합니다. 또한 대학원 생활을 하면서 제게 힘이 되어주신 형과 누나들에게도 진심으로 감사의 말씀을 드리며, 이 졸업논문을 바치고 싶습니다.

제가 어느 곳에 가든 주위 여러분들의 끊임없는 배려와 사랑을 가슴속에 간직하며, 기대에 어긋나지 않는 당당한 제자, 후배, 자식, 동생으로서 노력하는 모습 보이도록 열심히 하겠습니다. 감사합니다.

2010년 12월 조 용 선 올림