



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](#)

朴炯旼의 博士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校	教授	白亨來 
委員	朝鮮大學校	教授	李愚宣 
委員	朝鮮大學校	教授	吳金坤 
委員	朝鮮大學校	教授	唐錦培 
委員	朝鮮大學校	教授	崔孝祥 

2012年 6月

朝鮮大學校 大學院

2012年

8月
博士學位論文

변압기 결합형 초전도 한류기의
전력계통 적용특성

朴
炯
旻

2012年 8月
博士學位論文

변압기 결합형 초전도 한류기의 전력계통 적용특성

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 炯 旻

변압기 결합형 초전도 한류기의
전력계통 적용특성

Application Characteristics for Power System
of Superconducting Fault Current Limiter
Combined with a Transformer

2012年 8月 24日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴炯旻

변압기 결합형 초전도 한류기의
전력계통 적용특성

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.

2012年 4月

朝鮮大學校 大學院

電 氣 工 學 科

朴 炯 旻

朴炯旻의 博士學位論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 _____ 印

委員 朝鮮大學校 教授 _____ 印

委員 朝鮮大學校 教授 _____ 印

委員 朝鮮大學校 教授 _____ 印

委員 朝鮮大學校 教授 _____ 印

2012年 6月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT	ix
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	5
A. 초전도 한류기	5
B. 변압기 결합형 초전도 한류기	8
C. 동작원리	11
III. 실험	13
A. 실험장치	13
1. 초전도 소자	13
2. SCR 스위칭 제어 시스템	16
3. 3상 변압기 제작	19
4. 전원장치	28

B. 실험 결과 및 검토	30
1. 변압기 결합형 초전도 한류기의 동작특성	30
2. 2차, 3차권선수 변화에 따른 특성	38
3. 변압기 결합형 초전도 한류기의 용량증대 방안	43
4. 3상 초전도 한류기의 사고 유형별 특성	58
a. 초전도 한류기 3상 적용실험 회로도	58
b. 변압기 사용용도에 따른 전류제한 특성	61
c. 1선 지락사고	66
d. 2선 지락사고	74
e. 3선 지락사고	84
5. 초전도 한류기가 적용된 전력망 시뮬레이션	95
 IV. 결 론	 103
 참고문헌	 106

List of Tables

Table 3-1 Parameters of a Superconducting Element	14
Table 3-2 Parameters of a SCR Switching Control System	16
Table 3-3 Inductance Values of the Three Phase Transformer	21
Table 3-4 Design Parameters of a Power Supply System	28

List of Figures

Fig. 2-1 Critical Surface of a Superconductor	6
Fig. 2-2 Fault Current Curves according to the Fault Types and without or with a SFCL	7
Fig. 2-3 Structure of a SFCL Combined with a Transformer	9
Fig. 2-4 The Schematic Comparison of the SFCL Applied Power System	10
Fig. 2-5 Scheme of a SFCL Combined with in the Single Phase Transformer	11
Fig. 3-1 Superconducting Elements	14
Fig. 3-2 V-I Curves of Superconducting Units	15
Fig. 3-3 SCR Switching Control System	18
Fig. 3-4 Three Phase Transformer	20
Fig. 3-5 Voltage and Current Curves of a Transformer for Normal State	23
Fig. 3-6 Operating Characteristics according to the Fault of a Transformer	27
Fig. 3-7 Power Supply System	29
Fig. 3-8 Equivalent Circuit of a SFCL Combined with the Single Phase Transformer	30
Fig. 3-9 Operating Characteristics Curves of a Transformer and a SCR to Normal State	31
Fig. 3-10 Equivalent Circuit according to the Operating Contact of a SCR	33
Fig. 3-11 Operating Characteristics Curves of a SCR in Fault State	34
Fig. 3-12 Operating Characteristics Curves of a SCR in Line to Ground Fault	36
Fig. 3-13 Operating Characteristics Curves according to Half a Period	37

Fig. 3-14 Operating Characteristics Curves according to Turn's Ratio of a SFCL(Turn's Ratio $N_P:N_S:N_T=4:3:2$, 3, 4)	39
Fig. 3-15 Operating Characteristics Curves according to Turn's Ratio of a SFCL(Turn's Ratio $N_P:N_S:N_T=4:4:3$, 4, 5)	41
Fig. 3-16 Resistance and Consumption Power Curves according to Turn's Ratio of a SFCL	42
Fig. 3-17 Equivalent Circuit of a Resistive Type SFCL	43
Fig. 3-18 Voltage Curves of a Resistive Type SFCL	44
Fig. 3-19 V-I Curves of Superconducting Units	45
Fig. 3-20 Consumption Power Curves of a Resistive Type SFCL	45
Fig. 3-21 Equivalent Circuit of a SFCL Combined with the Single Phase Transformer	47
Fig. 3-22 Equivalent Circuit according to a Point of Contact of a SCR	48
Fig. 3-23 Operating Characteristics Curves of a SCR to Fault State	51
Fig. 3-24 Operating Characteristics Curves according to Turn's Ratio of a SFCL(Turn's Ratio of a Transformer for Step down $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:3:1:1$, 2:2, 3:3)	52
Fig. 3-25 Operating Characteristics Curves according to Turn's Ratio of a SFCL(Turn's Ratio of a Transformer for Voltage Drop or Modifier $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:4:1:1$, 2:2, 3:3)	53
Fig. 3-26 Operating Characteristics Curves according to Turn's Ratio of a SFCL(Turn's Ratio of a Transformer for Step up $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:5:1:1$, 2:2, 3:3)	54
Fig. 3-27 Resistance Curves according to Turn's Ratio of a SFCL	56
Fig. 3-28 Consumption Power according to Turn's Ratio of a SFCL	57
Fig. 3-29 Brief Diagram of Power System	58

Fig. 3-30 Experimental Circuit of a SFCL Combined with the Three Phase Transformer	60
Fig. 3-31 The Current and Voltage Curves of Step down Transformer in Normal State	63
Fig. 3-32 The Current and Voltage Curves of Voltage Compensation Compensation Transformer in Normal State	64
Fig. 3-33 The Current and Voltage Curves of Step up Transformer in Normal State	65
Fig. 3-34 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Single Line to Ground Fault(A Transformer for Step down)	67
Fig. 3-35 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Single Line to Ground Fault(A Transformer for Step down)	68
Fig. 3-36 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Single Line to Ground Fault (A Transformer for Voltage Drop or Modifier)	68
Fig. 3-37 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Single Line to Ground Fault(A Transformer for Step up)	69
Fig. 3-38 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Step down)	71
Fig. 3-39 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Voltage Drop or Modifier)	72
Fig. 3-40 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Step up)	73
Fig. 3-41 The Fault Current and Voltage Curves of Each Phase During the Double Line to Ground Fault(A Transformer of Step down)	74
Fig. 3-42 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Double Line to Ground Fault(A Transformer for Step down)	76

Fig. 3-43 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Double Line to Ground Fault (A Transformer for Voltage Drop or Modifier)	77
Fig. 3-44 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Double Line to Ground Fault(A Transformer for Step up)	78
Fig. 3-45 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Step down)	81
Fig. 3-46 Operation Characteristics of SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Voltage Drop or Modifier)	82
Fig. 3-47 Operation Characteristics of SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Step up)	83
Fig. 3-48 The Fault Current And Voltage Curves of Each Phase During the Triple Line to Ground Fault(A Transformer for Step down)	86
Fig. 3-49 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Triple Line to Ground Fault(A Transformer for Step down)	87
Fig. 3-50 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Triple Line to Ground Fault (A Transformer for Voltage Drop or Modifier)	88
Fig. 3-51 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Triple Line to Ground Fault (A Transformer for Step up)	89
Fig. 3-52 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Step down)	92
Fig. 3-53 Operation characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Voltage Drop or Modifier)	93
Fig. 3-54 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer Step up)	94
Fig. 3-55 The Simulation Model of a Transformer and a SFCL	96

Fig. 3-56 Resistance curves Model of Superconducting Elements	96
Fig. 3-57 Fault Current Limitation Characteristics of a SFCL	97
Fig. 3-58 Three Phase Modeling of a SFCL	99
Fig. 3-59 Fault Current Limitation Characteristics of a SFCL (The Single Line to Ground Fault)	100
Fig. 3-60 Fault Current Limitation Characteristics of a SFCL (The Double line to Ground Fault)	101
Fig. 3-61 Fault Current Limitation Characteristics of a SFCL (The Triple Line to Ground Fault)	102

ABSTRACT

Application Characteristics for Power System of Superconducting Fault Current Limiter Combined with a Transformer

Park Hyoung-Min

Advisor : Prof. Choi Hyo-Sang, Ph.D.
Department of Electrical Engineering,
Graduate School of Chosun University

With the rapid industrialization and economical development, the electricity demands of the industrial facilities and densely populated large cities are continuing to increase in Korea. The increase in the power consumption requires the extension of power facilities, but it is difficult to secure spaces for equipment installation in the limited space of urban areas. In addition, the 154 kV or 345 kV transmission systems in Korea has a short transmission distance, and are connected to one another in network structures that ensure the high reliability and stability of power supply. This structure reduces the impedance during the fault in power system, and increases the magnitude of in the short circuit fault current.

There are many methods to address the fault current. The breaker whose breaking capacity is insufficient should be replaced by the one with a higher capacity. However, replacing the breaker involves large technical and

economical burdens. If the buses of the power system are separated, the resulting overload and voltage fluctuation degrade the power quality and supply reliability. Serial reactors or high impedance power devices can also be installed for the replacement, but they cause voltage drop during normal operation. Thus, there were no existing methods to address the fault current. The superconducting fault current limiter (SFCL) was devised to effectively address these existing problems. The SFCL is a new-concept eco-friendly protective device that ensures fast operation and recovery time for the fault current and does not need additional fault detection devices. Therefore, many studies are being conducted around the world.

The SFCL in the power system does not affect the surrounding equipment, without loss during normal operation, but if the fault current exceeds the critical current of the superconductor in the event of a fault in the system, the superconductor is quenched and changed into the normal conduction state. A high impedance is generated from the superconductor in the superconducting state, and the superconductor operates to limit the magnitude of the fault current. Because the SFCL limits the fault current, the existing breaker can stably operate and the system is effectively protected against the fault, without the need for replacing or increasing the capacity of the existing breaker. The introduction of the SFCL applied to the breaker that has an insufficient breaking capacity will be able to increase the breaker capacity and ensure stable system protection. Based on the simple resistor-type SFCL, this study addressed a new-concept SFCL with the SFCL applied to the third winding of the commercial transformer. The SFCLs in the past studies have been independent devices that are installed standalone in the power system. This type requires high cost because it needs additional installation space and should be installed for each breaker. The SFCL in this study, however, is installed on

the tertiary winding of the existing transformer. In addition, the volume of the superconductor can be minimized by controlling the fault current limitation rate of the SFCL depending on the number of turns of the tertiary winding. It is economical because expensive superconductors can be reduced, and it can solve the existing problems by reducing the size of the peripheral devices, including the cryostat.

In this study, the SFCL was applied to the commercial transformer to analyze its operating characteristics in the event of the fault in the system.

1. The superconducting fault current limiter (SFCL) was applied to the third winding of the commercial transformer. In the normal condition, the transformer conducted its basic operations (step up, step down and voltage compensation). In the fault condition of the power system, the fault current flowed to the third winding, quenching the superconducting element connected to the third winding, and limited 90% of the fault current.

2. The operating characteristics of the single and three phase transformers with the SFCL are represented by the operating time of the SCR switch, which is important in the transformer SFCL combination technology. Contact point of a in the SCR is immediately turned on by the signal to the gate. In the case of contact point of b in the SCR, however, the contact is turned off when the current falls below the holding current or when the inverse voltage is applied to the SCR. The results of the application of the transformer and SFCL to the single-phase system showed that the fault current was limited half a cycle after the current of contact point of be in the SCR reached 0 [A].

In the case of the three phase system, however, the magnetic flux generated by other sound phases affected the current of the SCR-b, and the contact was turned off as soon as the gate signal was applied, due to the fault detection of the CT. The fault current was limited within half a cycle after the fault occurrence. In the power system, to which the SFCL will be applied, is a three phase system, and its application to the system was advantageous.

3. The operating characteristic of the SFCL according to the change in the number of windings of the single phase transformer was analyzed. As a result, a greater number of secondary windings delayed the quenching point of the superconducting element, and a greater number of third windings delayed the quenching point of the superconducting element. This was because the impedance and current decreased with the increase in the number of third windings, and the achievement of the critical current was delayed.

4. The difference in the critical characteristic, which is produced during the fabrication of the superconducting element, causes the irregular quenching characteristic. One superconducting element covered the power in the power consumption curve of resistive type SFCL but two elements covered the power in the power consumption curve of the transformer combined with a single phase SFCL. In addition, it is advantageous in increasing the capacity because two superconducting elements can share the power burden.

5. To derive application characteristics in diverse power system situations, the operating characteristics were analyzed according to the use of the transformer (step up, voltage compensation and step down), third winding ratio and fault type. The use of the transformer is determined by the secondary winding ratio.

A fewer number of secondary windings led to a faster turn-off operation time of the SCR-b, and a greater number of third windings led to a faster turn-on operation time of the SCR-a. Accordingly, the fault current is limited within half a cycle when the transformer is used for step down with a small number of secondary windings. In the characteristic analysis according to the fault types the fault on phase S, which was positioned at the center core leg, quenched the superconducting element before the turn-off of the SCR-b due to the magnetic flux from other sound and faulty phases. Accordingly, the current on the SCR-b was not 0[A], and SCR-b turned off after half a cycle and limited the fault current. In the case of the triple line to ground faults, the fault current on phase S was also limited after half a cycle, and the fault currents on phases R and T were limited well within half a cycle.

6. The simulation results of the EMTP power system analysis program showed that 90% or more of the fault current was limited after half a cycle depending on the fault types and the peak of the initial fault current was limited by at least 20% more when the SCR operated within half a cycle than when it operated after half a cycle. This indicates that the SCR operation can efficiently limit the fault current when it operates within half a cycle. In addition, this indicates that the power breaker capacity can be increased in the real power system.

I. 서 론

국내의 전력계통은 급격한 산업화와 급속적인 경제발전으로 산업시설 및 대도시 인구 밀집지역의 전력수요가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 전력 사용량의 증가는 각종 전력설비들의 증설을 필요로 하고 있지만 도심지의 경우는 제한된 공간에 설비 증설의 공간확보에도 큰 어려움을 겪고 있다.

또한, 국내 154[kV]나 345[kV]의 송전계통의 구조는 송전거리가 짧고, 전력공급 신뢰성과 안정도 향상을 위해 서로 네트워크화 되어있다. 이러한 구조는 전력계통 사고발생시 임피던스 감소를 야기시키고 단락사고에 의한 사고 전류의 크기를 점점 증가시키고 있다[1-2].

계속되는 전력수요 증가 추세 속에서 대용량 전력설비들이 늘어갈 수록 전력계통사고 발생시, 차단기가 사고전류를 차단하기까지의 시간동안 계통에는 정상전류의 수십 배에 달하는 전류가 흐르기 때문에 계통의 안정성이 떨어지고 전력기기의 수명이 단축되는 문제가 발생한다. 2003년 미국, 유럽에서와 같이 대규모 정전사태와 같은 심각한 상황이 초래되기도 한다. 국내에서는 2011년 9.15 정전사태가 발생하는 등 전력계통의 사고는 사회적 경제적으로 큰 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 전력계통의 사고에 대한 대책방법으로 여러 가지 방법이 있다. 차단 내력을 초과하는 차단기는 차단내력이 큰 차단기로 교체하여야 한다. 하지만 차단기를 교체하는 방법은 기술적으로 경제적으로 큰 부담감을 가진다.

전력계통의 모선 분리방식은 인접계통에 대한 과부하 및 전압변동이 심하여 전력 품질 및 공급 신뢰도를 저하시킨다. 또한 직렬 리액터 설치나 임피던스의 전력설비를 설치하는 방법이 있으나 정상 운전시 전압 강하를 발생시키는 큰 문제점이 있다. 현재 사고전류의 대책 방법으로는 효율적으로 해결하지 못한다[3-4].

이와 같은 기존방식의 문제들을 효과적으로 해결하기 위한 방안으로 고안된 것이 초전도 한류기이다. 초전도 한류기는 사고 전류에 대한 빠른 동작 및 회복시간과 별도의 사고 감지장치를 불필요하며 신 개념의 보호기기이며 환경 친화적인 장

점 때문에 국·내외적으로 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다[5-22].

전력계통에서 초전도 한류기의 적용시 정상 운전 중에는 주변 전력설비에 영향을 주지 않고, 선로에 아무런 손실없이 동작하게 된다, 하지만 계통에 사고 발생시 사고전류의 크기가 초전도체의 임계 전류값을 초과하게 되면 초전도 상태가 켄치되어 상전도 상태로 변한다. 상전도 상태가 된 초전도체는 고 임피던스가 발생하고 신속하게 동작하여 사고전류의 크기를 제한하게 된다. 초전도 한류기는 사고전류의 크기를 제한하여 기존 차단기의 교체나 용량을 늘리지 않더라도 기존 차단기가 안정적으로 동작할 수 있게 하여 사고로부터 계통을 효과적으로 보호할 수 있게 된다. 차단내력이 넘는 차단기에 설치하여 차단기 용량 증대효과를 가져오고 안정적인 계통보호를 위한 초전도 한류기의 도입은 필수적인 기술이 될 것으로 전망된다[23-30].

이처럼 초전도 한류기는 기존 사고전류에 대한 대책방법의 문제점을 해결하고 현재 전력계통의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 가장 확실한 방법이다. 그러나 실계통 적용을 위하여 지속적으로 연구하여야 하고 해결해야 될 문제들이 있다.

전력계통에서 초전도 한류기의 설치는 기존의 전력망이 요구하는 용량증대나 효율증대 손실 감소 등의 측면에서 효과적인 역할을 수행할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 초전도 한류기는 현재 여러 가지 초전도체를 이용한 다양한 구조로 연구 개발되고 있다. 초전도 한류기는 켄치특성에 따라 크게 켄치형과 무켄치형으로 분류할 수 있는데 켄치형은 다시 영저항 특성을 이용한 저항형과 마이즈너 효과를 이용한 유도형으로 분류할 수 있다.

국내의 경우를 살펴보면 과학기술부 21세기 프로티어 연구개발사업 중 차세대 응용기술개발 사업단의 DAPAS 사업의 일환으로 2001년부터 2011년까지 10년동안 송전급인 154kV/2kA급 초전도 한류기의 상용화를 목표로 연구가 시작되었고 전력 연구원과 LS산전에서는 22.9kV/630A급 선로변경식 하이브리드형 초전도 한류기를 개발하였다. 이러한 기술은 세계 최초이며 최고의 성능을 갖추었다고 할 수 있다. 기존 저항형 초전도 한류기의 실계통의 적용시 용량증대를 위하여 많은 초전도 소

자가 필요하다.

또한 초전도 소자의 공정상 임계특성의 불균일로 인하여 동시 켜치의 문제점이 있다. 하지만 이러한 문제를 하이브리드형 초전도 한류기를 통해 해결할 수 있었다. 하이브리드형 초전도 한류기 기술은 지속적인 연구를 통해 2010년 22.9[kV]/3000[A]급의 세계 최대용량으로 개발되었다.

기존의 연구한 초전도 한류기는 저항형 초전도 한류기의 용량증대를 위하여 많은 양의 초전도 소자가 필요했고 동시 켜치라는 기술적인 문제점이 있었다. 하지만 하이브리드형 초전도 한류기는 초전도 소자가 스위치 역할을 함으로써 이러한 문제점을 보완할 수 있었다.

현재 하이브리드 초전도 한류기는 실계통 적용을 위해 한전 고창 전력시험장에 설치되어 시험 중에 있다. 해외의 경우를 살펴보면, 주로 독일을 중심으로 한 유럽 미국, 일본에서 개발을 하고 있다. 먼저 독일의 경우는 넥상스는 오랫동안 초전도 연구기술로 초전도 한류기 부품기술을 보유하고 있으며 고온초전도 테이프를 사용하여 2009년에 초전도 한류기를 개발하여 발전소에 설치하였다. 일본의 경우는 Super-ACE 프로젝트를 통해 초전도 박막을 이용하여 6.6kV/500의 유도형 한류기 개발을 목표로 2004년에 소자를 직·병렬 연결하여 5.4kV/340A를 개발하였다. 미국에서는 SPI사업을 통해 2005년에 IGC-SuperPower사와 공동으로 MFCL을 개발하였다.

이렇듯 세계적으로 다양한 종류의 초전도 한류기가 개발되었고, 현재는 송전급 적용을 위한 기술개발이 진행 중에 있다.

현재 다양한 형태의 초전도 한류기가 개발되고 있고, 일부는 실계통 적용을 위해서는 주변 전력기기에 미치는 영향을 고려하여야 하고 구조의 복잡성, 전기 절연문제, 소자의 불균일 문제로 실 계통 실험에 많은 어려움을 겪고 있다.

본 논문에서는 여러 형태의 초전도 한류기 중 구조가 간단한 저항형 초전도 한류기를 기본으로 하고 있다. 여기에 상용 변압기의 3차권선에 초전도 한류기를 적용한 형태로 신개념의 초전도 한류기에 대한 연구를 진행하고자 한다. 기존에 연구되고 있는 초전도 한류기는 전력계통 적용시 단독으로 설치되는 독립형 기기이

다. 이는 설치 시 별도의 설치공간이 필요하고 차단기 별도로 설치하여야 하기 때문에 많은 비용이 든다. 그러나 본 논문에서 연구한 초전도 한류기는 기존에 사용하고 있는 변압기의 3차권선에 초전도 한류기를 연결하는 구조이다. 또한 3차권선의 권선 수에 따라 초전도 한류기의 사고전류 제한율을 조정함으로써 초전도체의 양을 최소화 시키려한다. 또한 고가의 초전도체의 수를 줄임으로써 경제적이며 저온용기 등 주변기기의 규모를 줄이고자 한다.

본 논문에서는 상용변압기에 초전도 한류기를 적용하여 계통에 사고가 발생 시 다음과 같은 특성을 분석하였다.

① 상용변압기와 초전도 한류기의 적용에 따른 특성

단상 변압기와 삼상변압기에 초전도 한류기를 연결하여 사고상태에서의 동작 특성을 분석하였다.

② 변압기 권선 수에 따른 특성

변압기의 용도(승압용, 보상용, 강압용) 조건에 따라 2차측 권선과 초전도체가 연결된 3차권선의 권선 수비를 조절하여 동작특성을 분석하였다.

③ 변압기 결합형 초전도 한류기의 용량 증대 방안

변압기의 3차 권선과 초전도 소자의 연결방법을 통해 균형적인 켄치를 유도하기 위한 방안을 모색하여 일반적인 저항형 초전도 한류기와 비교하고자 한다.

④ 3상 초전도 한류기 사고전류 제한특성

변압기와 결합한 3상 초전도 한류기에 계통 내에서 발생할 수 있는 1선, 2선, 3선 지락사고에 대한 사고를 모의하고 사고전류 제한특성을 분석하였다.

⑤ EMTP/ATP 프로그램을 이용한 전력계통 시뮬레이션

전력계통 해석 프로그램을 이용하여 동작모듈을 설계하였고 전력망에서 발생하는 사고를 1선, 2선, 3선 지락사고시 시뮬레이션을 통해 모의하였으며 전류제한 특성을 분석하였다.

II. 이론적 배경

A. 초전도 한류기

초전도 현상이란 어떤 물질이 적절한 조건 하에서 물질의 전기저항이 완전히 사라지는 특성과 자기장을 배척하는 완전 반자성 특성을 갖게 되는 현상을 말한다. 초전도란 전기저항이 제로이기 때문에 어떠한 물질보다도 전기전도성이 비교할 수 없을 정도로 우수하다. 초전도체가 되기 위한 적절한 조건에는 온도, 자기장, 및 전류 등이 있다.

상온에서 초전도성을 나타내지 않은 물질이 적절한 조건 하에서 초전도체로 변하는 것을 정상상태에서 초전도상태로의 전이라 하는데, 특히 열역학적인 초전도 상태에서 초전도체가 외부자기장과 통전전류가 없는 상황에서 초전도성을 나타내는 최고의 온도를 임계 전이온도라고 한다. 일반적으로 초전도 현상이 일어날 수 있는 상황은 3가지 기본조건인 온도, 자기장의 세기 및 전류밀도에 따라 달라진다.

초전도 한류기는 초전도체의 영저항 특성을 이용한 것으로써 정상상태에서는 초전도 소자가 임계값 이하에서 저항이 없는 상태를 유지하고, 사고 발생시에 임계 전류 값을 초과하게 되면 상전도 상태로 전이되어 임피던스를 발생시킨다. 이때 초전도체가 초전도 상태에서 상전도 상태로 전이되는 것을 켄치(quench)라고한다. 켄치된 초전도체가 사고전류를 제한하여 계통의 안정도 및 공급 신뢰도를 가져온다.

그림 2-1은 초전도체의 임계 곡면을 나타낸 것으로써 온도, 자장의 세기, 전류밀도의 크기가 임계곡면 내부에 존재하여야만 초전도체는 초전도 상태를 유지하게 된다. 3가지 요소 중 하나라도 임계값을 초과하게 되면 초전도 성질을 잃어버리고 상전도 상태로 된다.

그림 2-2(a)는 초전도 한류기 없는 경우 사고전류가 큰 값으로 증가함을 나타내고 있으며 그림 2-2(b)는 초전도 한류기 적용시 1주기 이내로 사고전류가 제한함

을 보여주고 있다. 이는 초전도 한류기의 유무에 따라 초전도 한류기를 적용 하였을 시 사고전류가 제한함을 나타내고 있다.

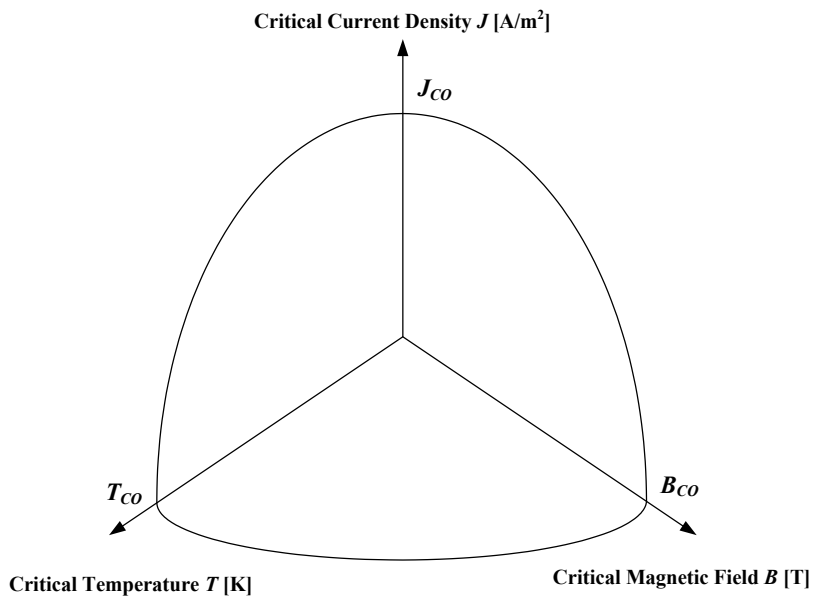
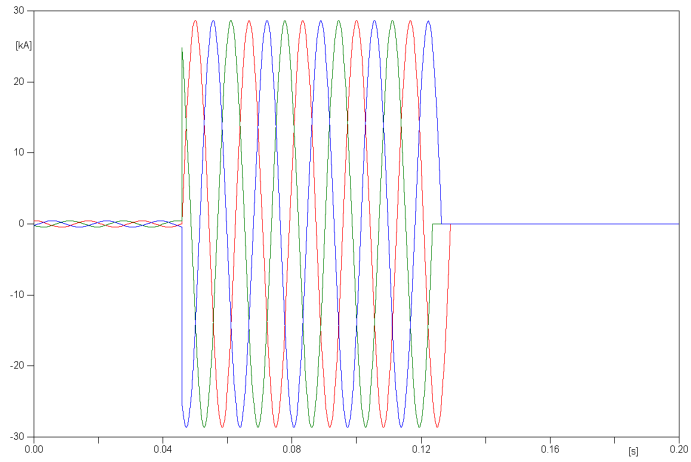
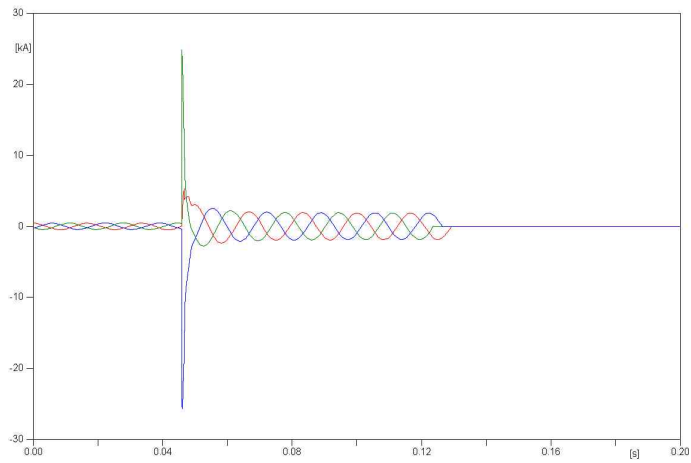


그림 2-1 초전도 임계곡면

Fig. 2-1 Critical Surface of a Superconductor



(a) Power System without a SFCL



(b) Power System with a SFCL

그림 2-2 초전도 한류기의 유무에 따른 사고전류 곡선

Fig. 2-2 Fault Current Curves according to the Fault Types and without or with a SFCL

B. 변압기 결합형 초전도 한류기

기존에 사용되고 있는 3상 변압기와 초전도 한류기를 융합하여 과도상태로부터 전력계통을 보호할 새로운 형태의 개념도를 그림 2-3에 나타내었다. 초전도 한류기가 설치된 변압기는 평상시 변압기의 동작인 승압 또는 강압의 역할을 수행할 수 있다. 사고가 발생하면 사고전류의 전자 유도작용에 의해 3차권선에 사고전류를 유도하고 이렇게 유도된 전류는 초전도체를 퀘칭 하게 되어 사고전류를 제한하게 된다.

현재 연구 중인 초전도 한류기는 전력계통에 적용하기 위하여 용량을 증대하기 위한 방안 모색에 주력하고 있다. 본 과제에서 제안한 초전도 한류기 또한 용량증대를 위해 다수의 초전도체 연결은 불가피하다. 다수의 초전도체를 일반적인 연결 방법으로 하였을 경우 제작상 불균일한 임계특성의 차이로 인해 초전도체간에 불균일 퀘칭이 발생하게 되고, 이러한 불균일한 동작으로 인해 고가의 초전도체는 파손된다.

그러나 그림 2-3과 같이 3차권선에 직렬 연결된 다수의 초전도체는 퀘칭시 3차권선과의 바이패스 작용에 의해 불균일한 임계특성을 줄여줌으로써 동시 퀘칭 및 균일한 전력분담을 가능토록 한다. 또한 3차권선은 초전도체의 퀘칭 후 발생하는 줄열을 감소시키는 역할을 수행함으로써 회복특성을 개선하게 되어 고가의 초전도체를 보호하게 된다. 그림 2-4와 같이 기존에 연구되고 있는 초전도 한류기는 전력계통 적용시 단독으로 설치되는 독립형 기기이다. 그러므로 국내의 변전소 특성상 설치 공간의 협소라는 제약 때문에 설비의 규모 감소를 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

그러나 본 논문에서 연구한 초전도 한류기는 기존에 사용하고 있는 변압기에 3차권선을 설치하여 초전도 한류기를 접목하는 장치이기 때문에 기존의 초전도 한류기 보다 유리하다. 또한 3차권선의 권선수에 따라 초전도 한류기의 사고전류 제한율을 조정할 수 있으므로 사용되는 초전도체의 양을 최소화시킬 수 있다. 이것은 고가의 초전도체의 수를 줄임으로써 경제적이며, 또한 저온용기 등 주변기기의 규모를 줄일 수 있는

장점이 있다.

그림 2-4는 초전도 한류기가 배전급 전력계통에 적용되는 구상도를 나타낸 것이다. 기존의 초전도 한류기는 모선과 수용가를 동시에 보호하기 위해 그림 2-4 (a)와 같이 적용하는 방식을 구상하고 있다. 이러한 방식은 선로의 중간에 설치되므로 고압의 절연과 설치 면에서의 어려움, 설치 공간 확보, 다수의 초전도 한류기 필요 등 문제점이 예상되고 있다.

그러나 그림 2-4 (b)와 같이 기존의 변압기와 접목하는 초전도 한류기는 사고시 강압된 고장전류가 흐르기 때문에 절연면에서 우수하고, 변압기의 3차 권선에 설치되므로 용이한 설치가 가능하다. 또한 직접적인 고장전류에 고가의 초전도체가 개방되어 있지 않으므로 보호 측면에서도 우수하다 할 수 있다.

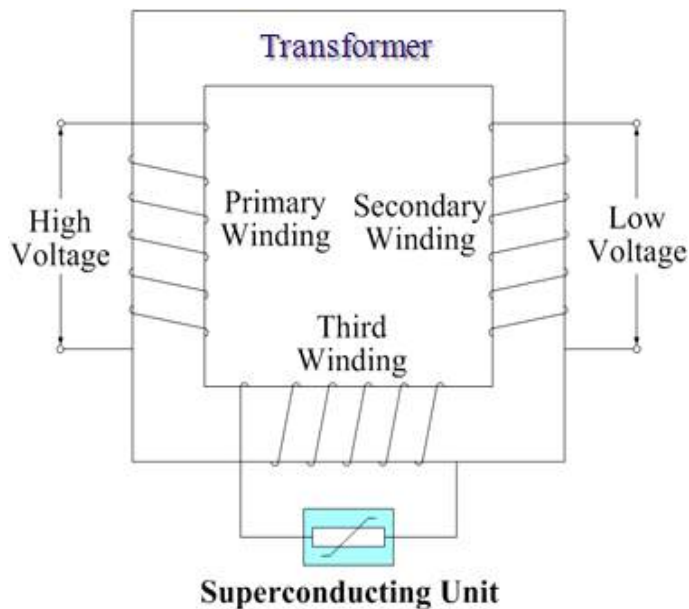
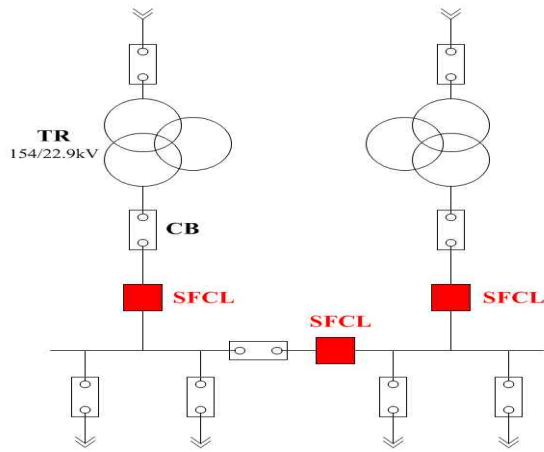
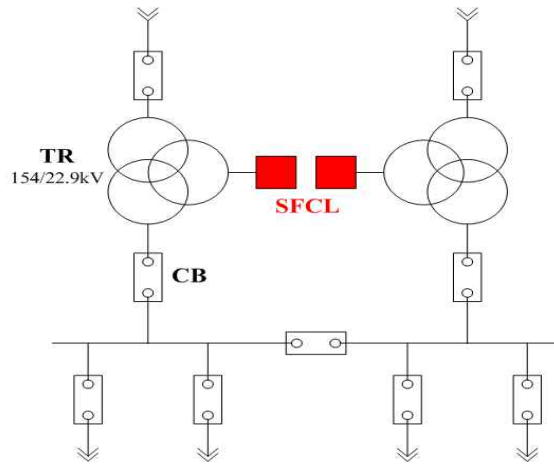


그림 2-3 변압기와 초전도 한류기의 결합된 구조

Fig. 2-3 Structure of a SFCL Combined with a Transformer



(a) Power System Application of the Existing SFCLs



(b) Power System Application of SFCLs Combined with a Transformer

그림 2-4 초전도 한류기의 전력계통 구상도 비교

Fig. 2-4 The Schematic Comparison of the SFCL Applied Power System

C. 동작원리

그림 2-5는 상용변압기와 초전도 한류기의 적용을 위하여 설계한 기본 실험 회로도이다. 이것의 동작은 두 가지로 정상상태 시에는 변압기의 기본동작(승압, 강압, 전압보상) 수행하고 사고상태 시에는 초전도 소자의 임피던스에 의해 한류동작 수행한다.

전력망의 정상상태에서는 1, 2차 코일의 권선수비 $a = N_P/N_S = V_P/V_S$ 에 의해 변압기의 승압, 강압, 전압보상의 본래 역할을 수행한다. 그리고 전력망에서 발생하는 사고 상태에서는 2차측 회로에 흐르는 전류를 CT가 감지하고, 감지된 전류의 크기를 SCR Switching Control System에서 판단하여 SCR 스위치를 동작시킨다. SCR-a의 b접점 동작을 통해 초전도 소자는 3차권선의 회로와 연결되며, SCR-b의 a접점 동작에 의해 2차권선의 회로는 개방하게 된다. 이로부터 2차권선과 3차권선이 직렬로 연결되는 하나의 회로가 구성된다.

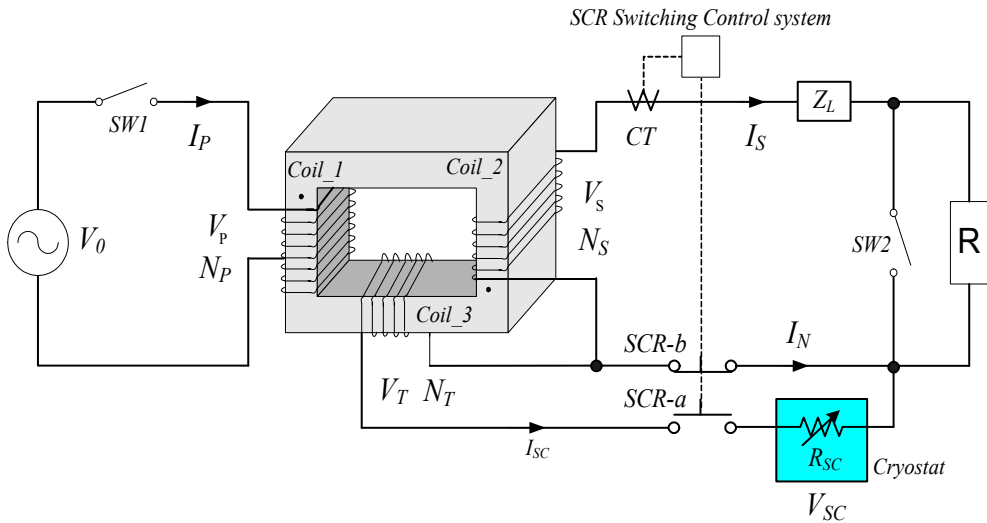


그림 2-5 단상변압기와 초전도 한류기의 구조

Fig. 2-5 Scheme of a SFCL Combined with in the Single Phase Transformer

변압기의 정상동작시 전압과 전류의 식을 식 (2.1)-(2.2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_S = \frac{N_S}{N_P} \cdot V_P \quad (2.1)$$

$$I_S = \frac{V_S}{R + Z_L} \quad (0 < Z_L < 1) \quad (2.2)$$

여기서 Z_L 은 변압기 2차측 권선과 부하 R까지의 선로 임피던스이다.

이때 부하 R이 단락되는 사고가 SW₂에 의하여 발생하면 식 (2.2)에서 R=0으로 되어 2차측 회로에 흐르는 전류 I_S는 Z_L이 작으므로 급격히 증가한다. 이렇게 사고가 발생하면 변압기의 2차측에 흐르는 사고전류를 CT로 감지하여 SCR 스위치가 인터록 동작을 수행한다. 이때의 사고전류를 식 (2.3)처럼 표현할 수 있다.

$$I_S = \frac{V_S + V_T + V_{SC}}{R_{SC} + Z_L} \quad (2.3)$$

즉, 사고가 발생하면 SCR 스위치의 동작으로 2차권선과 3차권선이 직렬로 연결되어 변압기 2차 회로에 초전도 소자가 투입된다. 그 후 사고전류는 초전도 소자를 켜치 시켜 R_{SC}의 저항을 발생시키고, 이 저항으로 인해 사고전류는 저감된다.

Ⅲ. 실험

A. 실험장치

1. 초전도 소자

그림 3-1은 변압기 3차 권선에 연결된 초전도 한류소자를 나타낸 것이다. 초전도 한류소자는 직경 2인치의 합성 사파이어(Al_2O_3) 기판 위에 성장된 두께 $0.3\mu m$ 의 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막을 이용하여 제작하였다. 박막은 독일의 Theva사에서 구입하였으며, 소자의 임계온도와 임계전류밀도는 각각 87~88K와 $2\sim 3MA/cm^2$ 으로 비슷하였으며 박막 전면에서 $\pm 0.5\%$ 이내로 균일하였다. YBCO박막은 제조공정상 두께가 불균일한데 이 불균일성 때문에 생기는 hot spot에서 발생하는 열을 분산시키기 위해서 YBCO박막 위에 $0.1\sim 0.2\mu m$ 두께의 금을 증착하였다. 금 박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에(약 100분의 1) 켄치된 hot spot으로부터 전류를 우회시켜서 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 분산시켜 준다. 이외에도 금 박막층은 YBCO박막의 표면을 공기 중의 노출로부터 보호하는 역할도 한다.

YBCO박막은 공기 중의 수분과 반응하여 비 초전도체를 형성하기 때문에 YBCO박막의 표면을 공기로부터 차단시켜 보호하여야 한다. 금 박막은 YBCO박막 성장 직후에 진공을 유지한 상태에서 in-situ로 증착하였다. 금이 증착된 YBCO박막을 광리소그래피(photo-lithography)에 인쇄회로기판(PCB) 제작공정을 접목하여 meander line모양으로 식각하는 공정을 개발하고 한류소자를 제작하였다. 상세사양을 표 3-1에 나타내고 있다.

그림 3-2는 초전도 소자의 V-I 특성을 나타내고 있다. 약 18A에서 임계 전류값을 넘어 켄치가 됨을 확인할 수 있고 제작 공정상 약간 임계 전류값이 불균일함을 알 수 있다. 이는 용량증대 시 동시 켄치를 위해 고려해야 될 부분이다.

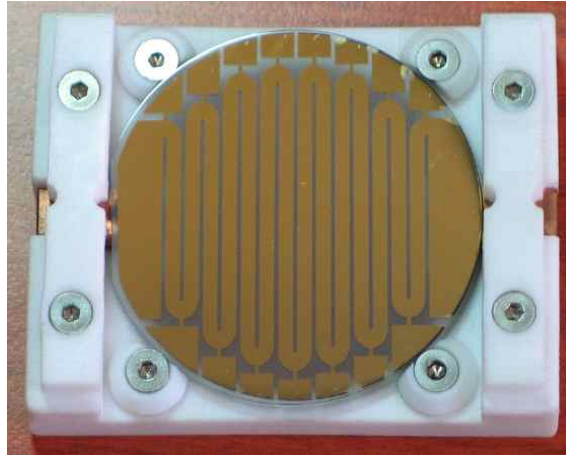


그림 3-1 초전도 한류소자

Fig. 3-1 Superconducting Element

표 3-1 초전도 한류소자 설계 사양

Table 3-1 Parameters of a Superconducting Element

Parameter	Value	Unit
Element diameter	2	inch
Stripe width	2	mm
Length	540	mm
YBCO thickness	0.3	μm
Gold thickness	0.1~0.2	μm

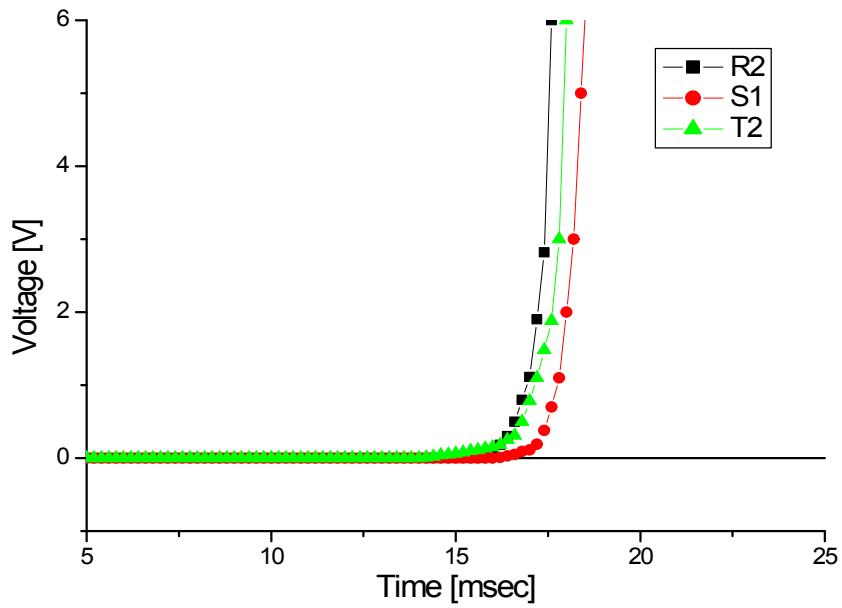


그림 3-2 초전도 소자의 V-I 곡선

Fig. 3-2 V-I Curves of Superconducting Units

2. SCR 스위칭 제어 시스템

SCR Switching Control System은 변압기 2차측 권선의 CT에 의해 감지된 사고전류에 의해 변압기 2차측과, 3차측 권선의 온·오프 동작을 수행한다. 6개의 SCR이 각 상에 2개씩 연결되는 구조를 갖는다. 정상상태에서는 각 상 2차측 권선의 선로는 온 상태이고, 초전도 한류소자가 연결된 3차측권선은 오프 상태를 유지한다. 하지만 사고가 발생하여 사고전류가 증가하게 되면 CT에 의해 변압기 2차측 권선은 오프 되고 3차권선은 온 되어 초전도 한류소자에 사고전류가 흐르게 된다. 이때 3차권선의 초전도 소자에 일정값(임계전류값)이상의 사고전류가 흐르게 되면 켄치되어 사고전류를 제한하게 된다.

표 3-2은 SCR 스위칭 제어시스템의 사양을 나타낸다. 그림3-3은 SCR 스위칭 제어 시스템의 구성을 보여준다. 그림 3-3(a), (b)는 제작된 스위칭 제어 시스템의 전·후면 사진을 보여주고 있다. 그림 3-3(c)는 내부 회로사진과 각 부품의 명칭을 나타냈다. 그림 3-3(d)-(e)는 SCR 스위칭 제어 시스템의 내부 회로도 및 SCR Control PCB를 나타내었다.

표 3-2 SCR 스위칭 제어 시스템 사양

Table 3-2 Parameters of a SCR Switching Control System

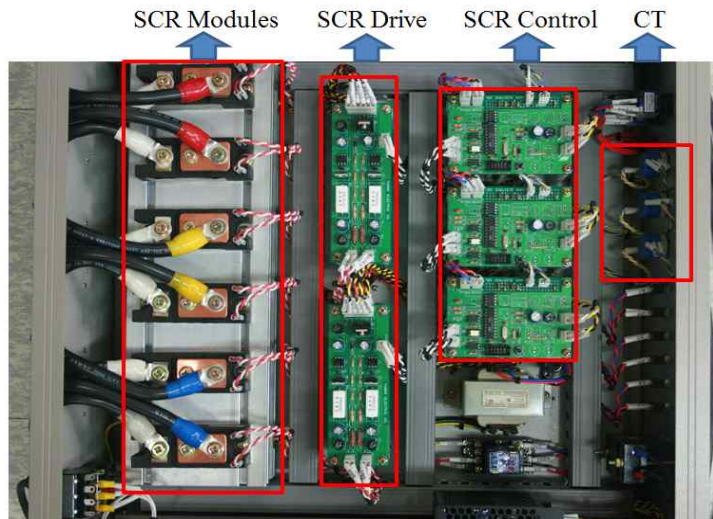
Parameter	Value
Input Voltage	AC 220V
Frequency	1Φ 60Hz
Current	Max 100A
Drive element	SCR 1600V/150A
ON/OFF Time	Maximum value (8.3ms)



(a) The Front Picture



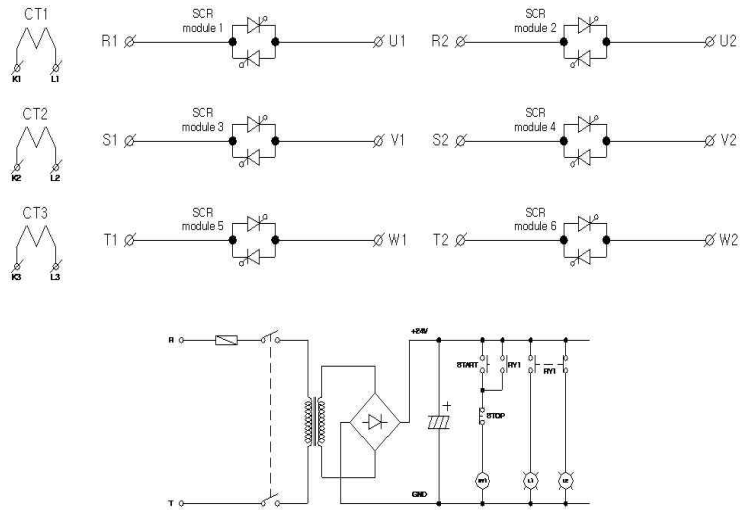
(b) The Backside Picture



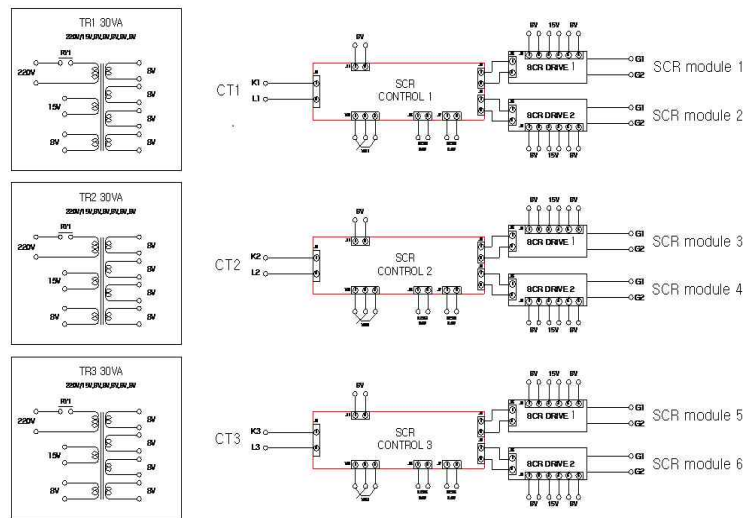
(c) The Inside Circuit Picture

그림 3-3 (계속)

Fig. 3-3 (Continued From the Previous Page)



(d) SCR Composition



(e) SCR Switching Control System

그림 3-3 SCR 스위칭 제어 시스템

Fig. 3-3 SCR Switching Control System

3. 3상 변압기 제작

그림 3-4는 본 논문에 초전도 한류기 적용을 위해 제작한 3상 변압기이다. 변압기는 구조상 자속 불균형으로 인해 동작특성에 영향을 미친다 이러한 부분을 고려하여 각 상에 균일한 자속 분포를 보이는 3상 일체형 변압기를 제작하였다. 제작된 변압기는 각 상 12회로 50[V], 60Hz이고, 각 상의 1 Tap당 인덕턴스는 표3-3에 나타내었다.



(a) The Front Picture

그림 3-4 (계속)

Fig. 3-4 (Continued From the Previous Page)



(b) The Backside Picture



(c) The Side Picture

그림 3-4 제작된 3상 변압기(3 ϕ Tr)
Fig. 3-4 Three Phase Transformer

표 3-3 3상 변압기 코일의 인덕턴스

Table 3-3 Inductance Values of the Three Phase Transformer

R-Phase		S-Phase		T-Phase	
Tap	Inductance [mH]	Tap	Inductance [mH]	Tap	Inductance [mH]
1	2.015	1	2.584	1	1.640
2	2.008	2	2.574	2	1.634
3	2.005	3	2.567	3	1.631
4	2.003	4	2.563	4	1.629
5	2.002	5	2.560	5	1.628
6	2.001	6	2.558	6	1.627
7	2.001	7	2.558	7	1.627
8	2.001	8	2.560	8	1.627
9	2.001	9	2.564	9	1.628
10	2.003	10	2.566	10	1.630
11	2.003	11	2.573	11	1.633
12	2.013	12	2.584	12	1.639
0-1	2.017	0-1	2.590	0-1	1.648
0-2	8.073	0-2	10.356	0-2	6.595
0-3	18.125	0-3	23.220	0-3	14.813
0-4	32.089	0-4	41.097	0-4	26.220
0-5	49.926	0-5	63.970	0-5	40.775
0-6	71.613	0-6	91.770	0-6	58.455
0-7	97.15	0-7	124.51	0-7	79.250
0-8	126.46	0-8	162.24	0-8	103.16
0-9	159.68	0-9	204.9	0-9	130.11
0-10	196.68	0-10	252.56	0-10	160.30
0-11	237.78	0-11	304.25	0-11	193.54
0-12	282.26	0-12	362.56	0-12	229.88

제작된 변압기의 동작 특성을 알아보기 위하여 계통의 사고 유형에 따른 변압기 1, 2차측 전압, 전류의 크기를 측정을 하였다. 변압기 1, 2차측 권선수비는 3:2로 설정하였고, 부하로는 50Ω 의 션트 저항을 사용하였다. 또한 입력전압의 크기는 40V로 하였고, 변압기는 Y결선 되어 중성점 직접 접지방식으로 되어 있다. 그림 3-5는 정상 부하상태에서의 전압, 전류 파형을 나타낸다. 변압기 1, 2차측 전압의 크기는 권선수비 3:2와 같은 33.7V : 22.3V를 나타내었다.

그림 3-6(a)-(d)는 각 상 사고 유형에 따른 변압기 동작특성을 나타낸다. 그림 3-6(a), (b)의 1선, 2선 지락사고와 같은 불평형 사고의 경우에는 사고상에만 전류가 흐르고 건전상에는 전류가 거의 흐르지 않음을 확인할 수 있었다. 그림 3-6(c), (d)의 평형 사고의 경우는 각 상에 같은 크기의 사고전류가 흐름을 확인할 수 있었다.

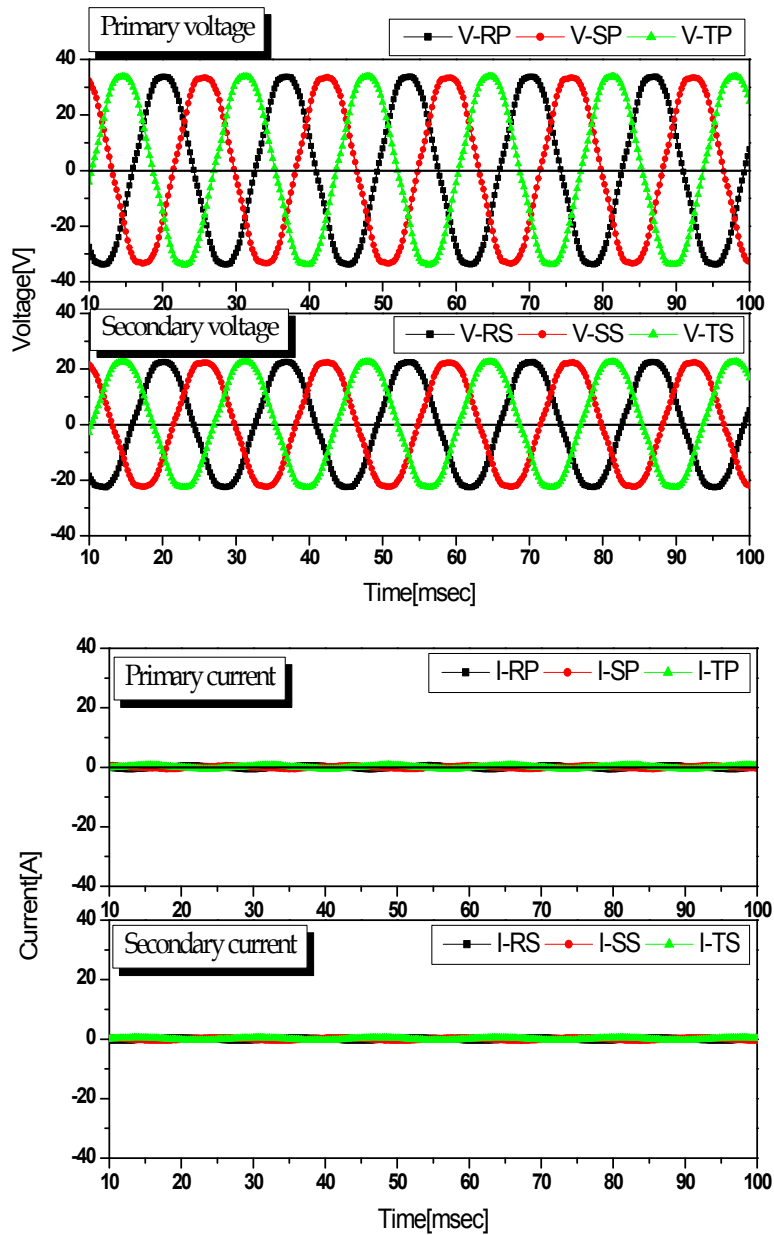
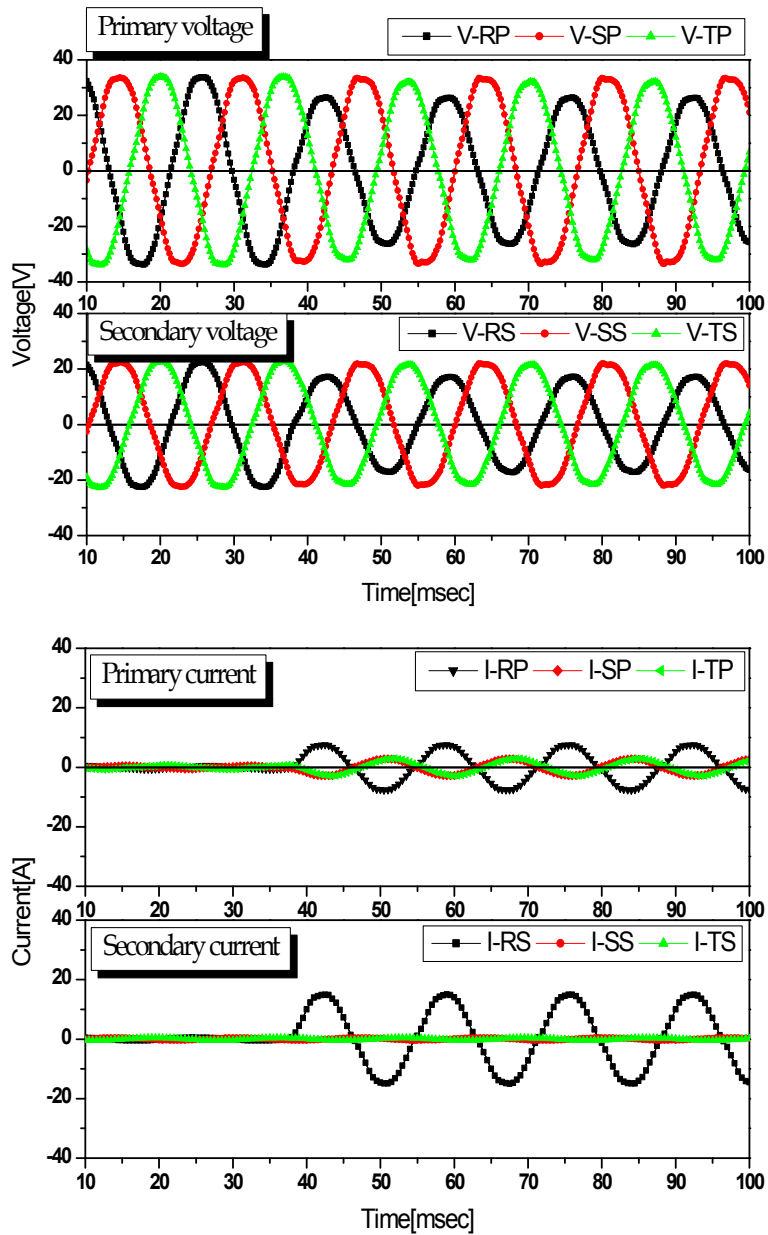


그림 3-5 정상상태에서의 변압기 전압전류 특성곡선

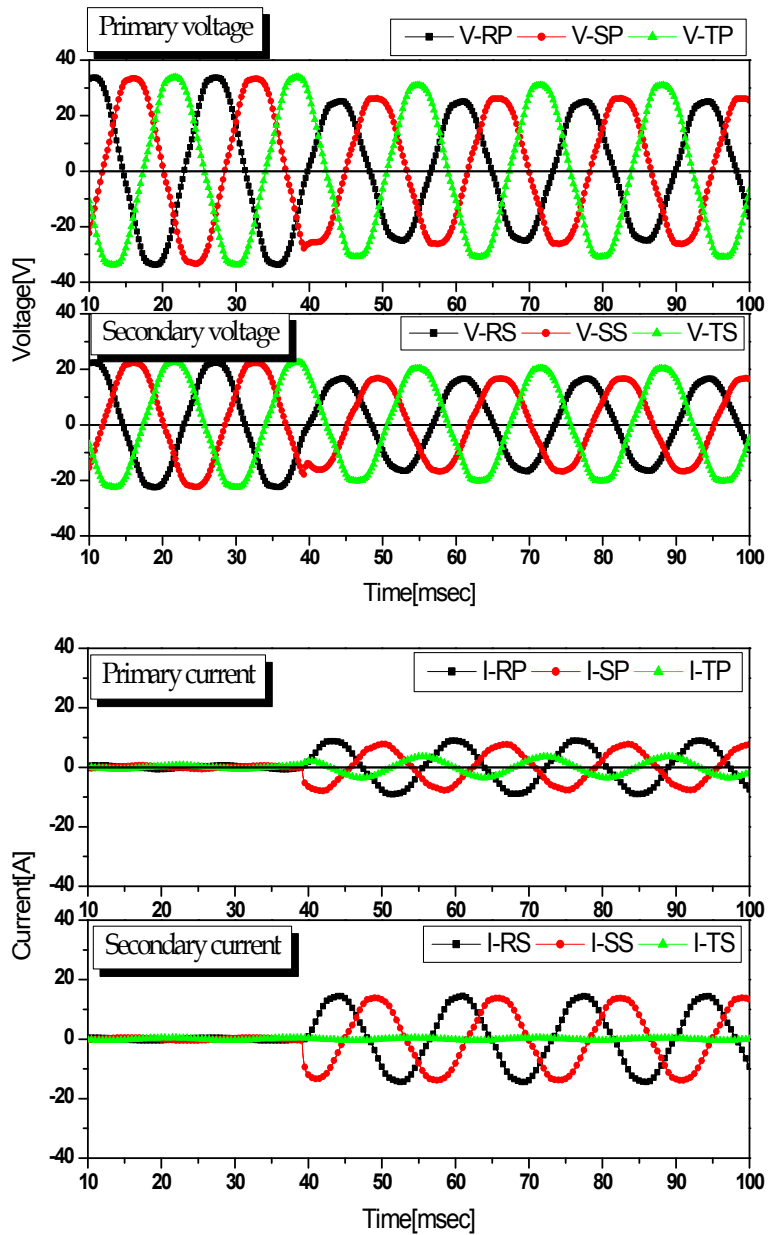
Fig. 3-5 Voltage and Current Curves of a Transformer for Normal State



(a) The Single Line to Ground Fault

그림 3-6 (계속)

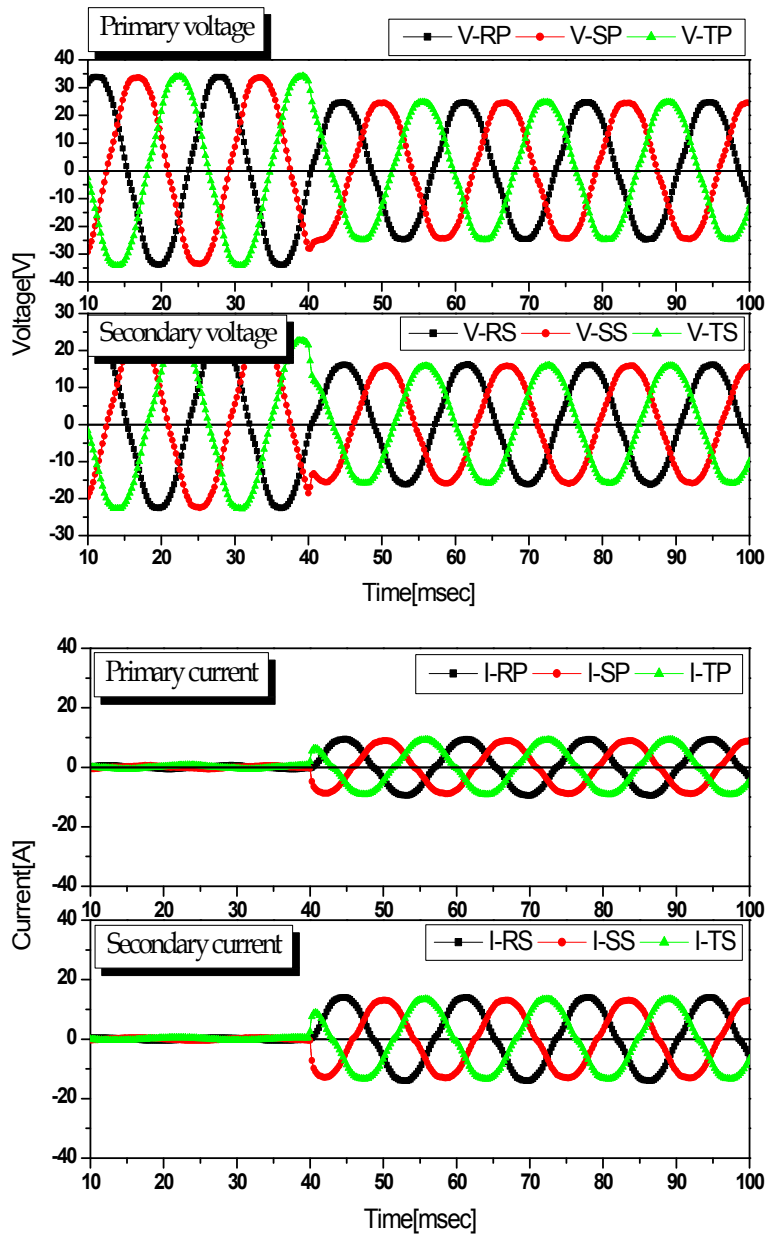
Fig. 3-6 (Continued From the Previous Page)



(b) The Double Line to Ground Fault

그림 3-6 (계속)

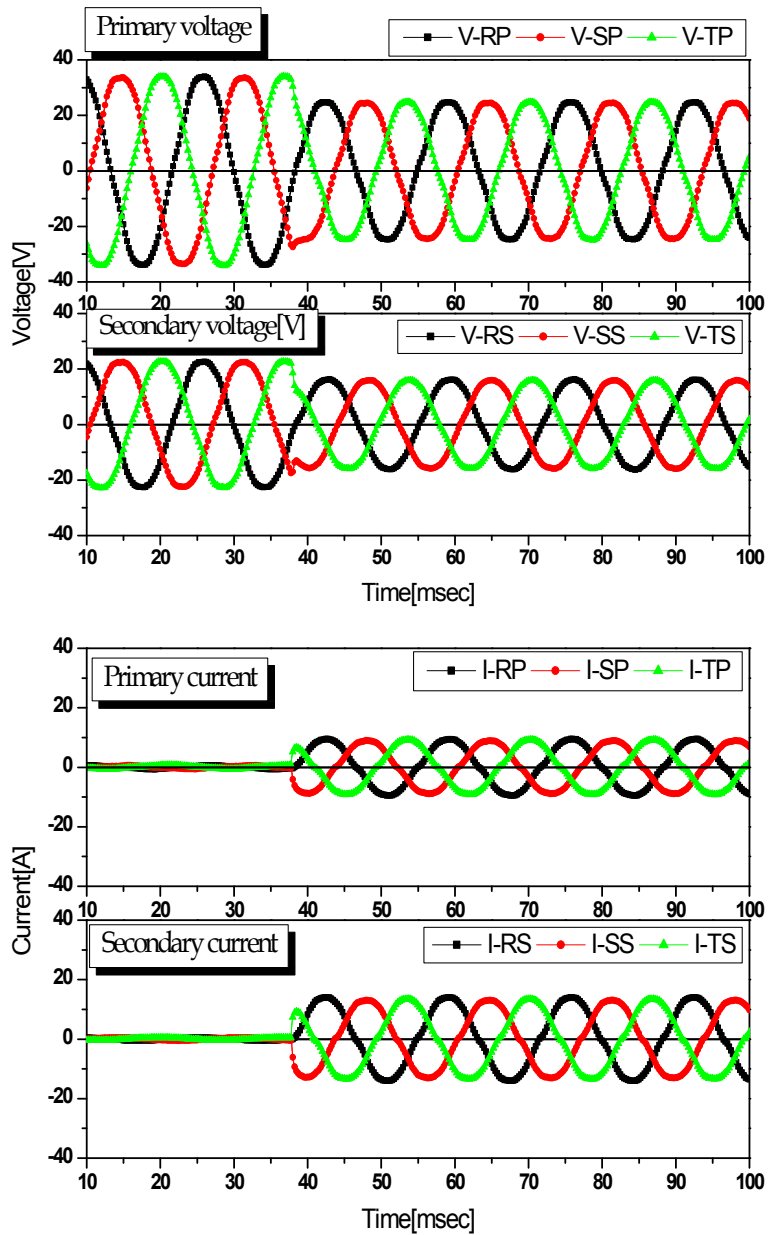
Fig. 3-6 (Continued From the Previous Page)



(c) The Triple Line to Ground Fault

그림 3-6 (계속)

Fig. 3-6 (Continued From the Previous Page)



(d) The Triple Line to Line Fault

그림 3-6 사고유형에 따른 변압기 동작특성

Fig. 3-6 Operating Characteristics according to the Fault of a Transformer

4. 전원장치

그림 3-7은 Power Supply System을 나타낸 것이고, 표 3-4는 설계사양을 나타낸 것이다. 실험은 초전도 한류소자와 결선된 선로의 안전을 위해 낮은 전압에서 점진적으로 높은 전압으로 증가시켜야 하므로 Tap을 두어 전압 조정을 용이하게 하였다. 메인 변압기의 출력을 Magnetic Contactor를 사용하여 전압조정 하였고, Magnetic Contactor의 Control은 전원장치 Panel전면에 로터리 스위치를 이용하여 Control 할 수 있게 하였다.

표 3-4 전원장치 설계사양

Table 3-4 Design Parameters of a Power Supply System

	Parameter	Value
1	Rated voltage	380V
2	Constant	3Ø 60Hz
3	Rated current	150A
4	Voltage tap	0V ~ 480V (0V, 40V, 80V, 120V, 160V, 200V, 240V, 280V, 320V, 360V, 400V, 440V, 480V)
5	Voltage error	± 3%
6	Insulation voltage	Live part and ground AC 10000V/minute
7	Insulation resistance	Live part and ground 100MΩ (2000V MEGGER)
8	Connecting method	primary Δ / secondary Y



(a) The Inside Circuit Picture



(b) Panel Front Picture

그림 3-7 전원장치
Fig. 3-7 Power Supply System

B. 실험 결과 및 검토

1. 변압기 결합형 초전도 한류기의 동작특성

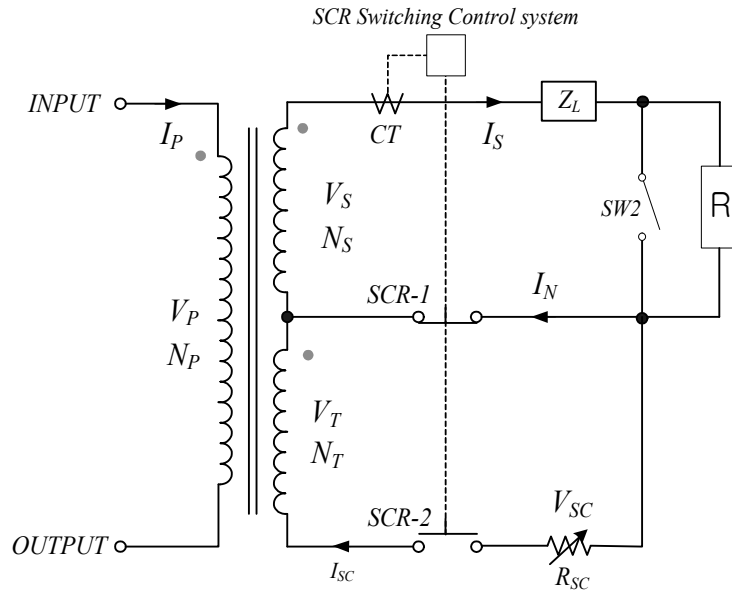


그림 3-8 단상변압기와 초전도 한류기의 등가회로도

Fig. 3-8 Equivalent Circuit of a SFCL Combined with the Single Phase Transformer

그림 3-8은 변압기에 초전도 한류기를 적용한 등가회로도를 나타낸 것이다. 정상상태를 갖는 전력망에서는 다음과 같은 조건에서 변압기의 기본동작을 수행한다. 그림 3-8에서 정상시 SCR-1은 b접점으로 단락상태이고 SCR-2는 a접점으로 개방 상태이다.

그러므로 변압기의 1차권선과 2차권선만이 회로를 구성하여 부하(R)에 권선수비에 따라 전원을 공급하게 된다. 그림 3-9는 정상상태에서 변압기의 각 권선에 따라 전압과 전류가 변성된다는 것을 확인할 수 있다. 이때 3차권선의 전류(I_T)는 SCR-2가 a접점이므로 0[A]가 되며, 전압(V_T)은 권선 수비에 따라 변성된다. SCR-2에서는 3차권선의 전압(V_T)이 유도되어 a접점으로 열려있으며, SCR-1은 b 접점으로 닫혀있다는 것을 확인할 수 있다.

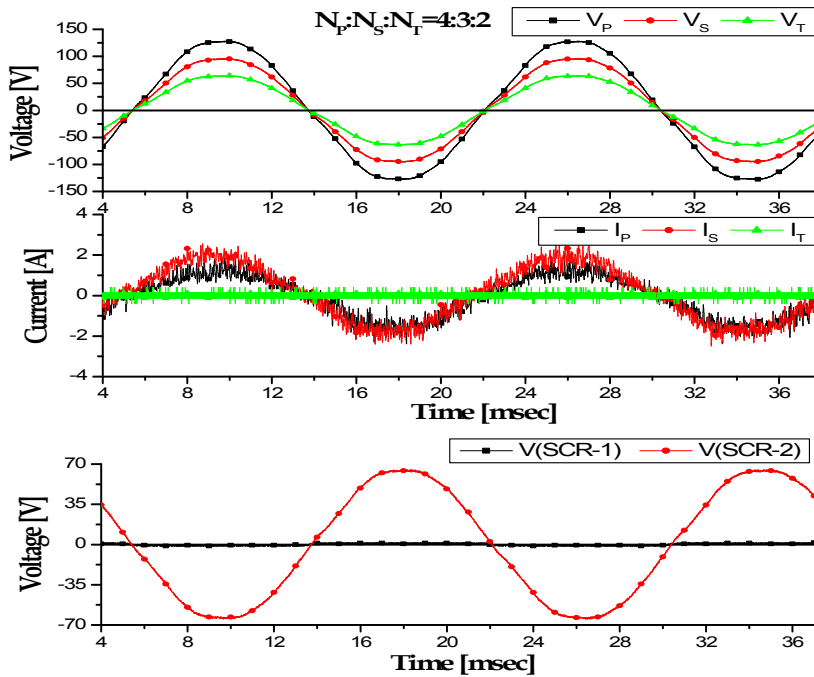


그림 3-9 정상상태에서 변압기와 SCR의 동작특성 곡선

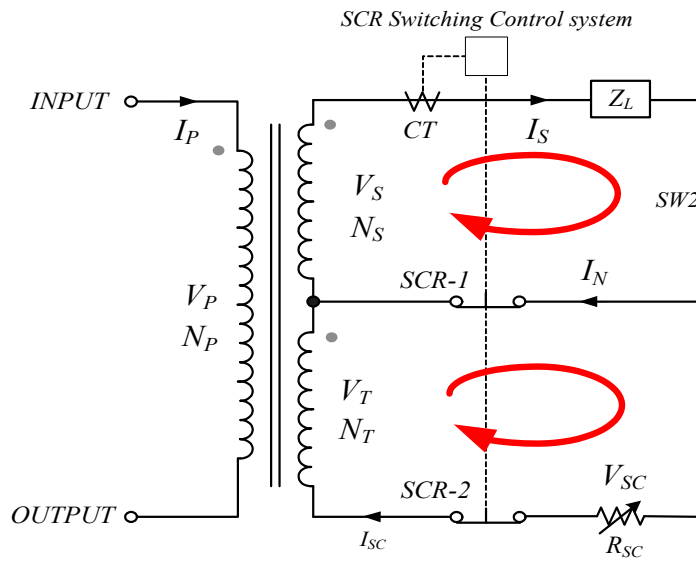
Fig. 3-9 Operating Characteristics Curves of a Transformer and a SCR to Normal State

전력망의 사고발생 후 SCR의 ON-OFF 동작특성에 따라 그림 3-10과 같이 2가지의 순차적인 동작을 수행하게 된다. 사고가 발생하면 2차권선에 흐르는 전류(I_S)의 증가분을 CT가 감지하게 된다. 이때 정상전류보다 큰 설정값 이상이 감지되면 SCR의 게이트에 신호를 인가하여 SCR-1은 b접점에서 a접점으로, SCR-2는 a접점에서 b접점으로 ON-OFF 동작을 수행하게 된다. 후자의 경우 SCR의 양단에 3차권선의 유도전압(V_T)이 가해진 상태이므로 게이트 신호의 인가에 따라 즉시 브레이크오버전압을 초과하게 되어 턴 온하게 된다.

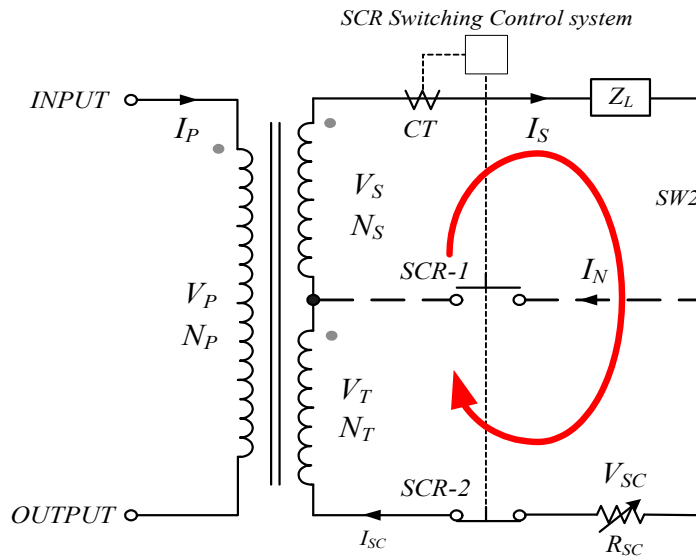
그러나 전자의 경우에는 SCR의 턴 오프 조건에 따라 게이트 신호에 의해 즉시 턴 오프하지 않는다. SCR의 턴 오프 조건은 첫 번째 소자에 역전압을 가해야 하고 두 번째 소자에 흐르는 전류를 유지전류 이하로 하여야 한다. 즉, CT에 의한 게이트 신호인가시 2차권선과 SCR-1은 폐회로를 구성하여 큰 전류가 흐르게 된다. 그러므로 첫번째 조건에 따라 SCR-1에 흐르는 전류가 0° 또는 180° 가 되어야만 턴 오프하게 된다.

CT가 SCR의 게이트에 동작신호를 인가하게 되면 SCR-2가 턴 온 되며, 동시에 SCR-1도 온 상태이어서 그림 3-10(a)와 같이 된다. 이는 사고상태의 SCR 동작특성을 나타낸 그림 3-11의 A부분에 해당된다. 초전도 소자는 0저항 상태이므로 2차권선의 전류(I_S)는 I_N 과 I_T 로 나뉘어 흐르게 된다. 이때 I_T 의 증가로 초전도 소자는 켜치되며, 소자에서 발생하는 저항에 의해 켜치 이후 I_S 는 I_N 으로 대부분 흐르게 된다.

이후 SCR-1은 여기에 흐르는 전류(I_N)이 180° 가 되는 시점에서 SCR-1은 턴 오프 한다는 것을 그림 3-11에서 확인할 수 있다. 이후 등가회로는 그림 3-10(b)과 같이 되어 2차권선과 3차권선, 초전도 소자가 직렬로 연결되는 회로를 구성하게 된다. 이로 인해 켜치된 초전도 소자에서 발생하는 저항으로 인해 사고전류(I_p)는 사고발생 반주기 이후에 제한되는 것이다.



(a) Case of a SCR 1 and a SCR 2-b contact



(b) Case of SCR 1-a contact and SCR 2-b contact

그림 3-10 SCR의 동작접점에 따른 등가회로도

Fig. 3-10 Equivalent Circuit according to the Operating Contact of a SCR

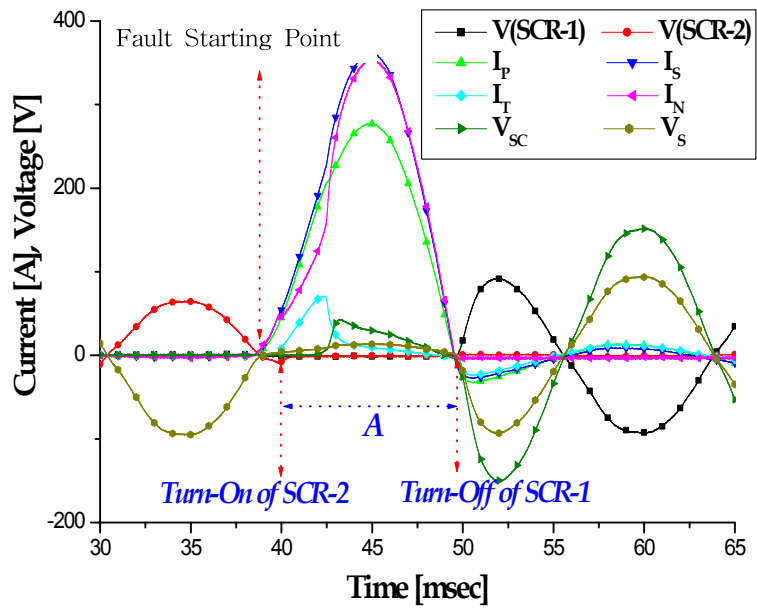


그림 3-11 사고상태에서 SCR의 동작특성 곡선

Fig. 3-11 Operating Characteristics Curves of a SCR in Fault State

변압기와 초전도 한류기를 3상으로 구성하여 실험한 결과 SCR의 턴 오프 동작 특성이 반주기 이내에 동작하는 것을 확인하였다. 이에 대한 특성곡선을 그림 3-12에 나타내었다. SCR의 턴 오프 조건은 위에서 설명하였다. 단상으로 실험한 경우 SCR에 2차 권선의 전압이 0[V]가 되는 순간 턴 오프 하였다. 그러나 3상의 경우 SCR에 흐르는 전류가 0으로 되는 순간 턴 오프 한다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 SCR의 턴 오프 조건 중 두 번째 조건을 만족하는 것으로 SCR-2에 흐르는 전류(I_N)이 0[A]로 되는 순간 턴 오프 한다.

3상의 1선 지락사고의 경우 건전상에 의해 사고상의 3차 권선에 전류가 유도된다. 그러므로 SCR-2(초기 a점접 상태)가 턴 온 되는 순간 3차 권선에 흐르는 전류가 급증하게 되므로 SCR-1에 흐르는 전류가 급감하게 되어 0[A]로 된다. 이에 SCR의 유지전류 이하로 되어 SCR-1은 턴 오프 하게 된다. 이후 동작은 단상의 경우와 동일하게 초전도 소자의 켄치로 인해 사고전류는 반주기 이내에 제한된다. 이는 그림 3-10에서 (a)의 단계를 넘어 바로 (b)의 단계에 해당된다.

그림 3-13은 SCR-1의 반주기 이후 동작과 이내 동작에 따른 사고전류 제한특성을 나타낸 곡선이다. 단상 실험의 경우 SCR의 턴 오프 조건 첫 번째 조건을 만족하는 반주기 이후 사고전류는 -33[A]로 제한된다. 그러나 반주기 이내에는 276[A]의 사고전류가 흘러 전력망에 악영향을 주게 된다. 그러나 3상 실험의 경우 건전상의 영향으로 인해 SCR의 턴 오프 조건 두 번째 조건을 만족하게 되어 사고전류를 반주기 이내에 62[A]로 제한한다는 것을 확인할 수 있다.

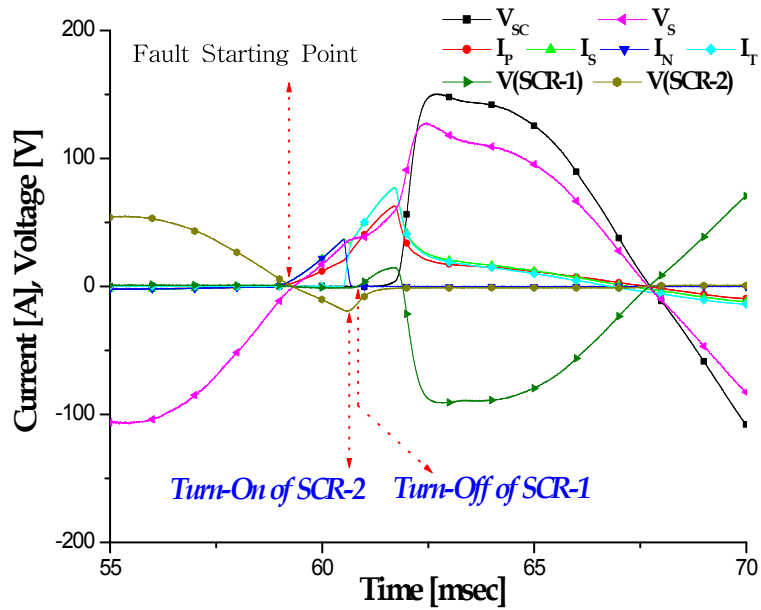
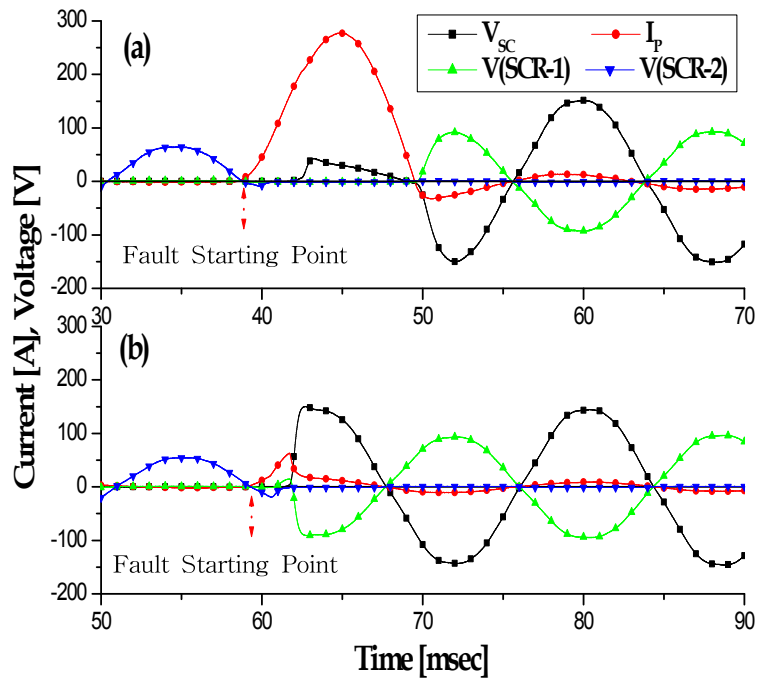


그림 3-12 1선 지락사고시 SCR의 동작특성 곡선

Fig. 3-12 Operating Characteristics Curves of a SCR in Line to Ground Fault



(a) Operating Characteristics Curves within Half a Period
 (b) Operating Characteristics Curves after Half a Period

그림 3-13 반주기 이내 및 이후 동작에 따른 특성곡선

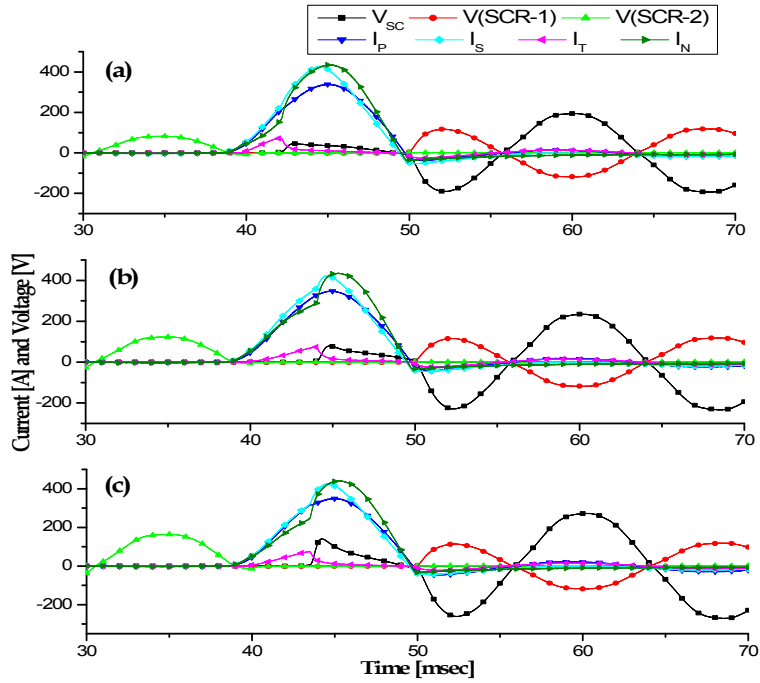
Fig. 3-13 Operating Characteristics Curves according to Half a Period

2. 2차, 3차권선 수 변화에 따른 특성

그림 3-8과 같이 단상 변압기에 초전도 한류기를 적용하여 변압기의 각 권선수비에 따른 전류제한 특성을 그림 3-14와 나타내었. 각 권선의 권선수비는 정상상태에서 변압기의 강압동작을 수행할 수 있도록 $N_P:N_S=4:3$ 으로 설정하였으며, 3차 권선(N_T)의 비를 2, 3, 4로 변화시켰다. 인가된 전압(V_0)은 200[V]로 고정하였다.

위에서 설명한 것과 같이 단상의 경우 사고발생 반주기 이내에는 전류제한 동작을 수행하지 않는다. 3차권선의 증가에 따라 초기 반주기 이내에 각각 337, 349, 350[A]의 사고전류가 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 3-10의 (a)상태와 같이 2차권선의 회로가 폐로 되기 때문에 큰 전류가 흐르게 된다. 이후 b접점을 갖는 SCR-1에 흐르는 전류(I_N)가 0[A]로 되는 순간 a접점으로 턴 오프 한다. 이때 3차권선이 증가함에 따라 흐르는 전류(I_T)가 지연되고, 이로 인해 동작하는 초전도 소자의 켄치 시점도 지연된다는 것을 확인할 수 있다.

SCR-1의 턴 오프로 인해 사고발생 반주기 이후 제한된 사고전류는 권선수 증가에 따라 각각 -38, -41, -45[A]이었다. 이는 2차권선과 3차권선이 직렬로 연결되어 인덕턴스가 증가하기 때문에 SCR-1에 흐르는 전류(I_N)가 지연되어 턴 오프 시점이 지연된다. 이로부터 반주기 이후의 사고전류 제한시점이 지연되어 사고전류가 증가하는 것이다.



(a) $N_p:N_s:N_T=4:3:2$, (b) $N_p:N_s:N_T=4:3:3$, (c) $N_p:N_s:N_T=4:3:4$

그림 3-14 3차권선수 변화에 따른 단상 초전도 한류기의 동작특성 곡선
(강압용 변압기)

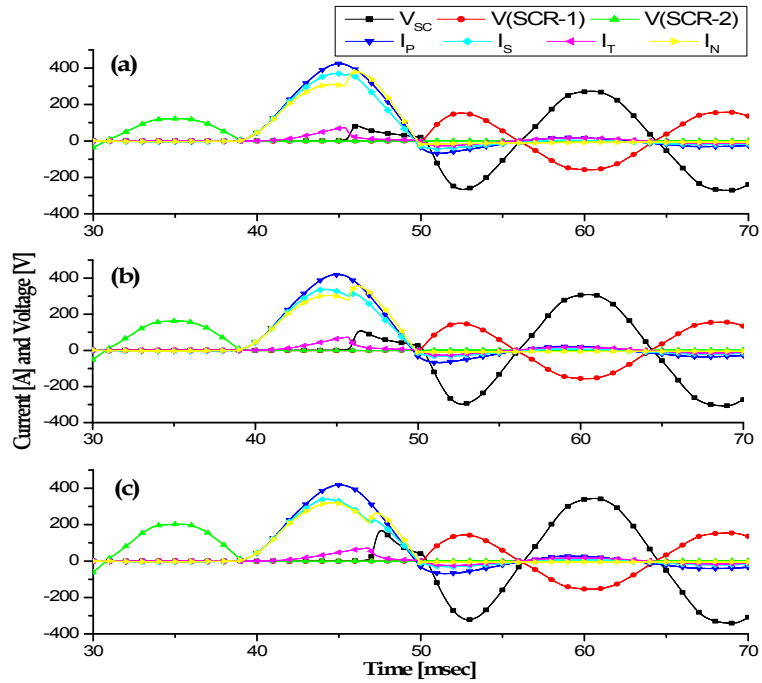
Fig. 3-14 Operating Characteristics Curves according to
Turn's Ratio of a SFCL(Turn's Ratio $N_p:N_s:N_T=4:3:2, 3, 4$)

그림 3-15는 1·2차권선의 권선수비를 $N_p:N_s=4:4$ 으로 설정하여 정상상태에서 변압기가 1:1로서 전압강하 보상용으로 동작하도록 설정하였으며, 3차권선(N_T)의 비를 3, 4, 5로 변화시켰다.

정상상태에서 강압동작을 수행하는 그림 3-14와 같이 동일하게 사고발생 반주기 이전에는 제한동작을 수행하지 못하고 사고전류가 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 사고발생 반주기 동안의 사고전류는 3차권선의 증가에 따라 각각 425, 421, 419[A] 흘렀다. 이는 그림 3-10의 (a)상태와 같이 2차권선의 회로가 폐로되기 때문에 큰 전류가 흐르게 된다. 이후 b접점을 갖는 SCR-1에 흐르는 전류(I_N)가 0[A]로 되는 순간 a접점으로 턴 오프 하여 반주기 이후 사고전류는 각각 -67, -68, -69[A]로 제한되었다. 이는 그림 3-14와 비교하여 2차권선과 3차권선의 직렬연결에 따라 초전도 소자의 전압이 증가하게 되며, SCR의 턴 오프시 이 전압의 극성 전환에 지연이 발생하기 때문에 초전도 소자의 전류제한 동작이 늦어지는 것이다.

그림 3-16은 2차권선과 3차권선의 변화에 따른 초전도 소자의 저항 및 소비 전력곡선을 나타낸 것이다. 3차권선의 비가 증가할수록 초전도 소자의 켄치 시점이 늦어진다는 것을 그림 3-16(a)에서 확인할 수 있다. 또한 2차권선의 비가 클수록, 즉 변압기가 정상상태에서 전압강하 보상용으로 동작할 때 소자의 켄치 시점이 더 늦어진다는 것을 확인하였다. 이는 3차 권선비의 증가로 임피던스가 증가하여 이에 흐르는 전류의 증가가 감소하기 때문에 초전도 소자의 임계전류 도달시간이 늦어지는 것이다.

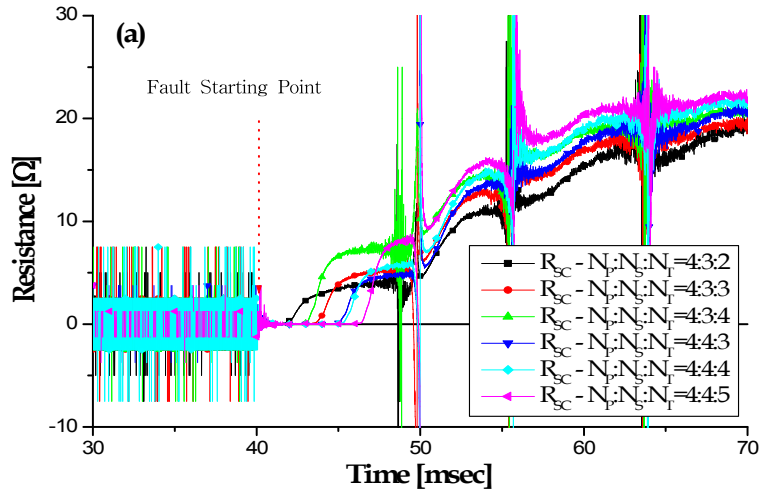
2차와 3차권선비의 증가는 또한 유도되는 전압의 증가를 의미한다. 사고발생 반주기 이후 그림 3-10(b)와 같이 2차와 3차권선, 초전도 소자가 직렬로 연결된다. 그러므로 초전도 소자의 전압이 증가하여 소자의 소비전력이 증가하게 된다. 그림 3-16(b)에서와 같이 권선수비의 증가에 따라 초전도 소자의 소비 전력이 증가한다는 것을 확인할 수 있다.



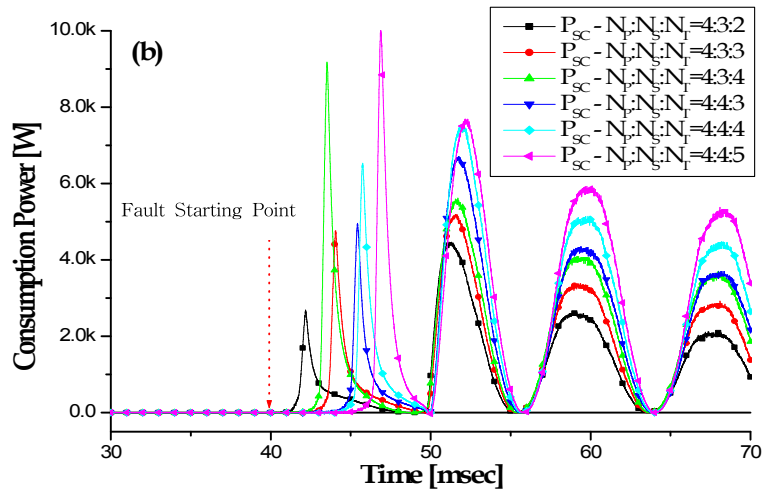
(a) $N_p:N_s:N_T=4:4:3$, (b) $N_p:N_s:N_T=4:4:4$, (c) $N_p:N_s:N_T=4:4:5$

그림 3-15 3차권선수 변화에 따른 단상 초전도 한류기의 동작특성 곡선
(전압보상용 변압기)

Fig. 3-15 Operating Characteristics Curves according to
Turn's Ratio of a SFCL(Turn's Ratio $N_p:N_s:N_T=4:4:3, 4, 5$)



(a) Resistance Curves of Superconducting Elements



(b) Consumption Power Curves of Superconducting Elements

그림 3-16 권선수 변화에 따른 단상 초전도 한류기의 저항 및 소비 전력곡선

Fig. 3-16 Resistance and Consumption Power Curves according to Turn's Ratio of a SFCL

3. 변압기 결합형 초전도 한류기의 용량증대 방안

초전도 한류기는 전력망에 적용하기 위해 초전도 소자의 용량증대를 위한 방안 모색이 중요하다. 초전도 소자의 용량증대는 기본적으로 직·병렬연결을 통해 이뤄진다. 그러나 불균일한 임계특성을 갖는 초전도 소자는 직·병렬연결 시 불균형 켄치가 발생하게 된다. 이에 변압기의 3차 권선과 초전도 소자의 연결방법을 통해 균형적인 켄치를 유도하기 위한 방안을 모색하여 일반적인 저항형 초전도 한류기와 비교하고자 한다.

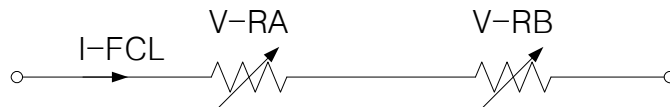


그림 3-17. 저항형 초전도 한류기 등가회로도

Fig. 3-17 Equivalent Circuit of a Resistive Type SFCL

그림 3-17은 저항형 초전도 한류기이다. 초전도 소자 2개를 직렬로 연결하였으며, 전압은 200V인가하였다. 그림 3-18은 저항형 초전도 한류기에서 초전도 소자의 전압곡선을 나타낸 것이다. 그림 3-18를 보면 사고발생 시 불균형 켄치로 인한 2개의 초전도 소자 중 하나의 초전도 소자 전압만 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 3-19의 임계전류 곡선에서 나타난 것처럼 각각의 임계전류값이 19.2, 22.1[A]로 차이가 나기 때문에 RA의 초전도 소자만이 켄치되어 전압이 증가하는 것이다. 또한 그림 3-20의 초전도 소자의 전력곡선을 보면 전압곡선과 마찬가지로 전력량의 차이를 가지게 된다. 이 또한 하나의 초전도 소자만이 켄치되어 많은 전력량을 소비하기 때문이다.

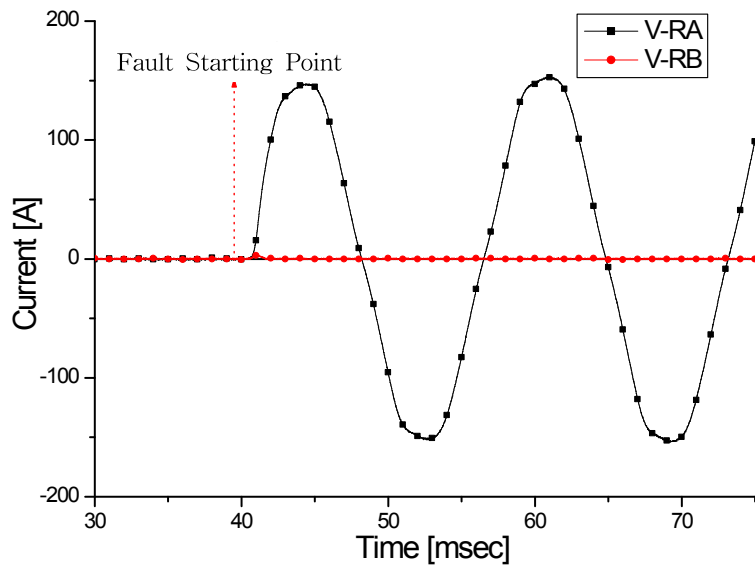


그림 3-18 저항형 초전도 한류기의 초전도 소자 전압곡선
 Fig. 3-18 Voltage Curves of a Resistive Type SFCL

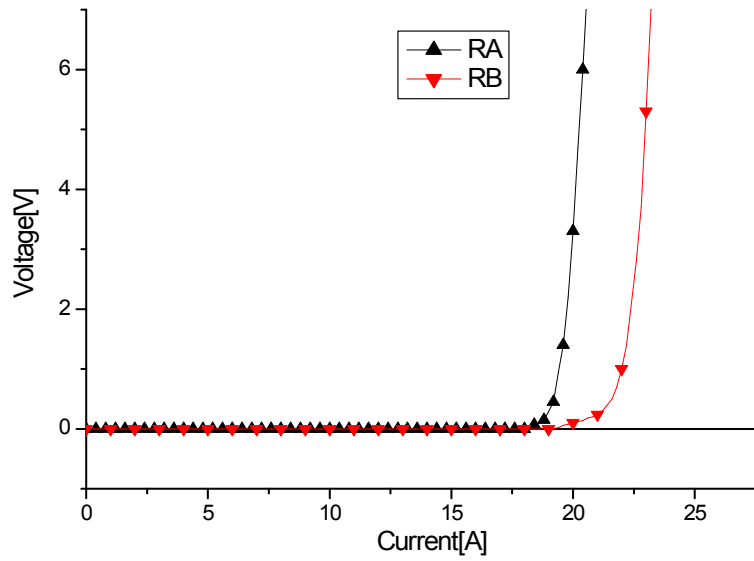


그림 3-19 초전도 소자의 V-I 곡선

Fig. 3-19 V-I Curves of Superconducting Units

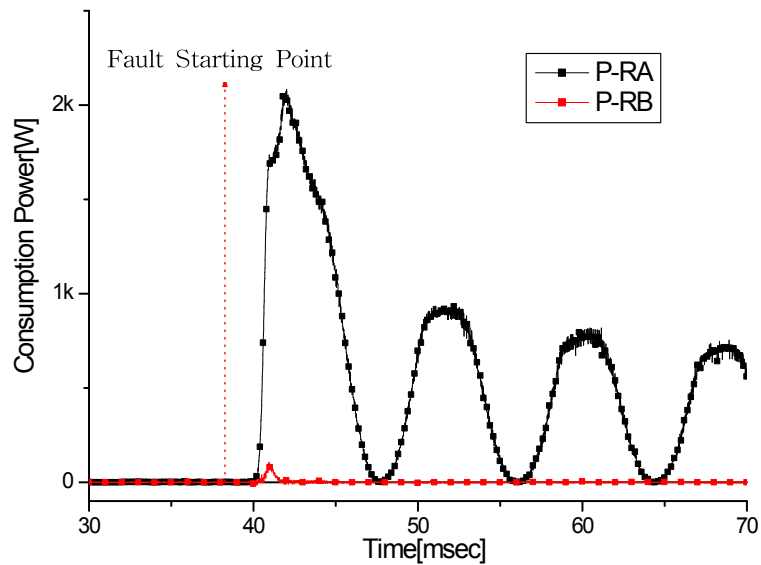


그림 3-20 저항형 초전도 한류기의 소비 전력곡선

Fig. 3-20 Consumption Power Curves of a Resistive Type SFCL

이러한 초전도 소자 불균형 켄치특성은 전력부담의 불균형 문제를 야기시킨다. 이는 용량 증대시 임계전류가 낮은 특성 초전도 소자에 전력부담이 증가하게 된다. 변압기와 초전도 한류기가 융합된 경우 저항형 초전도 한류기와 동일한 용량 증대방법을 적용할 경우 위의 분석결과와 동일한 문제가 발생하게 된다. 이에 초전도 소자의 불균형 켄치특성을 해결하기 위해 그림 3-21과 같이 변압기의 3차 권선과 SCR-a를 이용하여 초전도 소자를 직렬로 연결하였다. 정상상태에서 SCR-1~3의 동작은 다음과 같은 조건에서 변압기의 기본적인 변압동작을 수행한다.

전력망의 사고발생 후 SCR의 ON-OFF 동작특성에 따라 그림 3-22과 같이 2가지의 순차적인 동작을 수행한다. 사고 발생 시 2차 권선에 흐르는 전류(I_s)의 증가분을 CT가 감지하게 된다. 이때 설정값 이상이 감지되면 SCR의 게이트에 신호를 인가하여 SCR-1은 b점점에서 a점점으로, SCR-2와 3은 a점점에서 b점점으로 ON-OFF 동작을 수행한다.

CT가 SCR의 게이트에 동작신호를 인가하게 되면 SCR-2와 3이 턴 온 되며, 동시에 SCR-1은 온 상태를 유지되면서 그림 3-22 (a)와 같이 된다. 반주기 이내에 초전도 소자는 0저항 상태이므로 2차권선의 전류(I_s)는 I_T 와 I_{T1} , I_{T2} 로 나뉘어 흐르게 된다. 이때 I_{T1} 과 I_{T2} 에 전류 증가로 초전도 소자는 켄치가 되고 켄치된 소자에서 발생하는 저항에 의해 대부분의 전류는 I_T 로 흐르게 된다. 반주기 이후 그림 3-22(b)와 같이 SCR-1은 턴 오프가 되면 2차권선과 3차권선, 4차권선의 초전도 소자가 병렬로 연결되는 회로가 구성된다. 이로 인해 반주기 이후에 사고전류는 제한된다.

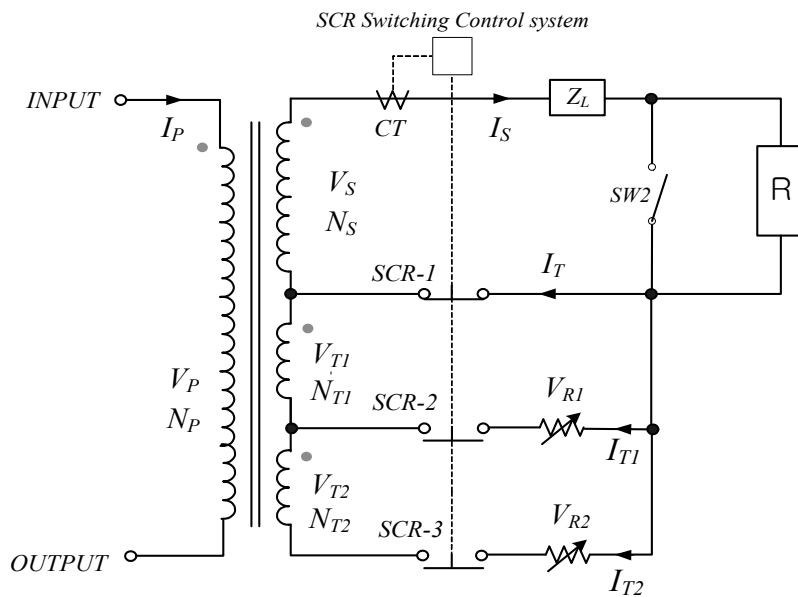
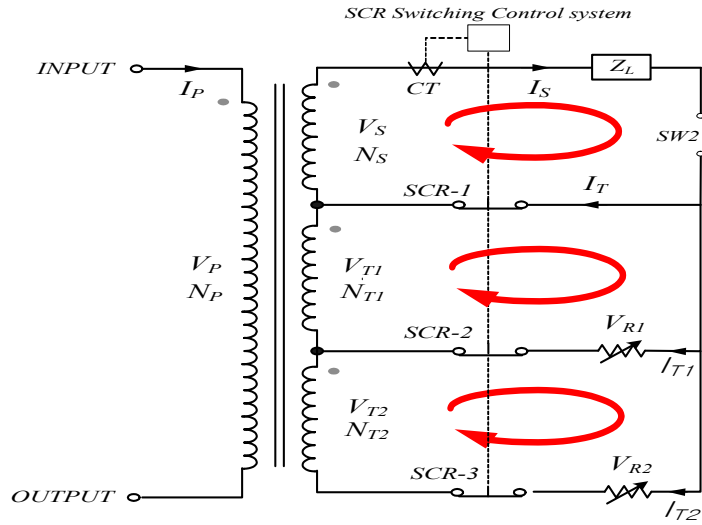
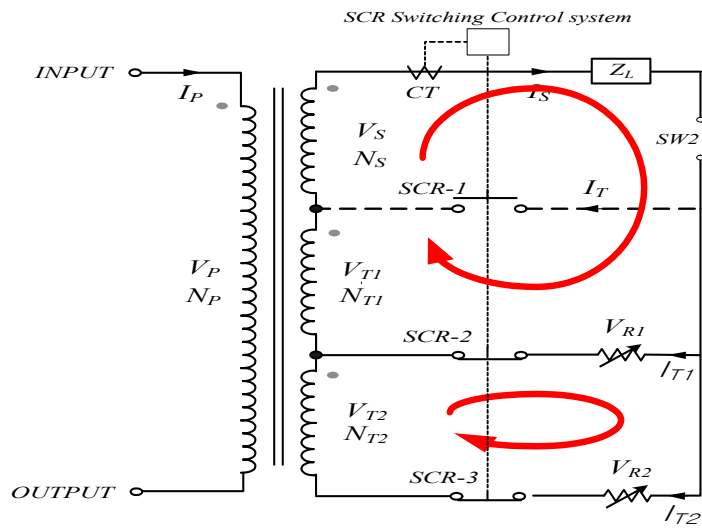


그림 3-21 단상변압기와 초전도 한류기의 등가회로도
 Fig. 3-21 Equivalent Circuit of a SFCL Combined with
 the Single Phase Transformer



(a) Case of SCR 1 and SCR 2 and SCR 3-b contact



(b) Case of SCR 1-a contact and SCR 2, SCR 3-b contact

그림 3-22 SCR의 동작접점에 따른 등가회로도

Fig. 3-22 Equivalent Circuit according to a Contact point of a SCR

그림 3-21과 같은 단상 변압기와 초전도 한류기를 구성하여 변압기의 각 권선 수비에 따른 전류제한특성을 그림 3-24와 같이 분석하였다. 각 권선의 권선수비는 정상상태에서 변압기의 강압동작을 수행할 수 있도록 $N_P:N_S=4:3$ 으로 설정하였으며, 3차, 4차권선($N_{T1}:N_{T2}$)을 1:1, 2:2, 3:3으로 변화시켰다. 인가된 전압(V_P)은 200V로 고정하였다. 앞에서 설명한 것과 같이 단상의 경우 사고발생 반주기 이내에는 전류제한 동작을 수행하지 않는다. 3차, 4차권선의 증가에 따라 초기 반주기 이내의 사고전류는 334, 340, 346[A]가 흐른다는 것을 확인할 수 있다.

이는 그림 3-22(a)상태와 같이 2차회로가 폐로되기 때문에 큰 전류가 흐르게 된다. SCR-1의 턴 오프로 인해 사고발생 반주기 이후 제한된 사고전류는 권선수 증가에 따라 각각 -38, -39, 52[A]이었다. 이는 2차권선, 3차, 4차권선이 병렬로 연결되어 인덕턴스가 증가하기 때문에 SCR-1에 흐르는 전류(I_T)가 지연되어 턴 오프 시점이 지연된다. 반주기이내에는 초전도 소자의 임계전류의 차이로 켄치 시점이 다르지만 반주기 이후에는 초전도 소자의 전압크기는 다르지만 같은 시간에 전압이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-25는 1, 2차권선의 권선수비를 $N_P:N_S=4:4$ 로 설정하여 정상상태에서 변압기가 전압강하 보상용으로 동작하도록 설정하였으며, 3차, 4차권선($N_P:N_S$)을 1:1, 2:2, 3:3으로 변화시켰다.

그림 3-22(a)와 같이 사고발생 반주기 이전에는 제한동작을 수행하지 못하고 사고전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 사고발생 반주기 동안의 사고전류는 426, 420, 421[A] 흘렀다. 이는 그림 3-22(a)상태와 같이 2차권선의 회로가 폐로되기 때문에 큰 전류가 흐르게 된다. 이후 SCR-1이 b접점에서 a접점으로 턴 오프 되어 반주기 이후에 사고전류가 각각 -77, -87, -88[A]로 제한되었다. 이 또한 그림 3-23과 같이 반주기 이내에 초전도 소자전압이 발생을 하는데 초전도 소자의 임계전류 값의 차이 때문에 약간에 차이를 보인다. 하지만 반주기 이후 초전도 소자전압은 같은 시간 때에 증가하고 사고전류가 낮게 제한되는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-26은 각 권선의 권선수비는 정상상태에서 변압기가 승압동작을 수행할 수 있도록 $N_P:N_S=4:5$ 로 설정하였으며, 3차권선(N_{T1})과 4차권선(N_{T2})을 1:1, 2:2, 3:3으로 변화시켰다.

앞에서 설명하였던 그림 3-24와 3-25와 같이 동일하게 사고발생 반주기 이전에는 제한동작을 수행하지 못하고 사고전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 사고발생 반주기 동안의 사고전류는 각각 404, 408, 414[A] 흘렀다. 이는 그림 3-22(a)와 같이 2차권선의 회로가 폐로되기 때문에 큰 전류가 흐르게 된다. 이후 SCR-1이 b 접점에서 a접점으로 턴 오프 하여 반주기 이후 사고전류는 각각 -90, -80, -95[A]로 제한하였다. 이는 2차권선 회로가 폐로 되었을 때 3차, 4차권선의 초전도 소자가 켜치되어 약간의 저항이 발생하여 사고전류가 2차권선 회로로 흐르게 되어 반주기 이전에는 제한이 되지 않는다.

하지만 반주기 이후에 그림 3-22(b)와 같은 상태가 되어서 초전도 소자에 전압이 발생하여 사고전류를 제한하는 것이다. 또한 반주기 이후에 2개의 초전도 소자 전압이 같은 시간에 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 반주기 이후보다 전압이 증가하는 것은 초전도 소자에 발생하는 저항의 크기가 더 크게 발생하기 때문에 전압이 크게 발생하는 것이다.

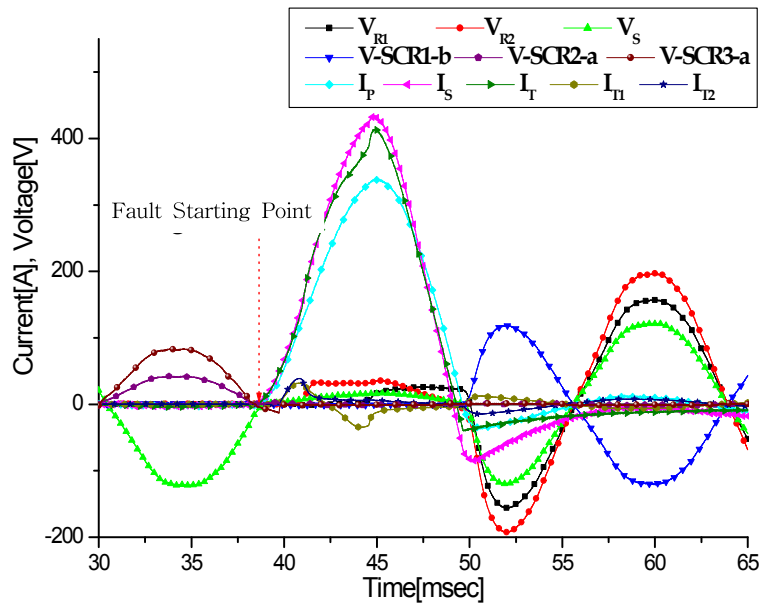
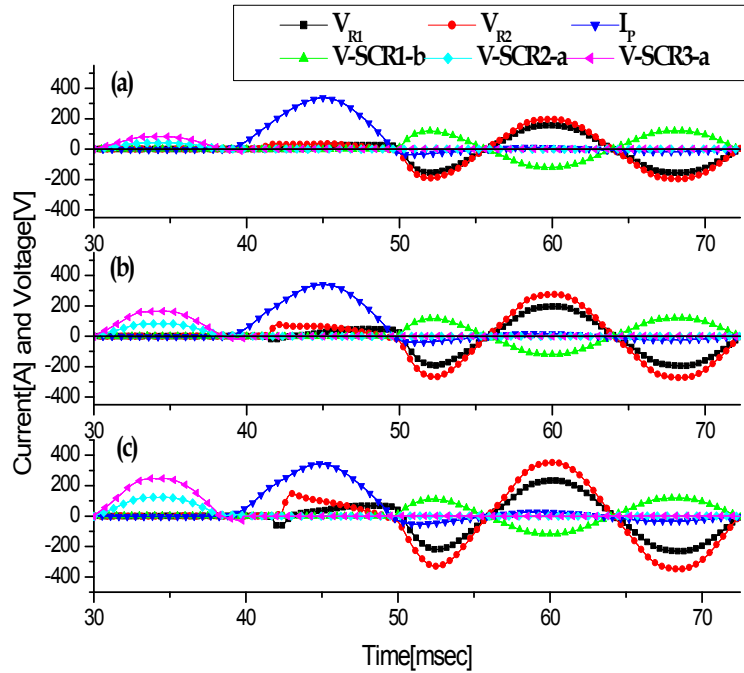


그림 3-23 사고상태에서 SCR의 동작특성 곡선

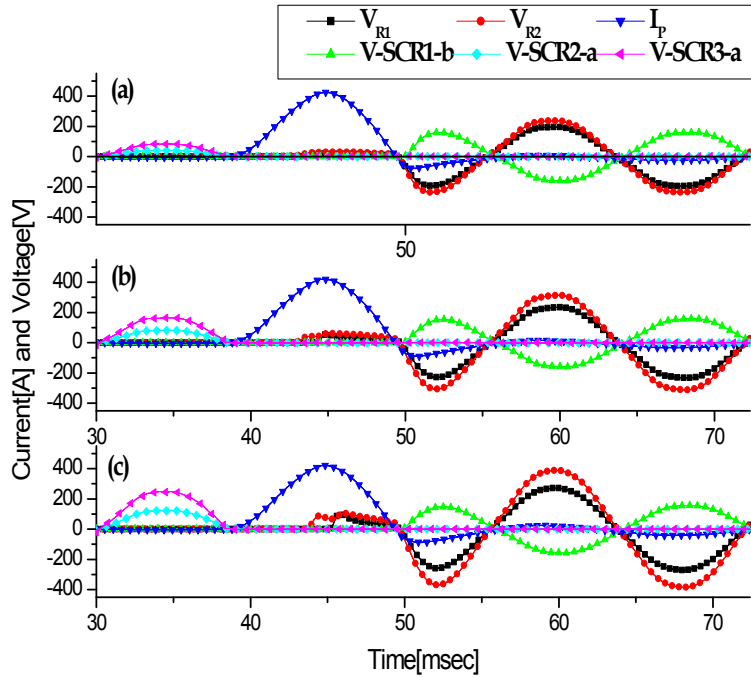
Fig. 3-23 Operating Characteristics Curves of a SCR in Fault State



(a) $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:3:1:1$ (b) $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:3:2:2$ (c) $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:3:3:3$

그림 3-24 권선수 변화에 따른 단상 초전도 한류기의 동작특성 곡선
(강압용 변압기)

Fig. 3-24 Operating Characteristics Curves according to Turn's Ratio
of a SFCL(Turn's Ratio of a Transformer for Step down
 $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:3:1:1, 2:2, 3:3$)

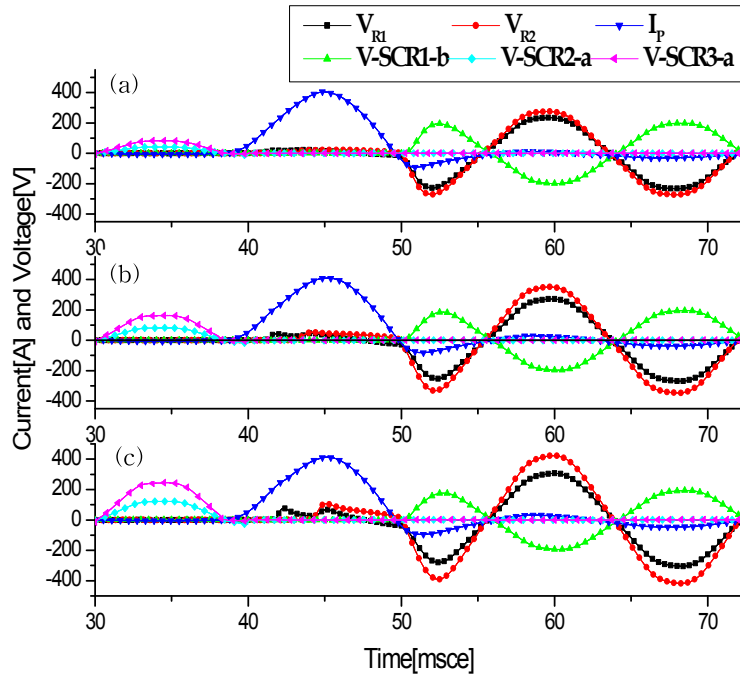


(a) $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:4:1:1$ (b) $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:4:2:2$ (c) $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:4:3:3$

그림 3-25 권선수 변화에 따른 단상 초전도 한류기의 동작특성 곡선
(전압보상용 변압기)

Fig. 3-25 Operating Characteristics Curves according to Turn's Ratio
of a SFCL(Turn's Ratios of a Transformer for Voltage Drop or Modifier

$N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:4:1:1, 2:2, 3:3$)



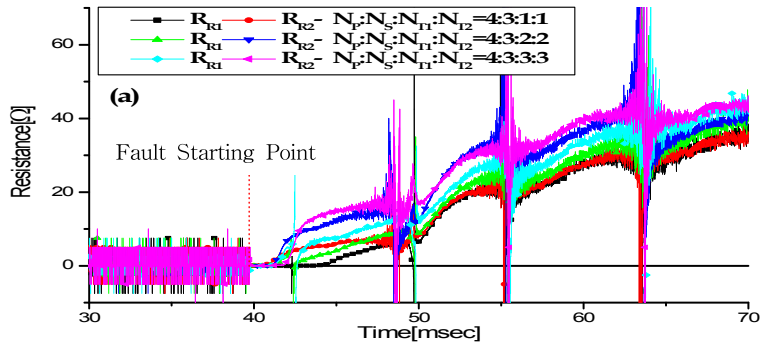
(a) $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:5:1:1$ (b) $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:5:2:2$ (c) $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:5:3:3$

그림 3-26 권선수 변화에 따른 단상 초전도 한류기의 동작특성 곡선
(승압용 변압기)

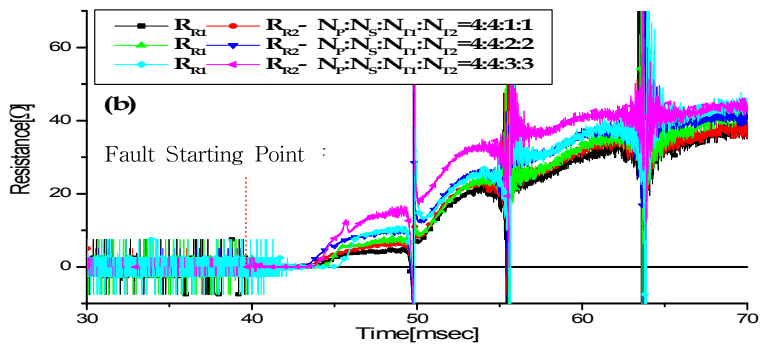
Fig. 3-26 Operating Characteristics Curves according to Turn's Ratio
of a SFCL(Turn's Ratio of a Transformer for Step up
 $N_P:N_S:N_{T1}:N_{T2}=4:5:1:1, 2:2, 3:3$)

그림 3-27은 3차 권선과 4차 권선의 변화에 따른 초전도 소자의 저항곡선을 나타낸 것이다. 3차, 4차 권선의 비가 증가할 수록 초전도 소자의 켄치 시점이 늦어지는 것을 그림 3-27에서 확인할 수 있다. 그리고 2차권선의 비가 클수록, 소자의 켄치 시점이 늦어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 반주기 이후 저항값이 더 증가하여 전압이 비례적으로 증가하고 반대로 전류는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 반주기 이전에는 그림 3-22(a)와 같이 2차권선에 폐회로가 생겨서 초전도 소자에 약간에 저항이 발생하여 사고전류가 2차권선 쪽으로 흐르게 되어 전압이 낮게 발생하지만, 반주기 이후 그림 3-22(b)와 같이 초전도 소자에 사고전류가 흘러서 초전도 소자가 켄치되어 저항이 높게 발생하여 전압이 높게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

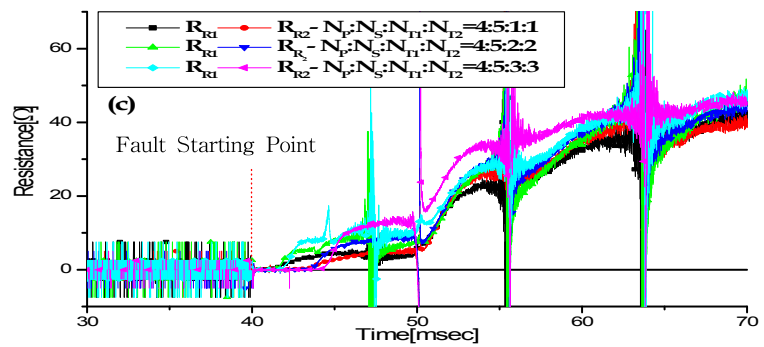
그림 3-28은 권선 수 변화에 따른 초전도 소자의 전력곡선이다. 그림3-22(b)와 같이 초전도 소자는 사고 발생 반주기 이후 전압이 증가하게 된다. 이때 그림 3-28과 같이 권선수비 증가에 따라 초전도 소자의 소비전력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3-28에서 처음 전력량이 적은 것은 사고 발생 시 반주기 이내에 초전도 소자의 전압이 낮게 발생하여 비례적으로 전력량이 낮게 발생하는 것이다. 그리고 반주기 이후에 초전도 소자전압이 증가함에 따라 전력량 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 그림 3-20에서 저항형 초전도 한류기 소비 전력곡선에서는 하나의 초전도 소자만이 전력량을 분담하였지만 변압기와 융합한 단상 초전도 한류기의 소비전력곡선에서는 두 개의 소자가 전력량을 분담하는 것을 확인할 수 있다. 또한 저항형 보다 초전도 소자의 전력량 분담이 가능하므로 용량을 크게 할 수 있는 장점을 가지는 것을 확인할 수 있었다.



(a) A Transformer for step down

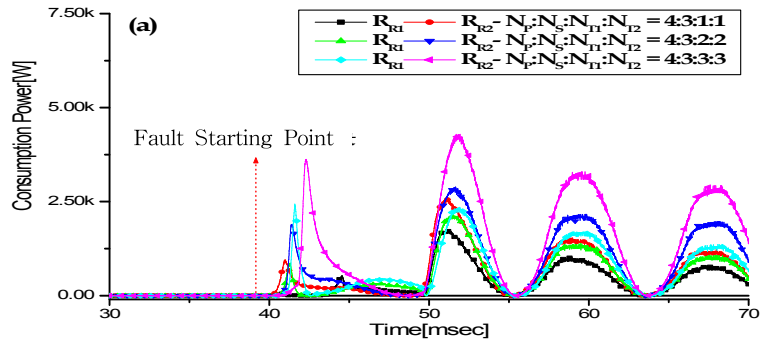


(b) A Transformer for Voltage Drop or Modifier

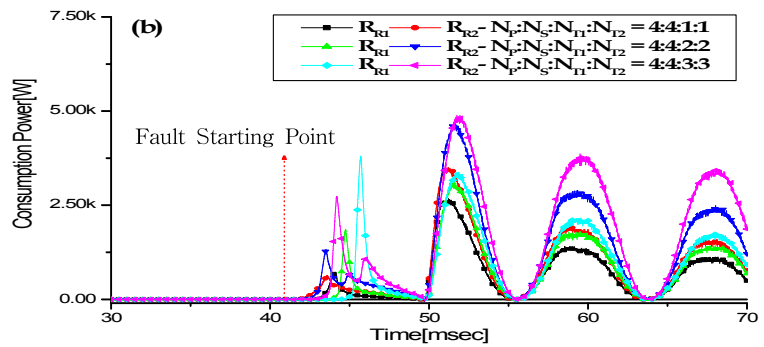


(c) A Transformer for Step up

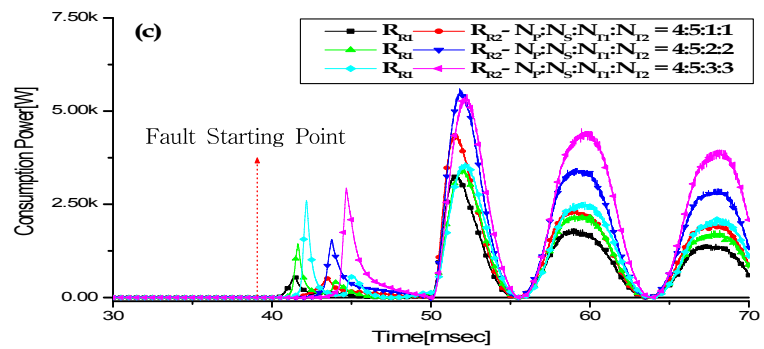
그림 3-27 권선수 변화에 따른 단상 초전도 한류기의 저항곡선
 Fig. 3-27 Resistance Curves according to Turn's Ratio of a SFCL



(a) A Transformer for step down



(b) A Transformer for Voltage Drop or Modifier



(c) A Transformer for Step up

그림 3-28 권선수 변화에 따른 단상 초전도 한류기의 소비 전력곡선
 Fig. 3-28 Consumption Power according to Turn's Ratio of a SFCL

4. 3상 초전도 한류기의 사고 유형별 특성

a. 초전도 한류기 3상 적용실험 회로도

현재 전력망에서 사용되고 있는 변압기는 1차·2차권선비에 따라 크게 3가지의 용도로 사용되고 있다. 발전소에서 발전된 6.6~24kV의 전압은 송전전력 향상 및 전력손실 감소를 위해 1차 변전소에서 345~765kV로 승압을 하게 된다. 또한 전력을 수용가까지 공급하는데 있어 장거리 송전선로의 경우 선로정수로 인해 발생하는 전압강하 보상 및 안정도 향상을 위해 조상설비를 설치할 수 있는 3권선 변압기를 이용하고 있다. 인근 수용가까지 송전된 전력은 수용가 전력공급을 위한 배전선로의 전압등급인 22.9kV로 변전소를 통해 강압하게 된다. 그리고 수용가에서 사용하는 전압인 220~380V 등으로 최종 강압되어 전력을 공급하고 있다.

전력망에서 사용되는 변압기는 그림 3-29와 같이 승압용, 전압보상용, 강압용으로 크게 나눌 수 있다. 이것은 변압기의 권선수비 조정을 통해 구분될 수 있다. 연구되고 있는 초전도 한류기는 정상상태에서 이러한 3상 변압기의 역할을 그대로 수행하게 된다. 3상 전원설비를 사용하여 정상상태에서 변압기의 1차·2차권선수비를 조정하여 위의 3가지 역할이 어떻게 수행되는지를 살펴보았다.

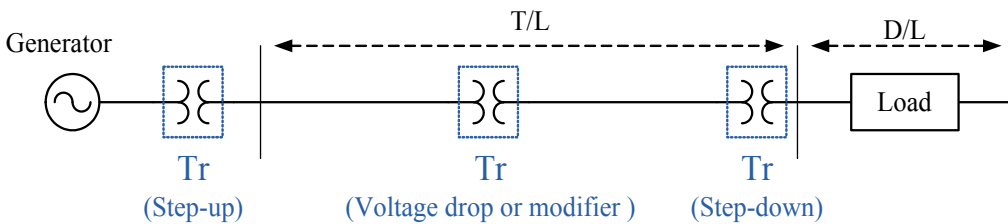


그림 3-29 전력망 개략도

Fig. 3-29 Brief Diagram of Power System

그림 3-30은 변압기와 초전도 한류기의 3상 실험을 위해 구성한 회로도이다. 3상 전원(V_R , V_S , V_T)과 수용가를 나타내는 부하(R-Load, S-Load, T-Load)는 각각 3 \emptyset Tr을 통해 Y-Y결선되어 있다. 회로도의 각 기호에 대한 설명은 다음과 같다.

- $I_{RP}(V_{RP})$, $I_{SP}(V_{SP})$, $I_{TP}(V_{TP})$: 변압기 1차권선에 흐르는 전류와 전압
- $I_{RS}(V_{RS})$, $I_{SS}(V_{SS})$, $I_{TS}(V_{TS})$: 변압기 2차권선에 흐르는 전류와 전압
- $I_{RT}(V_{RT})$, $I_{ST}(V_{ST})$, $I_{TT}(V_{TT})$: 변압기 3차권선, 각 상의 SCR-R2, SCR-S2, SCR-T2(초기 a접점 상태) 또는 초전도 소자(RSC, SSC, TSC)에 흐르는 전류와 전압
- I_{RN} , I_{SN} , I_{TN} : 각 상의 SCR-R1, SCR-S1, SCR-T1(초기 b접점 상태)에 흐르는 전류
- $V_{RSC}(R_{RSC})$, $V_{SSC}(R_{SSC})$, $V_{TSC}(R_{TSC})$: 켜진 초전도 소자의 전압과 저항
- R-CT, S-CT, T-CT : 2차 권선에 흐르는 사고전류의 감지를 위한 각 상의 변류기
- SW-R1, SW-S1, SW-T1 : 전원을 공급하기 위한 각 상의 스위치
- SW-R2, SW-S2, SW-T2 : 부하(R-Load, S-Load, T-Load) 단락을 통한 각 상의 사고발생 스위치
- R-Load, S-Load, T-Load : 수용가를 나타내는 각 상의 부하군(50[Ω] 설정)
- VR, VS, VT : 3상 공급전압

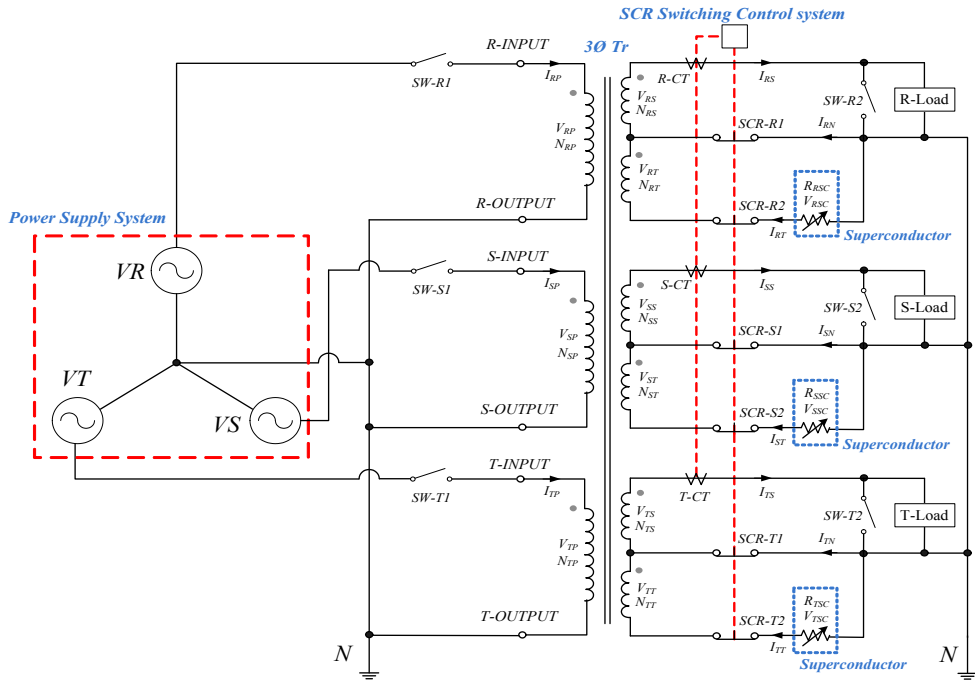


그림3-30 변압기와 초전도 한류기의 3상 실험회로도

Fig. 3-30 Experimental Circuit of a SFCL Combined with the Three Phase Transformer

전원인가 스위치를 통해 3상 전원을 공급하고 각 상의 부하를 사고발생 스위치로 단락시킴으로서 1선 지락, 2선 지락, 3선 지락, 2선 단락, 3선 단락사고를 각각 발생시켰다. 발생된 사고전류의 감지는 각 상의 2차 권선에 설치된 CT를 이용하였으며 SCR Switching Control System이 판단하여 각 상의 SCR을 동작시킨다.

또한 3상 변압기의 사용용도에 따른 특성 분석을 위해 변압기 2차와 3차 권선의 비를 조정하였으며, 이때 사고발생에 따른 사고유형별 초전도 한류기의 동작 특성을 분석하였다.

b. 변압기 사용용도에 따른 전류 제한특성

변압기의 사용용도는 크게 승압용, 전압보상용, 강압용으로 구분할 수 있다. 변압기와 초전도 한류기 형태는 정상상태에서 이 3가지의 동작을 다음 조건에 따라 수행하게 된다.

- 강압용 변압기 : $N_P > N_S$
- 전압보상용 변압기 : $N_P = N_S$
- 승압용 변압기 : $N_P < N_S$

그러므로 실험에서는 정상상태에서의 변압기 동작을 확보하기 위해 $N_P:N_S = 3:2, 3:3, 3:4$ 로 각각 설정하였다. 그림 3-31, 32, 33은 각각의 변압기 동작에 따른 1차와 2차 권선의 전류·전압특성을 나타낸 곡선이다. 1차와 2차 권선의 비에 따라 전압과 전류는 $(N_P/N_S)=(V_P/V_S)=(I_S/I_P)$ 의 방정식에 의해 결정된다. 강압용 변압기는 1차 권선의 높은 전압을 권선수비에 따라 낮은 전압으로 변압한다. 그림 3-31의 전압곡선에서 권선수비($N_P:N_S=3:2$)에 따라 각 상의 전압이 160[V]에서 106[V]로 변성된다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 전류곡선에서는 1차권선의 전류에 왜곡이 발생한다. 이것은 변압기의 자기이력 현상에 의해 고주파를 포함하는 왜곡된 여자전류가 흐르기 때문이다. 반면 2차권선의 전류는 각 상이 일정한 크기를 갖는 정현파가 흐른다는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 정상상태에서 수용가에 강압용 변압기로서 동작한다는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-32는 정상상태에서 전압보상용 변압기의 동작을 확인하기 위하여 1차와 2차권선수비($N_P:N_S$)는 1:1로 설정하여 실험한 전류·전압곡선을 나타낸 것이다. 각 상의 1·2차권선의 전압이 158[V]로 일정하여 전압보상의 역할을 수행한다는 것을 확인할 수 있다. 정상상태에서 1·2차권선의 각 상 전류곡선은 4.4[A]와 3.2[A]의 일정한 정현파가 흐르며, 1차권선에 흐르는 전류의 왜곡이 줄어들었다는 것을 알 수 있다. 이로써 정상상태에서 수용가에 전압보상용 변압기로서 동작이 원활히 이뤄진다는 것을 확인하였다.

그림 3-33은 변압기가 승압용으로 동작하는 것을 확인하기 위한 전류, 전압곡선을 나타낸 것이다. 변압기의 1·2차권선의 권선수비($N_P:N_S$)는 3:4로 설정하였다. 2차 권선수의 증가로 인해 1차권선의 전압인 155[V]가 2차 권선의 전압인 208[V]로 증가하였다. 또한 1·2차권선에 흐르는 각 상의 전류는 6.7[A]와 4.3[A]가 흘렀다.

전력망에 사용되고 있는 변압기는 크게 3가지의 용도로 쓰이고 있다. 위와 같이 초전도 한류기가 변압기와 융합되어 사고 상태에서 전류를 저감시키는 역할을 수행하기에 앞서 정상상태에서는 변압기의 용도에 따라 전압, 전류가 권선수비에 의해 흐른다는 것을 확인하였다.

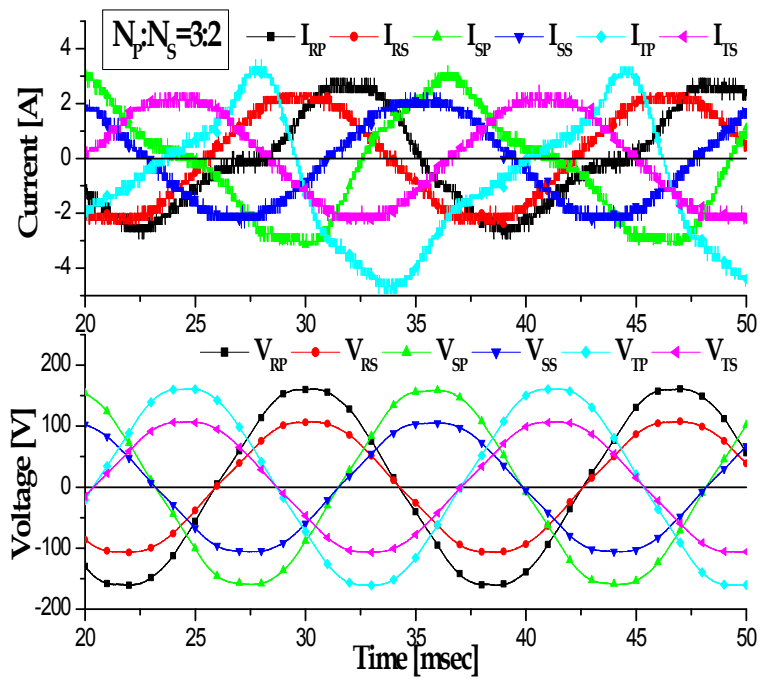


그림 3-31 강압용 변압기의 정상동작시 전류, 전압 특성곡선
 Fig. 3-31 The Current and Voltage Curves of Step down Transformer in Normal state

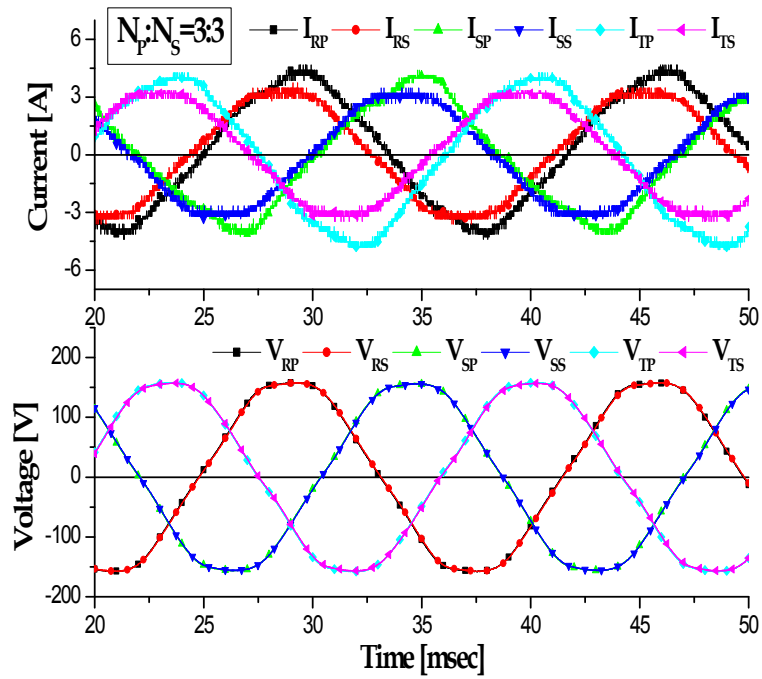


그림 3-32 전압보상용 변압기의 정상동작시 전류, 전압 특성곡선
 Fig. 3-32 The Current and Voltage Curves of Voltage Compensation Transformer in Normal State

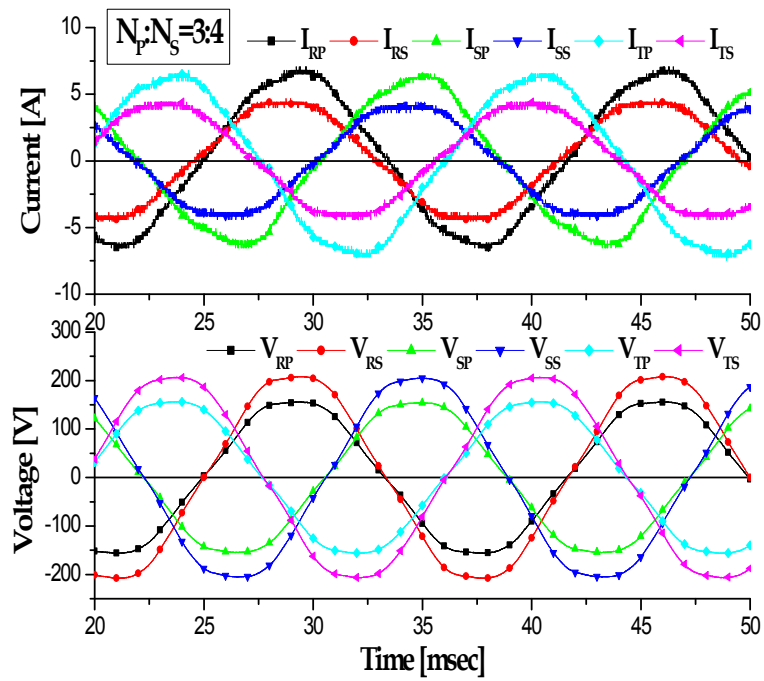


그림 3-33 승압용 변압기의 정상동작시 전류, 전압 특성곡선
 Fig. 3-33 The Current and Voltage Curves of Step up Transformer in Normal State

c. 1선 지락사고

3상으로 구성된 전력망은 사고가 발생한 상 및 유형에 따라 1선, 2선, 3선 지락 및 2선, 3선 단락사고가 발생한다. 이 중 1선 지락사고가 전체 사고 중 약 70%를 차지하고 있다. 변압기의 변성동작 수행과 사고전류 제한동작을 동시에 수행하는 초전도 한류기의 동작특성을 분석하기 위해 그림 3-30과 같은 3상 초전도 한류기를 구성하여 3가지의 사고유형에 따른 동작특성을 분석하였다.

그림 3-34는 전력망에서 가장 많이 사용되는 변압기 용도인 강압용 변압기의 권선수비($N_P:N_S:N_T=3:2:1$)로 설계하여 1선 지락사고(R상)시 각 상의 사고전류와 전압곡선을 나타낸 것이다. 3상의 인가전압은 200[V]로 하였다. 사고상인 R상의 사고전류는 사고발생 반주기 이내에 62[A]로 제한되었다. 건전상인 S와 T상의 경우 3상 일체화된 변압기의 사용으로 사고상에 흐르는 전류가 건전상에 자속의 영향을 주어 약간 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 각 상의 권선에서 발생하는 1차, 2차, 3차권선의 전압은 사고발생 반주기 동안에 약간의 왜곡이 발생하나 이후의 전압은 정상상태의 전압과 거의 같은 값으로 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 사고발생 반주기 이후 사고전류가 11[A]로 제한됨으로서 정상상태에서의 전류인 2.7[A]와 차이가 줄어들었기 때문이다.

그림 3-35, 36, 37은 변압기의 용도인 강압용($N_P:N_S:N_T=3:2:1$), 전압보상용($N_P:N_S:N_T=3:3:2$), 승압용($N_P:N_S:N_T=3:4:3$) 권선수를 갖는 경우 1선 지락사고시 사고상(R상)의 동작특성을 분석하기 위한 전압·전류곡선을 나타낸 것이다. 그림 3-35에서 사고발생 후 SCR-R2 (a접점)가 턴 온 되면서 즉시 I_{RN} 이 0으로 되었다. 이것은 2차 권선과 3차 권선의 임피던스 차이에 의한 것이다. 이에 SCR-R1(b접점)이 바로 턴 오프 되어 2차권선과 3차권선이 직렬로 연결된다($I_{RS}=I_{RT}$). 여기에 흐르는 전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과하게 되면 켜치되고, 발생되는 저항에 의해 사고전류(I_{RP})가 반주기 이내에 제한되는 것이다.

그러나 전압보상(그림 3-36)과 승압용(그림 3-37)으로 사용되는 변압기의 경우 a 접점을 갖는 SCR-R2의 턴 온 동작은 거의 동일하게 일어나지만, b접점을 갖는 SCR-R1의 턴 오프 동작이 반주기 이후에 이뤄진다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 I_{RN} 이 감소하면서 I_{RT} 가 증가하게 되는데 이 전류에 의해 초전도 소자가 켜치게 된다. 그러므로 발생하는 저항에 의해 3차권선의 임피던스가 증가하여 다시 SCR-R1으로 흐르는 I_{RN} 이 증가하게 되면서 SCR-R1의 턴 오프 조건을 만족하지 못한 것이다. 이로 인해 사고전류는 반주기 이내에 제한되지 못하여 전압보상용 변압기의 경우 191[A], 승압용 변압기의 경우 84[A]로 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러나 반주기 이후에는 켜치된 초전도 소자의 저항에 의해 각각 -16, -30[A]로 제한된다.

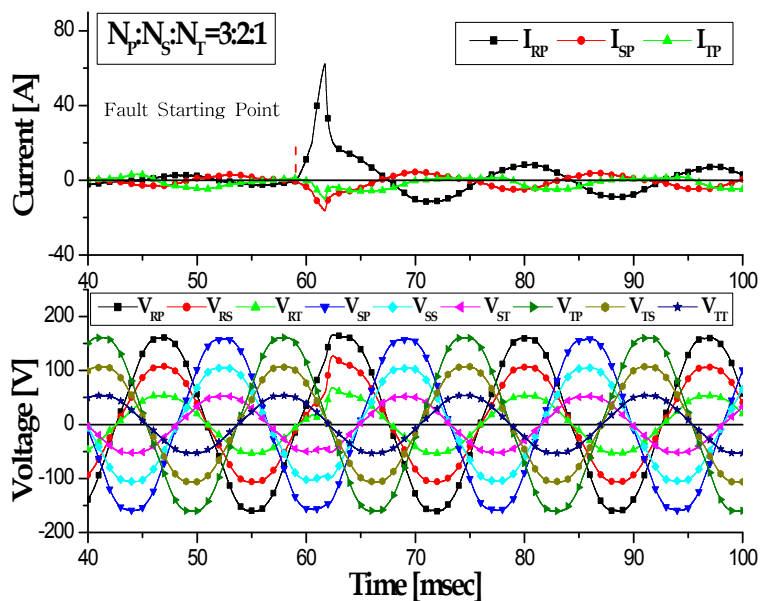


그림 3-34 1선 지락사고시 각 상의 사고전류 및 전압곡선(강압용 변압기 권선)

Fig. 3-34 The Fault Current and Voltage Curves of Each Phase During the Single Line to Ground Fault(A Transformer for Step down)

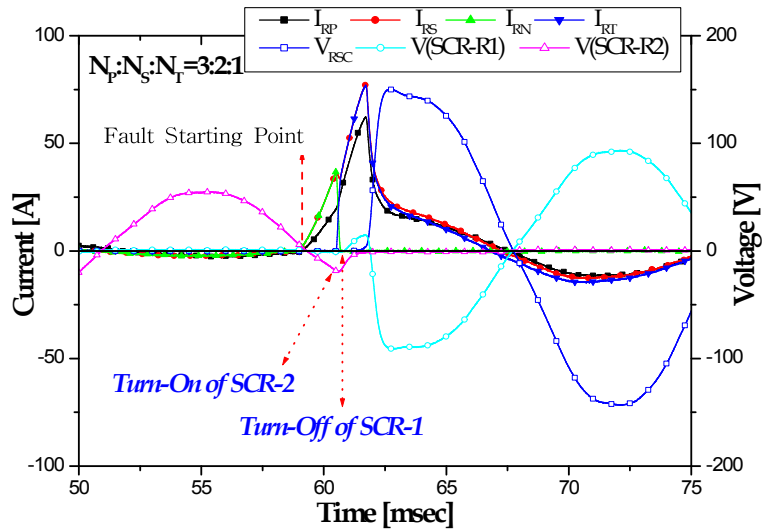


그림 3-35 1선 지락사고시 사고상의 사고전류 및 전압곡선(강압용 변압기)
 Fig. 3-35 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Single Line to Ground Fault(A Transformer for Step down)

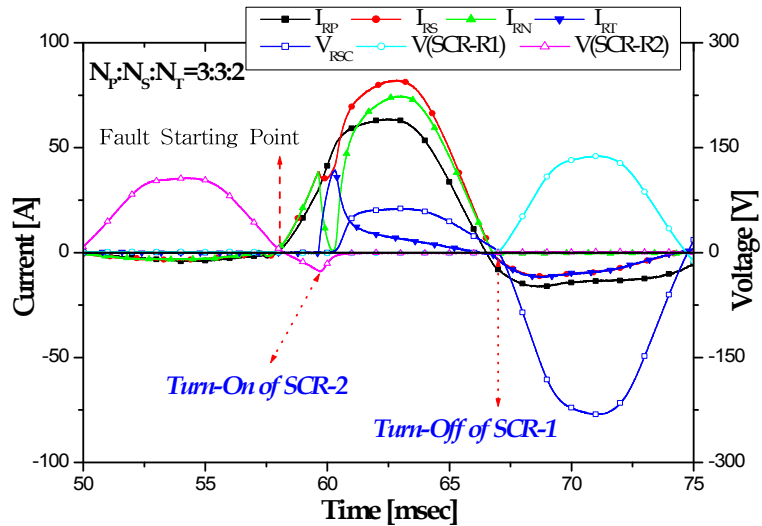


그림 3-36 1선 지락사고시 사고상의 사고전류 및 전압곡선(전압보상용 변압기)
 Fig. 3-36 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Single Line to Ground Fault(A Transformer for Voltage Drop or Modifier)

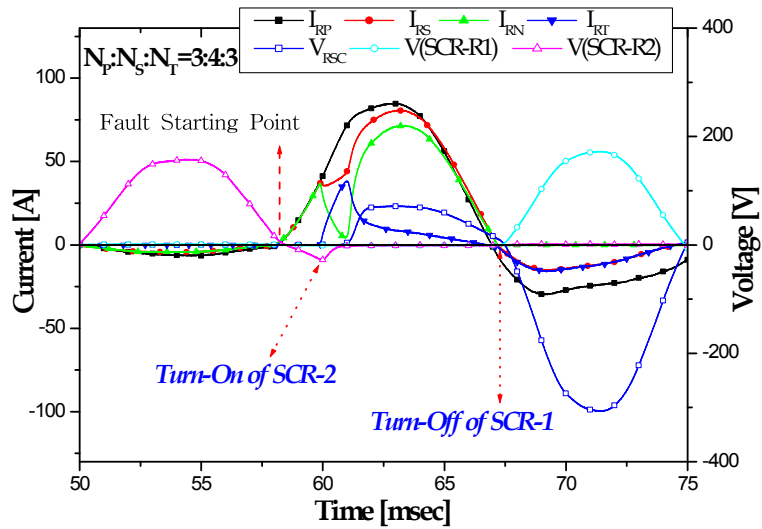
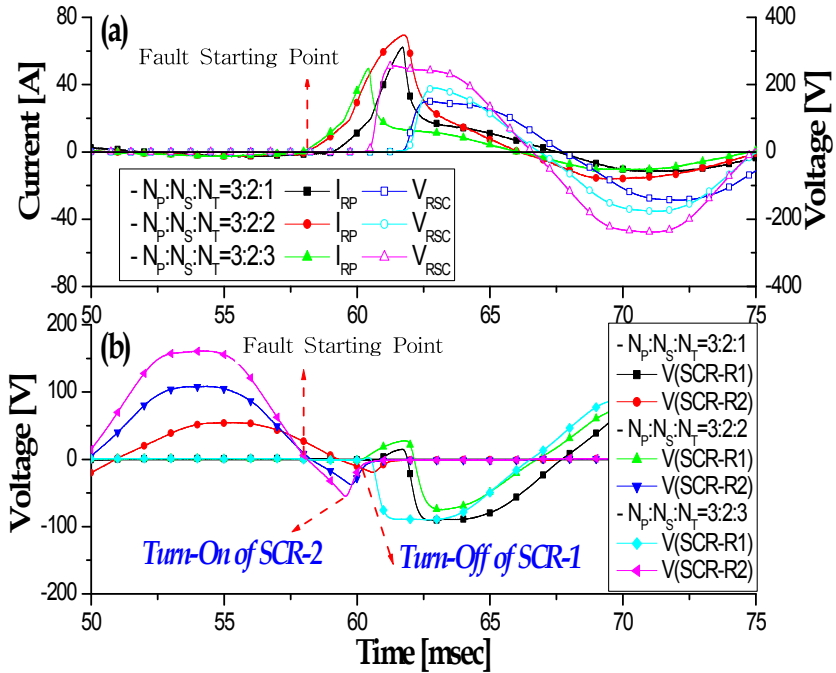


그림 3-37 1선 지락사고시 사고상의 전류 및 전압곡선(승압용 변압기)
 Fig. 3-37 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During
 the Single Line to Ground Fault(A Transformer for Step up)

그림 3-38, 39, 40는 변압기의 용도와 3차권선의 권선수 변화에 따른 제한된 사고전류, 초전도 소자의 전압, SCR 동작특성을 분석하기 위한 곡선이다. 그림 3-38의 강압용 변압기 권선($N_P:N_S=3:2$)을 갖는 경우 3차권선의 권선수가 1, 2, 3으로 변화함에 따라 사고전류가 62, 69, 50[A]로 각각 제한된다는 것을 알 수 있다. 이것은 a접점을 갖는 SCR-R2의 동작점이 3차권선의 증가에 따라 빨라지면서 I_{RT} 가 초전도 소자를 빠르게 켜치 시키기 때문이다. 이로 인해 사고전류는 빠르고 더 적은 값으로 제한되는 것이다.

그림 3-39과 40는 전압보상용($N_P:N_S=3:3$)과 승압용($N_P:N_S=3:4$) 변압기 권선을 갖는 경우로서 3차권선의 권선수가 증가함에 따라 사고전류는 반주기 이내에 모두 제한되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 위에서 설명한 것과 같이 a접점을 갖는 SCR-R2이 턴 온 으로 동작하더라도 SCR-R1이 a접점으로 턴 오프하기 위한 I_{RN} 의 0[A]조건이 만족하지 못하기 때문이다. SCR-R2이 턴 온 되어 3차권선에 전류가 흐르므로 초전도 소자는 켜치 된다. 이것이 SCR-R1이 턴 오프하기 이전에 이뤄져 I_{RN} 의 0[A]조건을 만족시키지 못하는 것이다. 이로 인해 사고전류는 반주기 이후에 제한동작을 수행하게 되며, 전압보상용 변압기 권선의 경우 20[A] 정도로, 승압용 변압기 권선의 경우 30[A] 정도로 제한된다는 것을 확인할 수 있다.

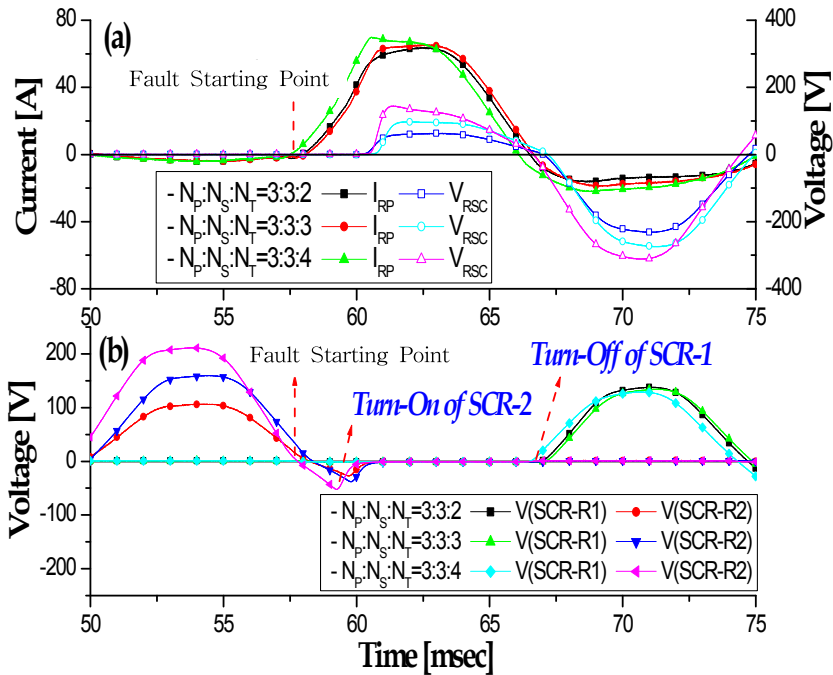
여기서 사고전류가 반주기 이내에 동작하기 위해서는 SCR-R2의 턴 온 이후 SCR-R1이 턴 오프 되기 이전에 초전도 소자가 켜치되지 않도록 임계전류를 조정하여야 한다는 것을 예측할 수 있다.



(a) Fault Current and Voltage Curves of Superconducting Elements
 (b) Operating Characteristics Curves of a SCR

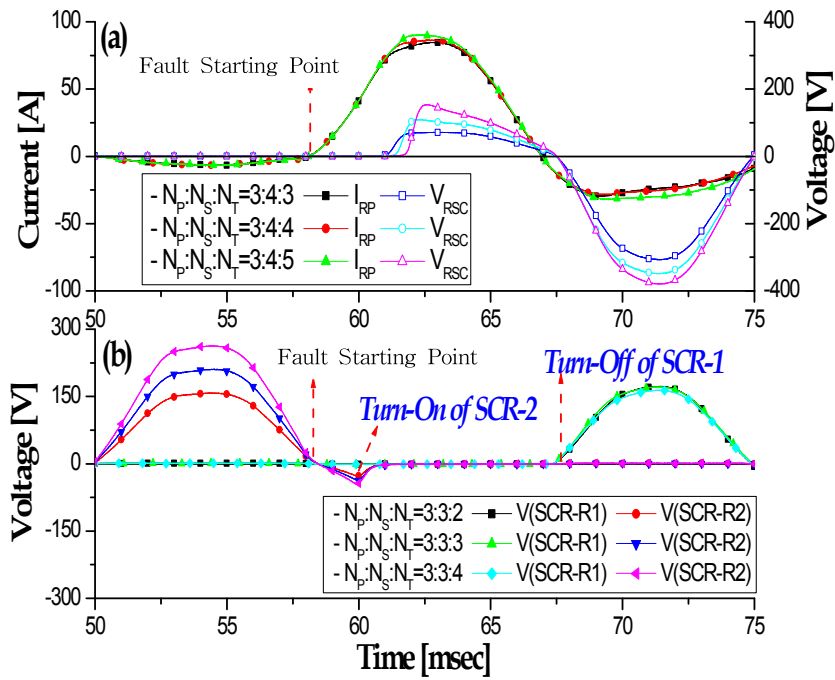
그림 3-38 3차권선비에 따른 동작 특성곡선(강압용 변압기)

Fig. 3-38 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Step down)



(a) Fault Current and Voltage Curves of Superconducting Elements
 (b) Operating Characteristics Curves of a SCR

그림 3-39 3차권선비에 따른 동작 특성곡선(전압보상용 변압기)
 Fig. 3-39 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding
 of a Transformer(A Transformer for Voltage Drop or Modifier)



(a) Fault Current and Voltage Curves of Superconducting Elements
 (b) Operating Characteristics Curves of a SCR

그림 3-40 3차권선비에 따른 동작 특성곡선(승압용 변압기)

Fig. 3-40 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Step up)

d. 2선 지락사고

그림 3-41은 전력망에 2선 지락사고가 발생한 경우 강압용($N_P:N_S:N_T=3:2:1$) 변압기와 초전도 한류기의 사고전류 제한특성과 각 상의 전압특성을 나타낸 곡선이다. 각 상의 인가전압은 200[V]로 하였다. 사고상인 R상과 S상의 사고전류는 반주기 이내에 각각 73과 -59[A]이었고, 반주기 이후에 -11과 9[A]로 제한되었다. 각 상의 전압곡선은 사고 초기에 약간의 왜곡이 발생하고 다시 정상상태와 동일한 전압으로 강압용 변압기의 역할을 수행한다는 것을 알 수 있다.

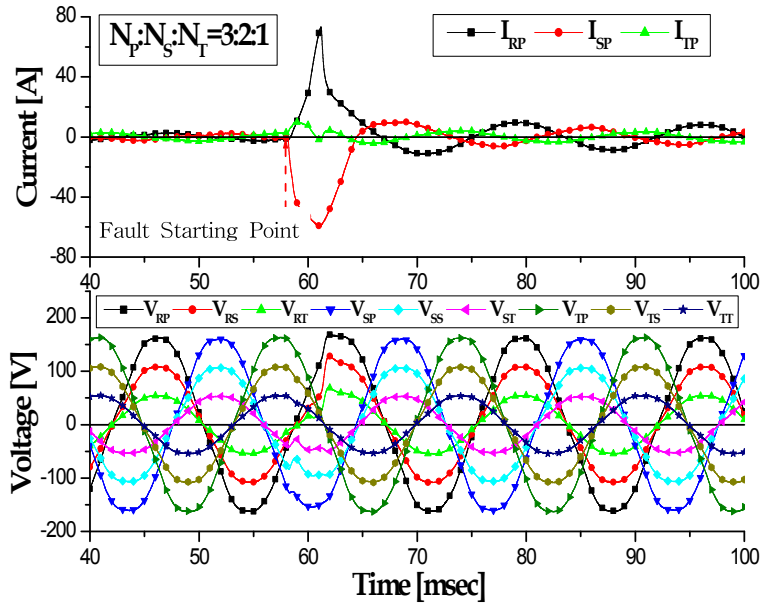


그림 3-41 2선 지락사고시 각 상의 사고전류 및 전압곡선(강압용 변압기 권선)

Fig. 3-41 The Fault Current and Voltage Curves of Each Phase During the Double Line to Ground Fault(A Transformer of Step down)

그림 3-42, 43, 44은 변압기의 용도에 따른 강압용($N_p:N_s:N_T=3:2:1$), 전압보상용($N_p:N_s:N_T=3:3:2$), 승압용($N_p:N_s:N_T=3:4:3$) 권선수를 갖는 경우 2선 지락사고시 사고상(R·S상)의 동작특성을 분석하기 위한 전압·전류곡선을 나타낸 것이다. 그림 3-42의 강압용 변압기의 경우 사고상인 R상에서 SCR-R2가 턴 온 하는 즉시 I_{RN} 과 I_{RT} 가 서로 분류되어 흐르게 되고, I_{RN} 이 0[A]가 되는 순간 SCR-R1이 턴 오프된다는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 I_{RT} 가 초전도 소자의 임계전류를 초과하면 소자는 켄치되고, 발생하는 저항에 의해 사고전류는 반주기 이내에 73[A]로 제한되었다. 그러나 다른 사고상인 S상의 경우 사고발생 직후 SCR-R2가 바로 턴 온 되어 I_{RN} 과 I_{RT} 가 서로 분류되고, 초전도 소자는 SCR-R1가 턴 오프 되기 이전에 켄치되어 I_{RN} 이 0[A]로 되기 이전에 다시 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 SCR-R1은 이 구간에서 턴 오프 조건을 만족하지 못하고, I_{RN} 이 0[A]로 되는 반주기 구간에서 턴 오프 되었다. 반주기 이후의 동작에 의해 사고전류는 -58[A]에서 -9[A]로 제한되었다. 그림 3-43와 44의 전압보상용 및 승압용 변압기의 경우도 마찬가지로 R상의 사고상에서는 SCR-R1의 턴 온과 동시에 I_{RN} 이 0[A]되어 SCR-R1가 턴 오프 되었다. 이로 인해 2차 권선에 흐르는 전류($I_{RS}=I_{RT}$)는 초전도 소자의 켄치로 인해 발생된 저항에 의해 사고발생 반주기 이내에 68과 91[A]로 제한되었다. 그러나 다른 사고상인 S상의 경우는 그렇지 못했다. 사고발생 직후 바로 SCR-S1이 턴 온 되었으나 I_{RN} 이 0[A]되기 이전에 I_{RT} 가 초전도 소자를 켄치시켜 2차권선과의 폐회로와 3차권선과의 폐회로 사이에 임피던스 차이가 크게 발생하였다. 이로 인해 SCR-S2는 바로 턴 오프하지 못하고 반주기 이후에 턴 오프하게 된다. 이렇게 반주기 이후 동작특성에 따라 반주기 이내의 -127, -81[A] 사고전류가 반주기 이후에는 각각 33, 27[A]로 제한되었다.

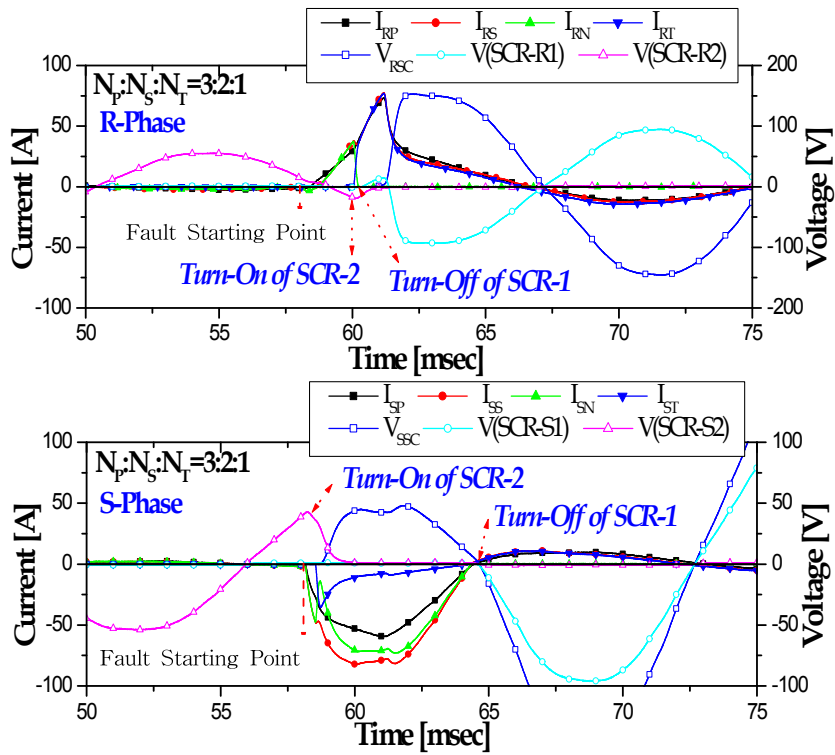


그림 3-42 2선 지락사고시 사고상(R, S상)의 전류 및 전압곡선(강압용 변압기)
 Fig. 3-42 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Double Line to Ground Fault(A Transformer for Step down)

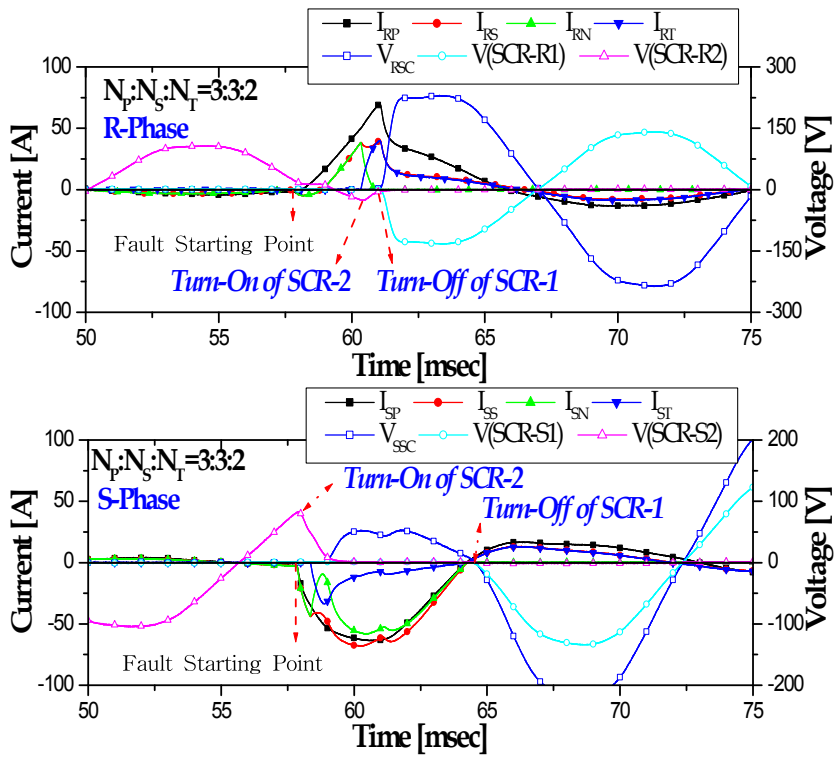


그림 3-43 2선 지락사고시 사고상(R, S상)의 전류 및 전압곡선
(전압보상용 변압기)

Fig. 3-43 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Double Line to Ground Fault(A Transformer for Voltage Drop or Modifier)

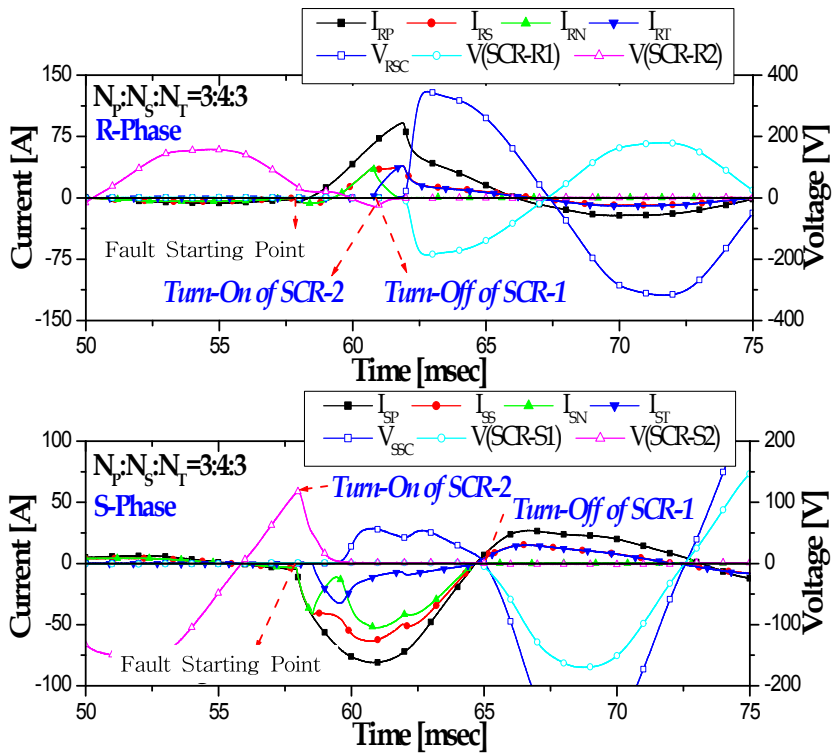


그림 3-44 2선 지락사고시 사고상(R, S상)의 전류 및 전압곡선(승압용 변압기)

Fig. 3-44 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Double Line to Ground Fault(A Transformer for Step up)

그림 3-45, 46, 47는 변압기의 용도(강압용, 전압보상용, 승압용)와 3차권선의 권선수 변화에 따라 2선 지락사고시 사고상(R·S상)의 제한된 사고전류, 초전도 소자의 전압, SCR 동작특성을 분석하기 위한 곡선이다.

그림 3-45의 강압용 변압기 권선($N_p:N_s=3:2$)을 갖는 경우 3차권선의 권선수가 1, 2, 3으로 변화함에 따라 R상의 사고전류가 각각 73, 77, 63[A]로 제한된다는 것을 알 수 있다. (b)그림에서 SCR-R2가 턴 온 하는 즉시 SCR-R1이 턴 오프 한다. 이로 인해 초전도 소자는 임계전류 초과시 켜치 되어 R상 사고전류 반주기 이내에 제한하게 된다. (c)와 (d)의 S상 사고의 경우 사고발생 후 SCR-S2가 즉시 턴 온하나 SCR-S1이 반주기 이후에 턴 오프 한다는 것을 알 수 있다. 이로 인해 3차권선의 증가에 따른 S상 사고전류는 반주기 이내에 -59, -43, -46[A]에서 반주기 이후 10, 11, 13[A]로 제한되었다.

3차권선의 권선수가 증가하면서 SCR-S1의 턴 오프와는 관계없이 초전도 소자의 전압도 증가하였다. 또한 SCR-S1이 턴 오프 하는 경우의 초전도 소자 전압이 안하는 경우 전압보다 더 증가하였다. 이는 SCR-S1이 턴 오프 하는 경우 2차권선과 3차권선에 유도된 전압이 초전도 소자에 인가되고, SCR-S1이 턴 오프 안하는 경우 3차권선에 유도된 전압만이 초전도 소자에 인가된다. 그러므로 3차권선의 증가에 따라 SCR-S1의 턴 오프와는 관계없이 초전도 소자의 전압도 증가하는 것이다.

그림 3-46와 47는 전압보상용($N_p:N_s=3:3$)과 승압용($N_p:N_s=3:4$) 변압기 권선을 갖는 경우로서 2선 지락 사고시 3차권선의 권선수가 증가함에 따라 R상의 사고전류는 1선 지락사고와는 달리 반주기 이내에 모두 제한된다는 것을 알 수 있다. 3차권선의 증가에 따라 전압보상용 변압기 권선의 경우 70, 79, 86[A]로, 승압용 변압기 권선의 경우 91, 98, 105[A]로 반주기 이내에 제한되었다.

그러나 S상의 사고전류는 강압용 변압기 권선을 갖는 경우 동일하게 반주기 이후에 제한된다. 3차권선의 증가에 따라 전압보상용 변압기 권선의 경우 반주기 이내에 -64, -66, -70[A]에서 반주기 이후에 17, 19, 22[A]로, 승압용 변압기 권선의 경우 반주기 이내에 -81, -84, -88[A]에서 반주기 이후에 27, 30, 36[A]로 반주

기 이내에 제한되었다.

앞에서 설명한 것과 같이 I_{SN} 가 0[A]로 되기 이전에 초전도 소자가 먼저 켜치 되어 SCR-S1이 턴 오프 되지 못하고 I_{SN} 가 0[A]로 되는 반주기 이후에 SCR-S1이 턴 오프 되어 사고전류가 제한되는 것이다. 또한 3차권선의 권선수가 증가하면서 초전도 소자의 전압이 증가하는 것을 확인하였다.

1·2차권선의 비가 동일하므로 사고발생시 CT의 감지속도는 동일하다. 그러므로 SCR-R1의 턴 오프 시점이 거의 동일하게 된다. 그러나 초전도 소자의 임계전류에 따라 사고전류가 반주기 이내에 동작할지 이후에 동작할지가 결정된다. SCR-R1이 턴 오프하기 위한 조건인 I_{RN} 이 0[A]가 되기 이전에 I_{RT} 에 의해 초전도 소자가 켜치 되면 I_{RN} 이 0[A]로 되지 못해 SCR-R1이 턴 오프하지 못하는 것이다.

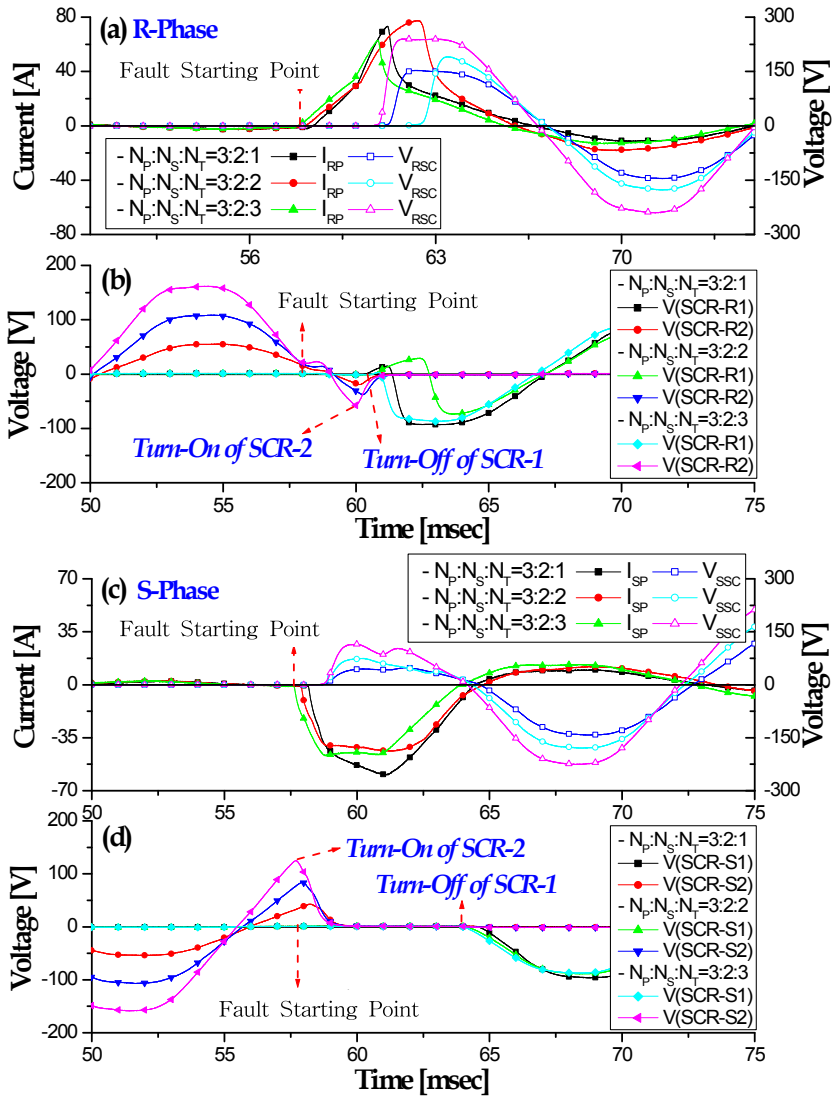


그림 3-45 3차권선비에 따른 사고전류 및 초전도 소자, SCR동작 특성곡선(강압용 변압기 권선)

Fig. 3-45 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Step down)

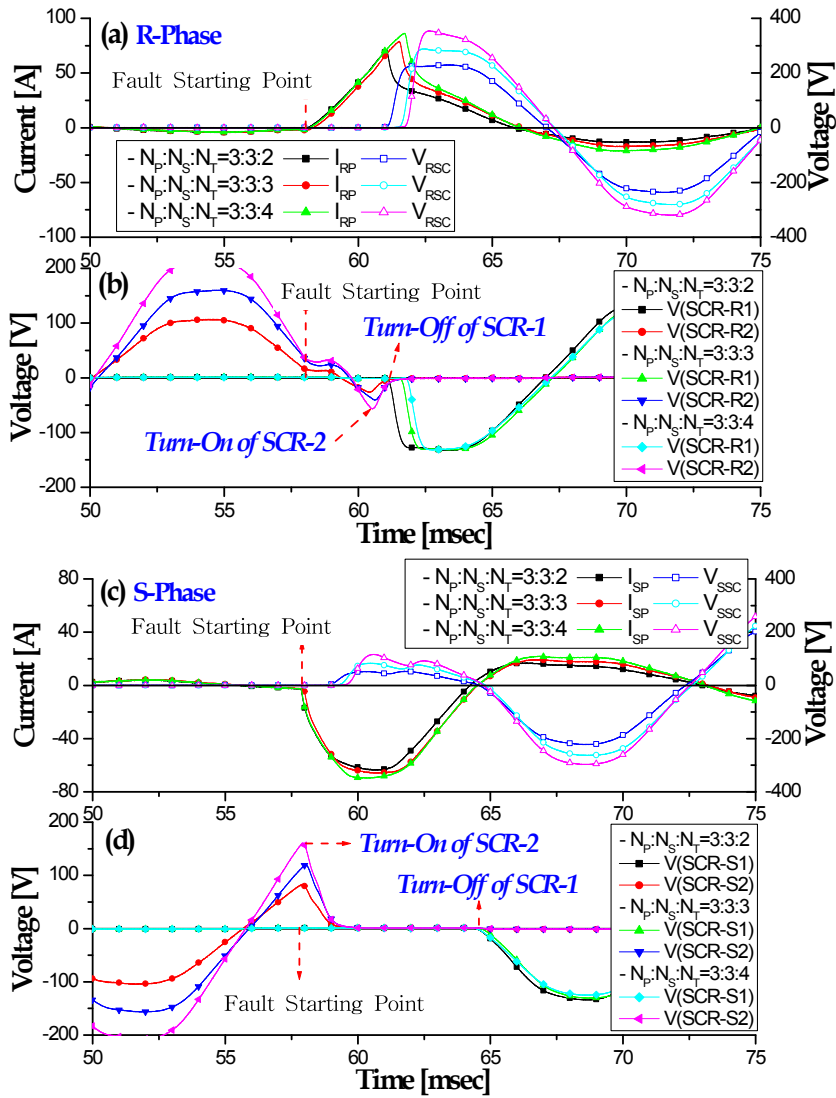


그림 3-46 3차권선비에 따른 사고전류 및 초전도 소자, SCR동작
특성곡선(전압보상용 변압기 권선)

Fig. 3-46 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding
of a Transformer(A Transformer for Voltage Drop or Modifier)

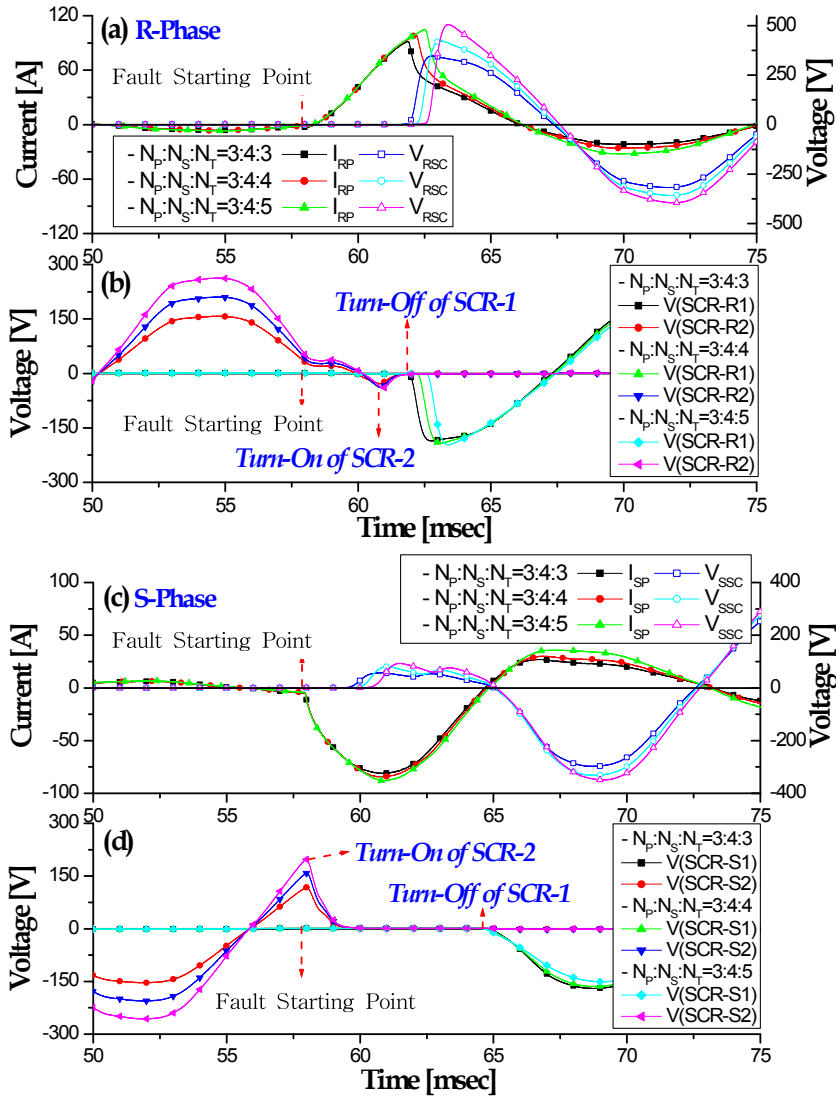


그림 3-47 3차권선비에 따른 사고전류 및 초전도 소자, SCR동작 특성곡선(승압용 변압기 권선)

Fig. 3-47 Operation Characteristics of SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Step up)

e. 3선 지락사고

그림 3-48은 전력망에서 3선 지락사고가 발생한 경우 강압용($N_P:N_S:N_T=3:2:1$) 변압기와 초전도 한류기의 사고전류 제한특성과 각 상의 전압특성을 나타낸 곡선이다. 각 상의 전압은 200[V]를 인가하였다. 사고발생 이후 반주기 이내의 각 상 사고전류는 각각 69, -67, 59[A]이었고, 반주기 이후에 -12, 11, 13[A]로 각각 제한되었다. 각 상의 전압곡선은 권선수비에 따른 사고발생 반주기 이후 각 상 전압은 정상상태에서의 정상전압과 거의 같은 값을 갖는다는 것을 확인하였다. 이로서 3선 지락사고가 발생하더라도 사고발생 반주기동안에만 사고전류 및 전압에 왜곡이 발생하고, 반주기 이후에는 정상상태의 강압용 변압기로서 역할을 수행한다는 것을 알 수 있다.

그림 3-49, 50, 51은 변압기의 용도인 강압용($N_P:N_S:N_T=3:2:1$), 전압보상용($N_P:N_S:N_T=3:3:2$), 승압용($N_P:N_S:N_T=3:4:3$) 권선수를 갖는 경우 3선(R·S·T상) 지락사고시 제한되는 사고전류와 SCR의 동작특성을 분석하기 위한 곡선이다.

그림 3-49는 강압용 변압기의 경우로서 R상에서 SCR-R2가 턴 온 하는 즉시 I_{RN} 과 I_{RT} 가 서로 분류되어 흐르게 되고, I_{RN} 이 0[A]가 되는 순간 SCR-R1이 턴 오프 된다.

그리고 I_{RT} 가 초전도 소자의 임계전류를 초과하게 되면 켜치 되어 R상 사고전류가 반주기 이전에 68[A]로 제한된다. 그러나 S상은 SCR-R2가 턴 온 하는 즉시 I_{RN} 과 I_{RT} 가 서로 분류되어 흐르나 I_{RN} 이 0[A]로 되기 이전에 I_{RT} 가 초전도 소자의 임계전류를 초과하게 되어 켜치 된다. 이로 인해 3차 권선의 임피던스가 증가하게 되어 감소하던 I_{RN} 이 다시 상승하게 되어 SCR-R1이 반주기 이전에 턴 오프하지 못하고 반주기 되는 시점에서 턴 오프 한다. 그러므로 S상 사고전류는 반주기 이내에 -67[A]에서 반주기 이후에 13[A]로 제한되었다.

T상에서는 SCR-R2가 턴 온 되면서 I_{RN} 과 I_{RT} 가 서로 분류되어 흐르며 I_{RN} 이 0[A]로 되었고 SCR-R1이 턴 오프 되었다. 그러나 I_{RT} 가 초전도 소자를 완전히 켜치시킬 수 있는 임계전류로 증가하지 못하고 반주기를 지나게 된다. 이로 인해 초

전도 소자는 반주기동안 부분적인 켄치만이 발생하고 사고발생 반주기가 지나서 I_{RT} 가 임계전류를 완전히 초과하는 지점에서 켄치 되는 것을 확인할 수 있다. 이로써 T상 사고전류는 반주기 이내에 58[A]에서 반주기 이후에 -57[A]로 제한되었다. 이것으로부터 SCR-R1이 턴 오프 되면서 I_{RT} 가 초전도 소자를 켄치 시키기에 충분한 전류로 증가하여야 한다는 것을 알 수 있다.

그림 3-50은 전압보상용 변압기 권선을 갖는 경우로서 R상과 S상에서 I_{RN} 가 0[A]로 되기 이전에 I_{RT} 가 초전도 소자의 임계전류를 초과하여 켄치 되면서 사고전류는 반주기 이내에 제한되지 못했다. 이로 인해 R상과 S상 사고전류는 반주기 이내에 81[A]와 -72[A]에서 반주기 이후에 -23[A]와 17[A]로 제한된다는 것을 확인할 수 있다. T상의 경우 강압용 변압기의 T상과 동일하게 반주기 이내에 SCR-T1이 턴 오프 되었으나, I_{RT} 가 충분한 전류로 증가하는 반주기 이후에 초전도 소자를 켄치 시킨다는 것을 알 수 있다.

이러한 현상은 3선 지락사고가 R상 0° 기준에서 발생하는 사고로서, 이때의 T상 전류는 60° 앞선 전류가 흐르고 있는 상태이다. 그러므로 SCR-T2가 턴온되는 시점에서 증가하기 시작하는 I_{TT} 는 충분히 증가하지 못하고 반주기가 지나게 되는 것이다. 이로 인해 T상 사고전류는 반주기 이내에 49[A]에서 반주기 이후에는 -53[A]로 제한된다는 것을 알 수 있다. 반주기 이내의 사고전류가 더 작은 것은 T상 전류가 60° 앞선 상태에서 사고가 발생하여 1/3주기 이내에서 사고전류가 증가하고 감소하기 때문에 사고전류가 충분히 증가하지 못한 것이다.

그림 3-51은 승압용 변압기 권선($N_p:N_s:N_T=3:4:3$)을 갖는 경우로서 그림 3-50의 전압보상용 변압기 권선의 경우와 각 상의 동작특성이 동일하게 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 사고발생 반주기 이내에서 사고전류를 제한하기 위해서는 SCR-1의 턴 오프 동작이 필수적이다. 이때의 조건으로는 I_{RN} 이 0[A]로 되는 것과 증가하는 I_{RT} 가 I_{RN} 이 0[A]로 되기 이전에 초전도 소자를 켄치 시키면 안되고, 또한 I_{RT} 가 초전도 소자를 켄치 시킬 수 있는 전류로 충분히 증가할 것으로 확인할 수 있다.

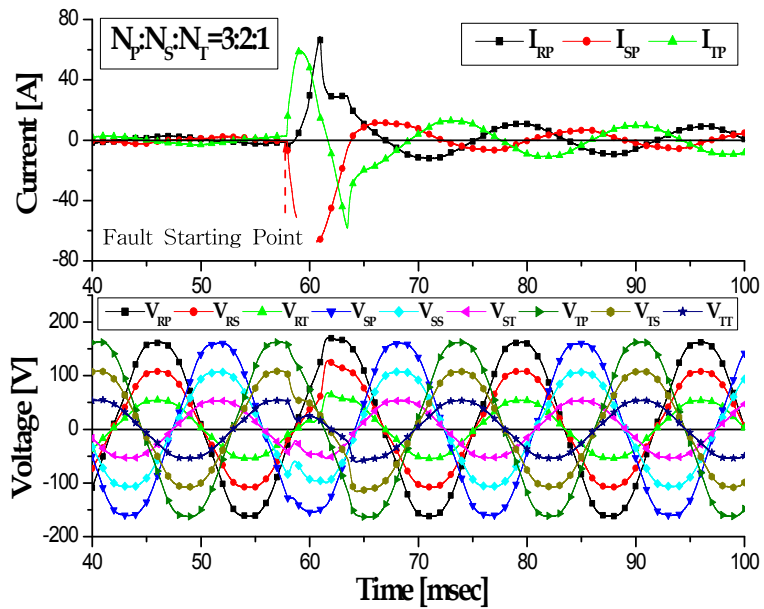


그림 3-48 3선 지락사고시 각 상의 사고전류 및 전압곡선(강압용 변압기 권선)

Fig. 3-48 The Fault Current and Voltage Curves of Each Phase During the Triple Line to Ground Fault(A Transformer for Step down)

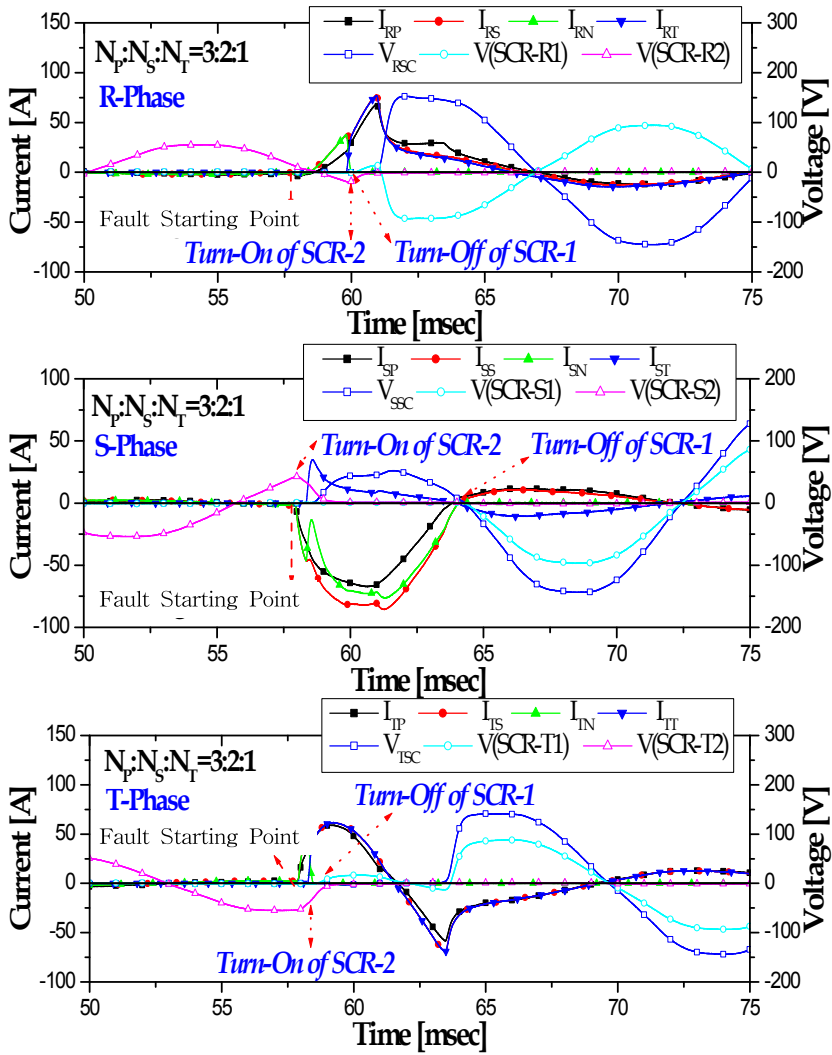


그림 3-49 3선 지락사고시 사고상의 전류 및 전압곡선(강압용 변압기)
 Fig. 3-49 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Triple Line to Ground Fault(A Transformer for Step down)

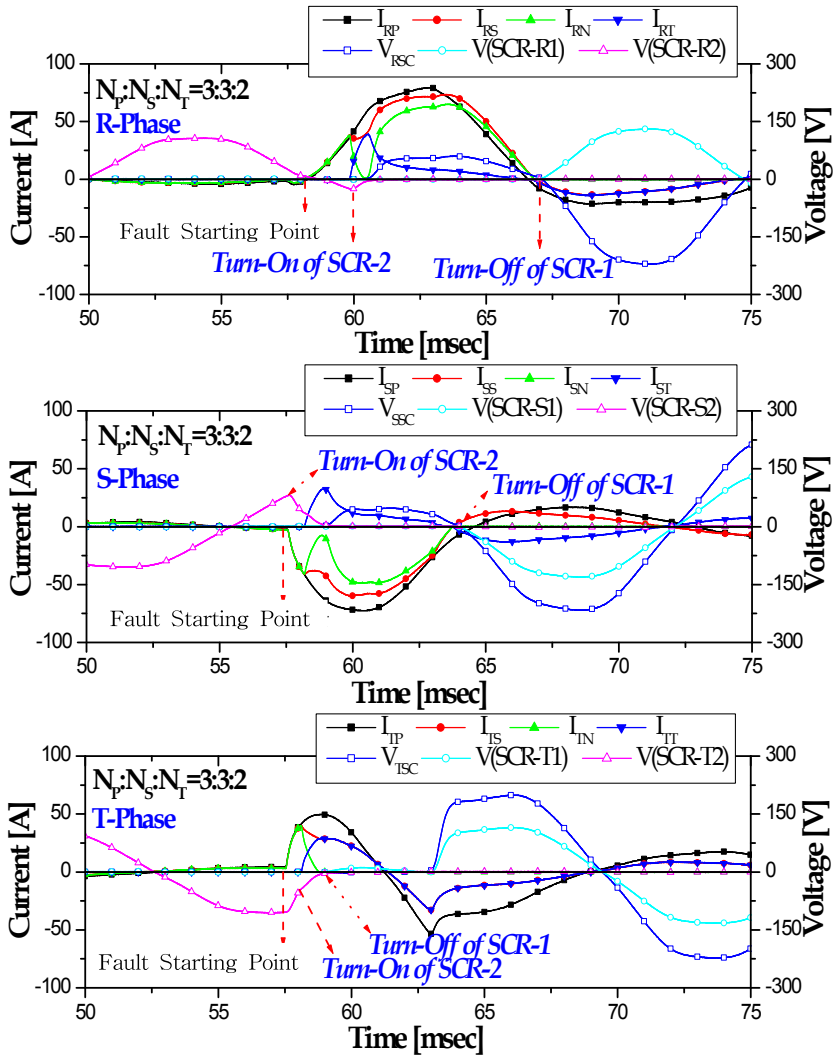


그림 3-50 3선 지락사고시 사고상의 전류 및 전압곡선(전압보상용 변압기)
 Fig. 3-50 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Triple Line to Ground Fault(A Transformer for Voltage Drop or Modifier)

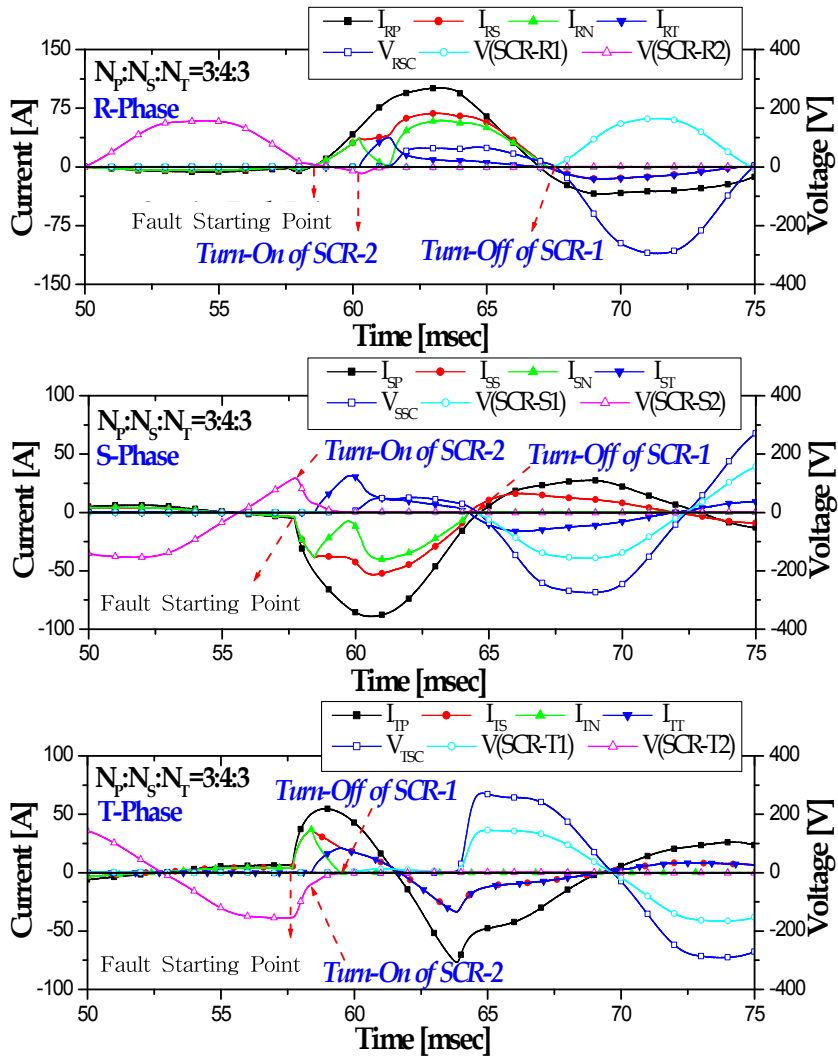


그림 3-51 3선 지락사고시 사고상의 전류 및 전압곡선(승압용 변압기)
 Fig. 3-51 The Fault Current and Voltage Curves of Fault Phase During the Triple Line to Ground Fault(A Transformer for Step up)

그림 3-52, 53, 54은 변압기의 용도(강압용, 전압보상용, 승압용)와 3차권선의 권선수 변화에 따라 3선 지락사고시 제한된 사고전류, 초전도 소자의 전압, SCR 동작특성을 분석하기 위한 곡선이다.

그림 3-52는 강압용 변압기 권선($N_p:N_s=3:2$)을 갖는 경우 3차권선의 권선수가 1, 2, 3으로 변화함에 따라 R상의 사고전류가 각각 70, 76, 53[A]로 제한된다는 것을 알 수 있다. (b)그림에서 SCR-R2가 턴 온 하는 즉시 SCR-R1이 턴 오프 한다. 이로 인해 초전도 소자에 흐르는 전류 I_{RT} 가 증가하게 된다. 이 전류의 크기 및 증가분에 따라 초전도 소자의 켄치여부 및 켄치속도가 결정된다. 이것은 증가하는 사고전류의 제한 속도를 결정하게 되며, 빠르게 켄치 될수록 더 작은 사고전류로 제한되는 것이다. S상의 사고전류는 I_{RN} 이 0[A]로 되기 이전에 초전도 소자가 켄치되어 SCR-S1이 반주기 이후에 턴 오프 한다는 것을 알 수 있다.

이렇게 반주기 이후 동작특성에 따라 반주기 이내의 -67, -54, -58[A] 사고전류가 반주기 이후에는 각각 12, 18, 24[A]로 제한되었다. T상의 경우 SCR-T2가 턴 온 되면서 증가하는 I_{TT} 가 초전도 소자를 켄치 시키기에 충분하지 못하였다. 그리고 반주기 이후에 초전도 소자의 임계전류를 초과하면서 켄치로 인해 발생하는 저항에 의해 사고전류는 권선수 증가에 따라 각각 -58, -71, -38[A]로 제한된다는 것을 확인할 수 있다.

그림 5-53와 54는 전압보상용($N_p:N_s=3:3$)과 승압용($N_p:N_s=3:4$) 변압기 권선을 갖는 경우로서 3선 지락 사고시 동작특성을 나타낸 것이다. 전압보상용 변압기의 R상을 보면 3차권선의 권선수가 4인 경우 SCR-R1이 반주기 이내에 턴 오프하고, 사고전류가 제한된다는 것을 확인할 수 있다. 다른 3차권선의 권선수는 SCR-R1가 턴 오프하기 이전에 I_{RT} 가 초전도 소자의 임계전류를 초과하여 켄치되어 사고전류는 반주기 이후에 제한된다.

이것은 초전도 소자의 임계전류가 너무 낮아서 발생하는 현상으로 적정 임계전류값을 선정하는 것이 중요하다. S상의 사고전류 또한 초전도 소자의 임계전류가 너무 낮아 SCR-S1이 턴 오프하기 이전에 초전도 소자가 켄치되기 때문에 반주기 이후에 제한되었다. T상의 경우 3차권선의 증가에 따라 SCR-T1이 반주기 이내에

턴 오프 하였으나, 사고전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과하지 못하여 반주기 이후에 제한되지 못한 경우이다.

승압용 변압기의 경우 3차권선의 권선수비에 따른 각 상의 사고전류 및 초전도 소자의 켄치, SCR의 동작특성 등이 전압보상용 변압기의 경우와 동일한 특성을 보이고 있다.

각 상에서 발생하는 사고전류의 조건은 모두 다르다. 또한 초전도 소자의 임계 특성도 제작상 불가피하게 다르다. R상 0°도 사고를 기준으로 할 때 초전도 소자는 임계전류가 가장 큰 것을 가장 큰 사고전류가 발생하는 R상에 배치하고, 가장 작은 임계전류를 갖는 초전도 소자를 작은 사고전류가 흐르는 T상에 배치하여야 한다. 초전도 소자의 임계전류의 차이는 SCR-1의 턴 오프 시점을 결정 짓는 중요한 요인이다. 그리고 SCR-1의 턴 오프 여부에 따라 각 상의 사고전류가 반주기 이내에 제한될지, 이후에 제한될지가 결정된다. 하지만 각 상의 SCR-1은 반주기 이후에는 I_{RN} 이 0[A]로 되어 무조건 사고전류를 제한하게 된다.

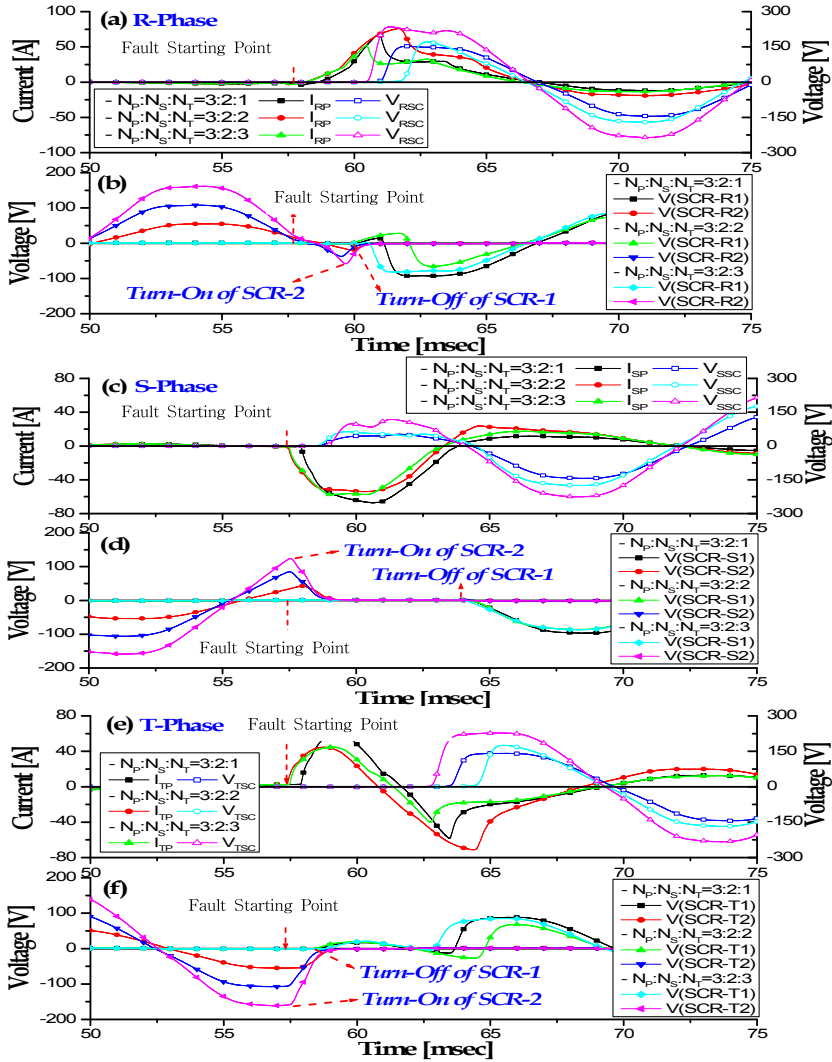


그림 3-52 3차 권선비에 따른 사고전류 및 초전도 소자, SCR동작 특성곡선(강압용 변압기 권선)

Fig. 3-52 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Step down)

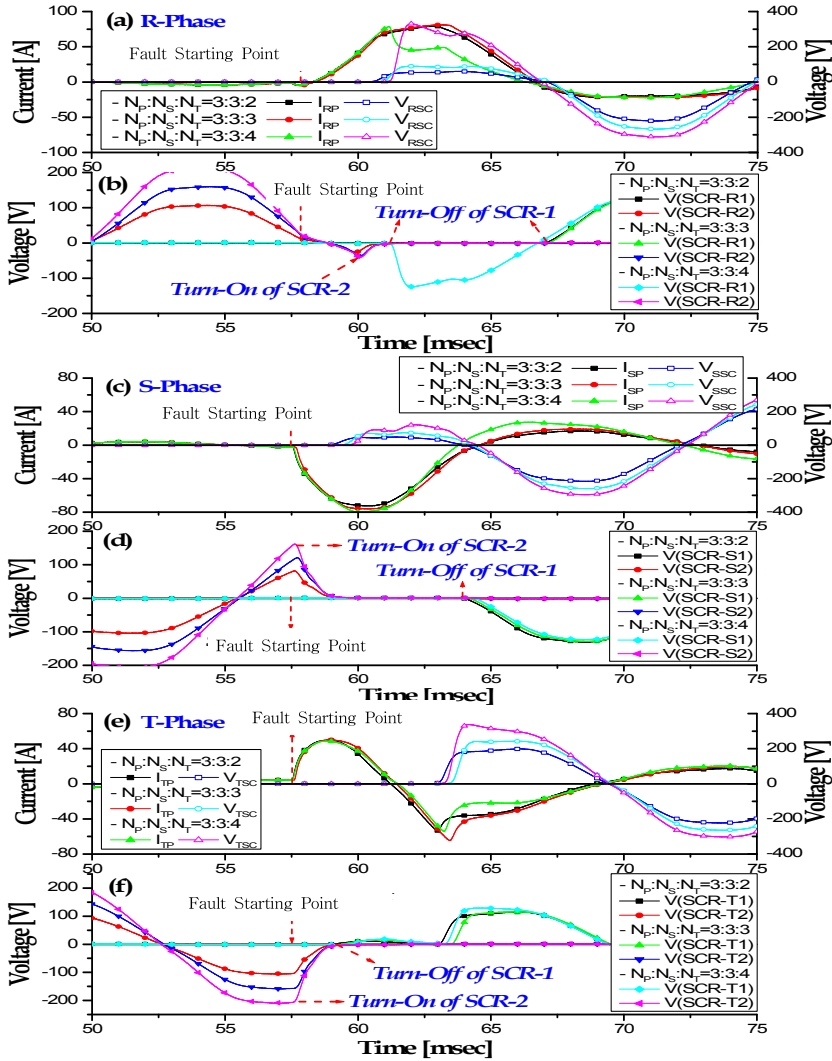


그림 3-53 3차 권선비에 따른 사고전류 및 초전도 소자, SCR동작 특성곡선(전압보상용 변압기 권선)

Fig. 3-53 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer for Voltage Drop or Modifier)

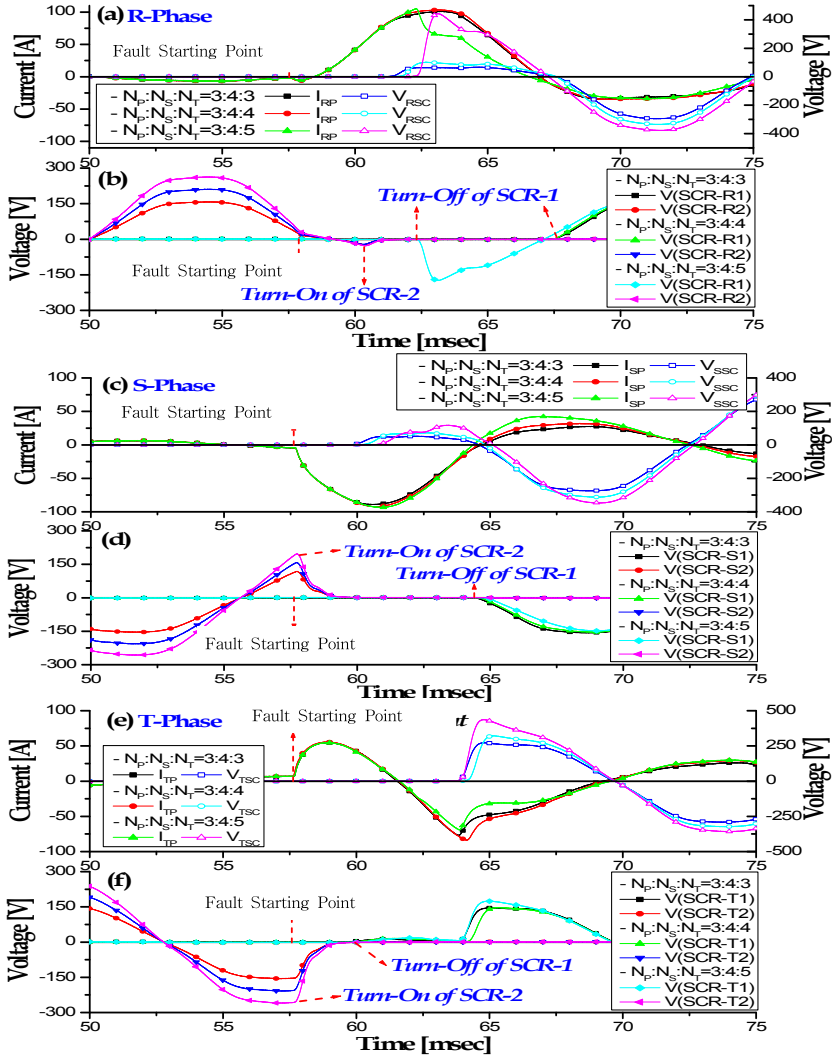


그림 3-54 3차 권선비에 따른 사고전류 및 초전도 소자, SCR동작 특성곡선(승압용 변압기 권선)

Fig. 3-54 Operation Characteristics of a SFCL according to Third Winding of a Transformer(A Transformer Step up)

5. 초전도 한류기가 적용된 전력망 시뮬레이션

변압기와 초전도 한류기의 융합기술은 사고발생시 CT의 감지에 따른 SCR스위치의 인터록 동작시간에 따라 사고 반주기 이내 및 이후 동작이 결정된다. 이에 단상 및 3상 변압기에 따른 초전도 한류기의 동작특성을 EMTP-ATP 프로그램을 이용하여 모의하였다.

그림 3-55는 단상 변압기와 초전도 한류기가 융합된 단상 모델을 나타낸 것이다. 여기서 인가전압(V_{in})은 22.9[kV]로 하였으며, 부하(Load)와 선로저항(R_{LINE})은 각각 100과 1[Ω]으로 하였다. 초전도 소자는 임계전류 이상에서만 저항이 발생하므로 그림 3-56과 같은 가변저항으로 모의하였다.

SCR-b와 SCR-a의 동작에 따라 전류제한 동작 주기는 결정된다. 즉, SCR-b에 흐르는 전류가 0으로 되면서 SCR-a로 사고전류가 모두 흐르게 되고, 초전도 소자의 켄치로 인해 사고전류는 제한된다. 그림 3-57은 초전도 한류기가 없는 경우와 초전도 소자가 반주기 이후와 이내에 동작하는 경우의 사고전류 제한동작을 나타낸 곡선이다. 초전도 한류기가 없는 경우 변압기(TR1) 2차 권선에 흐르는 사고전류는 4,571[A]이었다. 정상상태에 흐르는 전류인 45[A]의 약 100배의 사고전류가 흐른다는 것을 알 수 있다. 그러나 초전도 한류기가 설치되어 반주기 이후에 사고전류 제한동작을 수행하는 경우 반주기 이내의 사고전류 4,152[A]가 반주기 이후에는 115[A]로 제한되었다. 여기서 반주기 이후의 동작은 SCR-b에 흐르는 전류가 0[A]로 되는 시점에서 a점점으로 되기 때문이다. 그러나 SCR-b에 흐르는 전류를 빠르게 감소시킴으로서 SCR-a로 대부분의 전류가 흐르도록 하였다. 이로써 반주기 이내에서 사고전류 제한동작을 수행하도록 한 결과 1,900[A]의 전류로 제한되었고, 반주기 이후에는 261[A]로 제한된다는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 SCR-b가 반주기 이내에 동작할 수 있도록 하기 위한 요인이 실제 실험에서는 존재하지 않는다. 그러므로 단상 초전도 한류기의 실험에서는 그림 3-57(b)와 같은 결과만이 도출되고 있다.

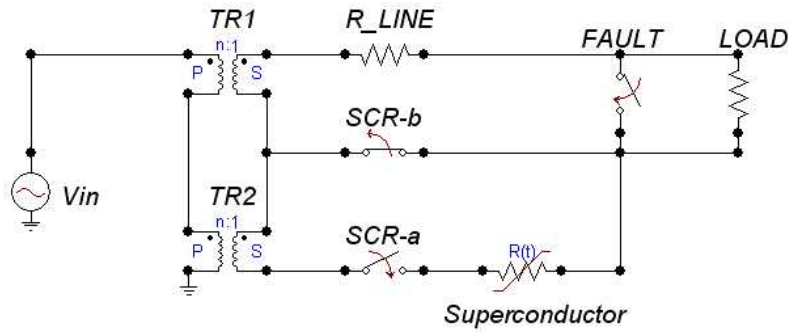


그림3-55 변압기와 초전도 한류기의 단상 모델

Fig. 3-55 The Simulation Model of a Transformer and a SFCL

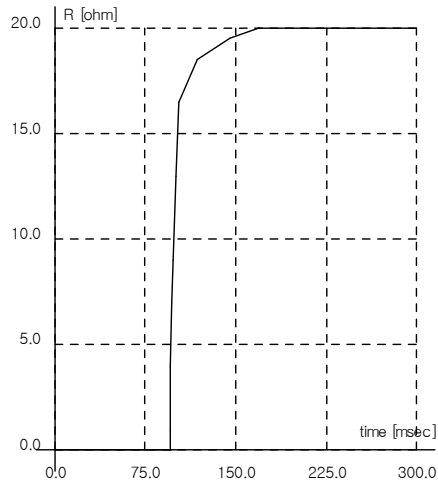
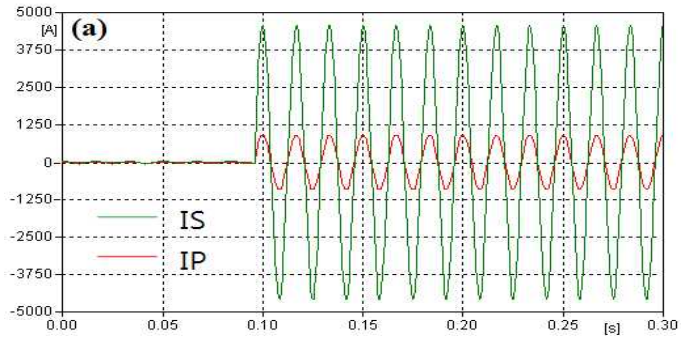
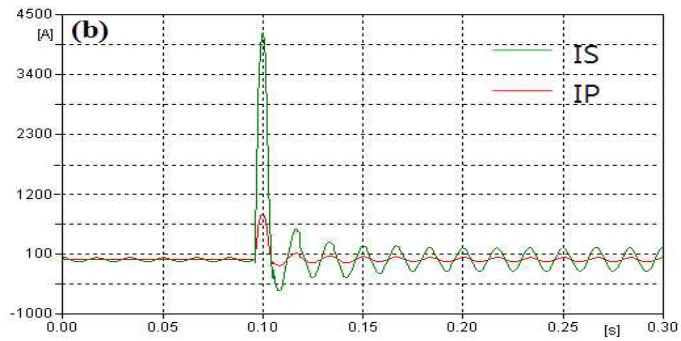


그림 3-56 초전도 소자의 저항곡선 모델

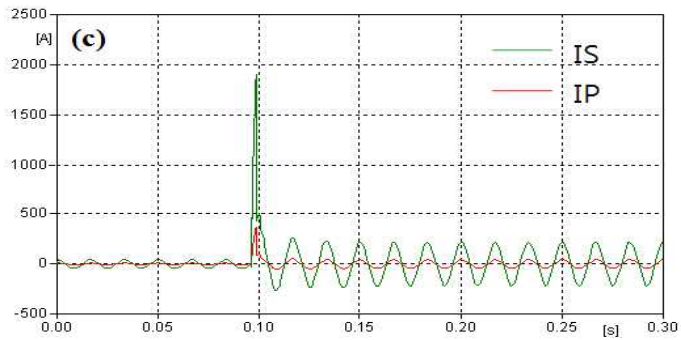
Fig. 3-56 Resistance Curves Model of a Superconducting Element



(a) Without a SFCL



(b) Operating Characteristics Curves within Half a Period



(c) Operating Characteristics Curves after Half a Period

그림 3-57 초전도 한류기의 전류제한 곡선

Fig. 3-57 Fault Current Limitation Characteristics of a SFCL

그림 3-58은 3상 변압기를 사용하여 삼상 전력계통을 간단하게 설계한 모델이다. 3상 변압기는 3권선 변압기로 설계하였으며, R상에 초전도 한류기를 설치하여 1선, 2선, 3선 지락사고가 발생되도록 모델링하였으며, 지락사고시의 접지저항은 1 [Ω]으로 설정하였다. 그림3-59, 60, 61은 3상 전력계통에서 1선, 2선, 3선 지락사고에 대해 초전도 한류기가 없는 경우와 SCR-b가 반주기 이내와 이후에 동작하는 경우의 사고전류제한 곡선을 나타낸 것이다. 배전선로의 공급전압인 22.9[kV]가 인가된 경우 초전도 한류기가 없는 경우 1선, 2선, 3선 지락사고시 사고전류는 11.6[kA]가 흐르게 된다. 그러나 변압기와 초전도 소자가 융합된 한류기가 설치된 경우 그림 3-59, 60, 61 (a)와 (b)와 같이 반주기 이후의 사고전류가 1.3[kA]로 제한된다는 것을 알 수 있다. 여기서 SCR-b가 반주기 이후에 동작하는 경우 사고발생 반주기 동안 사고전류는 12.2[kA]로 증가한다. 그러나 SCR-b가 반주기 이후에 동작하는 경우에는 반주기 이내의 사고전류가 11.6[kA]에서 8.2[kA]로 제한된다. 이는 SCR-b가 반주기 이내에 a로 동작하여 초전도 소자에서 발생하는 저항이 사고전류를 제한하기 때문이다.

SCR-b가 반주기 이내에 동작하기 위해서는 여기에 흐르는 전류가 빠르게 0[A]로 줄어들어야 한다. 단상 초전도 한류기에서는 SCR-b에 흐르는 전류를 0[A]로 줄일 수 있는 요인이 없다. 그러나 3상 초전도 한류기에서는 3권선 변압기를 사용하므로 각 상이 서로 결합되어 있다. 이에 SCR-b에 흐르는 전류와 서로 상쇄되는 방향의 전류가 다른 상에 흐르게 되면 SCR-b에 흐르는 전류는 빠르게 0[A]로 되어 a로 동작하게 된다. 이로 인해 그림 3-59, 60, 61(c)와 같이 초전도 소자는 사고발생 반주기 이내에 전류제한 동작을 수행하게 되는 것이다.

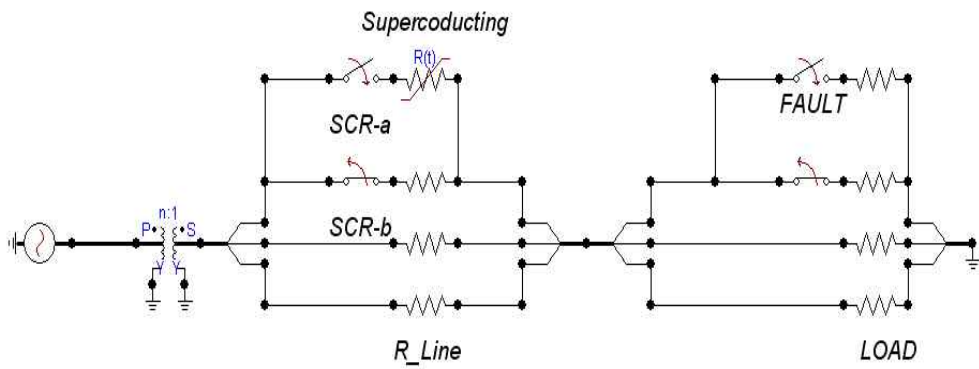
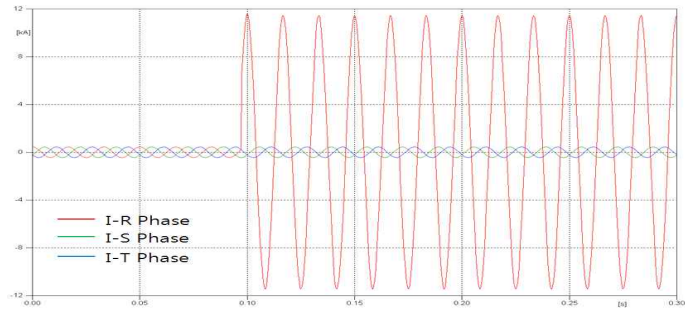
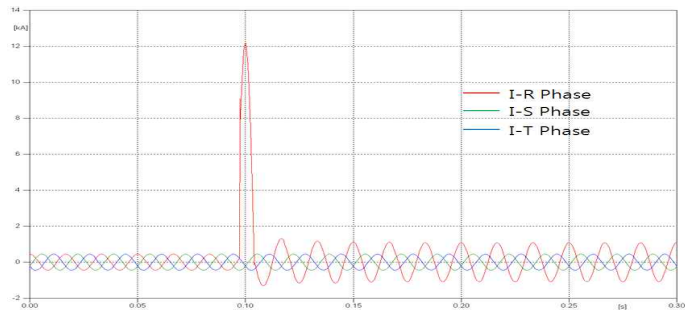


그림 3-58 변압기와 초전도 한류기의 3상 모델

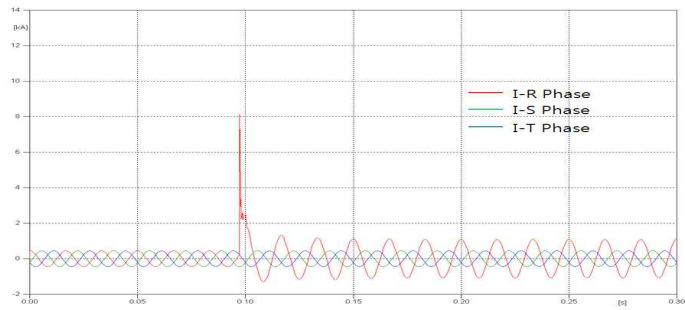
Fig. 3-58 Three Phase Modeling of a SFCL



(a) Without a SFCL

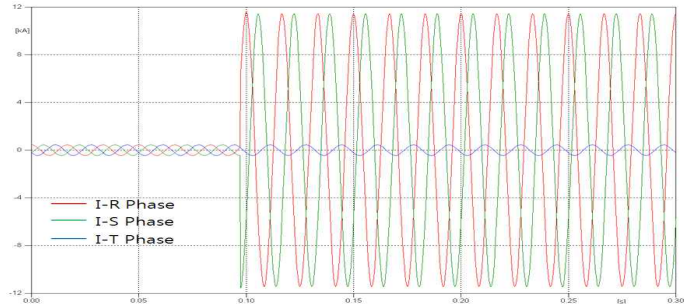


(b) Operating Characteristics Curves within Half a Period

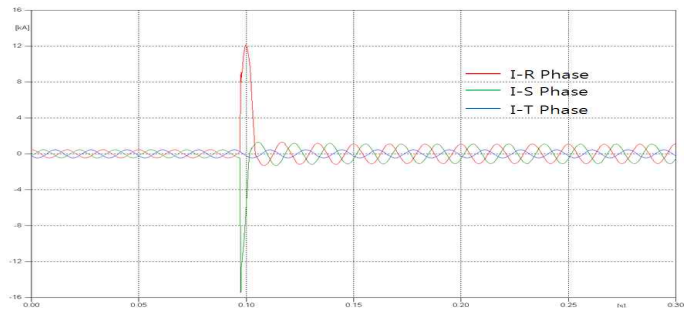


(c) Operating Characteristics Curves afetr Half a Period

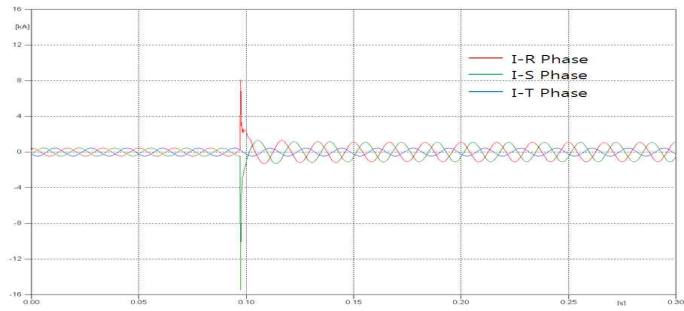
그림 3-59 초전도 한류기의 전류제한곡선(1선 지락사고)
 Fig. 3-59 Fault Current Limitation Characteristics of a SFCL
 (The Single Line to Ground Fault)



(a) Without a SFCL

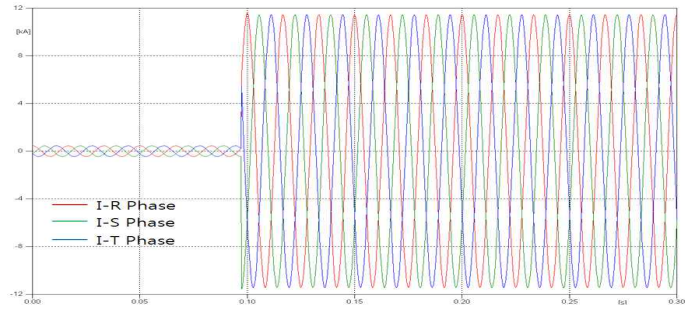


(b) Operating Characteristics Curves within Half a Period

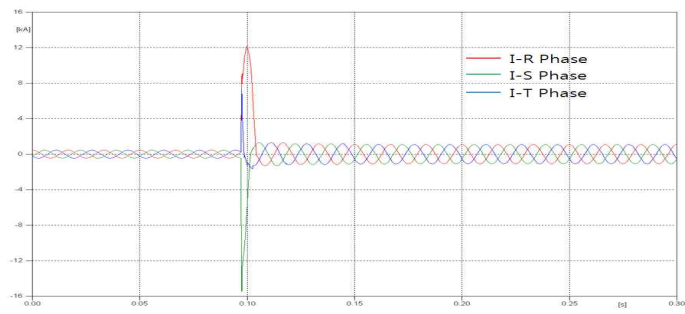


(c) Operating Characteristics Curves after Half a Period

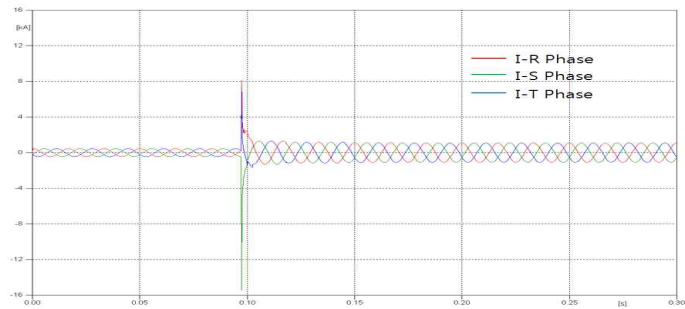
그림3-60 초전도 한류기의 전류제한곡선(2선 지락사고)
 Fig. 3-60 Fault Current Limitation Characteristics of a SFCL
 (The Double line to Ground Fault)



(a) Without a SFCL



(b) Operating Characteristics Curves within Half a Period



(c) Operating Characteristics Curves after Half a Period

그림3-61 초전도 한류기의 전류제한곡선(3선 지락사고)

Fig. 3-61 Fault Current Limitation Characteristics of a SFCL
(The Triple Line to Ground Fault)

VI. 결 론

본 논문에서는 구조가 간단한 저항형 초전도 한류기를 기본으로 하고 있다. 여기에 상용 변압기의 3차권선에 초전도 한류기를 적용한 형태로 신개념의 초전도 한류기에 대한 연구를 진행하였다. 기존에 연구되고 있는 초전도 한류기는 전력계통 적용시 단독으로 설치되는 독립형 기기이다. 이는 설치시 별도의 설치 공간이 필요하고 차단기 별로 설치하여야 하기 때문에 많은 비용이 든다. 그러나 본 논문에서 연구한 초전도 한류기는 기존에 사용하고 있는 변압기의 3차권선에 초전도 한류기를 연결하는 장치이다. 또한 3차권선의 권선수비에 따라 초전도 한류기의 사고전류 제한율을 조정함으로써 초전도체의 양을 최소화 시킬 수 있다. 고가의 초전도체를 줄임으로써 경제적이며 또한 저온용기 등 주변기기의 규모를 줄일 수 있어 상기의 문제점을 해소 할 수 있다.

본 논문에서는 상용변압기에 초전도 한류기를 적용하여 계통에 사고가 발생 시 사고상태에서의 동작특성, 2, 3차측 권선수비에 따른 특성, 초전도 한류기의 용량 증대 방안, 삼상 초전도 한류기의 사고전류 제한특성을 분석하였다. 이러한 본 논문의 결과들을 다음과 같이 요약했다.

1. 상용변압기의 3차 권선에 초전도 한류기를 적용하여 실험 하였고 정상 상태 시에는 변압기의 기본동작(승압, 강압, 전압보상)역할을 수행함을 확인 하였다. 전력계통의 사고 상태시에는 3차권선에 사고 전류가 흘러 3차권선에 연결된 초전도 소자가 켄치되어 사고전류를 90%까지 효과적으로 제한함을 알 수 있었다.

2. 단상변압기와 삼상변압기에 초전도 한류기를 적용하여 동작특성을 보면 변압기와 초전도 한류기의 융합기술에서 중요한 부분을 차지하고 있는 SCR 스위치의 동작시간이라 할 수 있다.

SCR의 a접점은 게이트에 들어오는 신호에 따라 바로 턴 온 된다. 그러나 SCR의 b접점의 경우 여기에 흐르는 전류가 유지전류 이하로 되거나 SCR에 역전압이

가해지는 경우에 턴 오프하게 된다. 변압기와 초전도 한류기를 단상 시스템에 적용한 결과 SCR의 b접점에 흐르는 전류가 0[A]로 되는 반주기 이후에 사고전류가 제한된다는 것을 확인하였다.

그러나 3상 시스템에 적용하여 실험한 결과 타 건전상에 의해 발생하는 자속이 사고상의 SCR-b에 흐르는 전류에 영향을 주어 CT의 사고감지에 따른 게이트 신호 인가시 바로 턴 오프 한다는 것을 확인하였다. 이것으로부터 사고발생 반주기 이내에 사고전류는 제한이 된다. 초전도 한류기가 적용될 전력망은 3상으로 이뤄진 시스템이므로 3상 변압기에 적용시 유리함을 확인 할 수 있었다.

3. 단상 변압기의 권선수 변화에 따른 초전도 한류기의 동작특성 분석결과 2차 권선의 비가 클 수록 초전도 소자의 켄치 시점이 더 늦어지고 3차권선의 비가 증가할 수록 소자의 켄치 시점이 더 늦어짐을 확인 할 수 있었다. 이는 3차권선비의 증가로 임피던스가 증가하여 이에 흐르는 전류의 증가가 감소하기 때문에 초전도 소자의 임계전류 도달시간이 늦어지는 것이다.

4. 초전도 소자의 제작시 발생하는 임계특성의 차이로 인해 불규칙한 켄치 특성이 발생한다. 저항형 초전도 한류기 소비 전력곡선에서는 하나의 초전도 소자만이 전력량을 분담하였지만 변압기와 융합한 단상 초전도 한류기의 소비 전력곡선에서는 두 개의 소자가 전력량을 분담하는 것을 확인할 수 있다. 또한 저항형 보다 초전도 소자의 전력량 분담이 가능하므로 용량을 크게 할 수 있는 장점을 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

5. 전력망의 다양한 상황에서의 적용특성을 도출하기 위해 변압기의 용도(강압용, 전압보상용, 승압용)와 3차권선비, 사고 유형에 따른 특성을 분석하였다. 변압기의 용도는 2차권선의 비에 따라 결정된다. 2차 권선수가 적을수록 SCR-b의 턴 오프 동작시간이 빨라지고, 3차권선수가 많을수록 SCR-a의 턴 온 동작시간이 빨라진다는 것을 확인하였다. 이로 인해 2차 권선수가 적은 강압용 변압기 용도로 사용되

는 경우 사고전류가 반주기 이내에 제한된다. 사고 유형에 따른 특성분석에서는 중앙 철심각에 위치해 있는 S상의 사고사 발생하는 경우 다른 건전상 및 사고상에 의한 자속의 영향으로 SCR-b의 턴 오프 이전에 초전도 소자가 켜치되었다. 이로 인해 SCR-b에 흐르는 전류가 0[A]로 되지 않아 SCR-b가 반주기 이후에 턴 오프 하고 사고전류를 제한한다는 것을 알 수 있었다. 3선 지락사고의 경우에도 이와 같은 원인으로 인해 S상의 사고전류는 반주기 이후에 제한되고, R상과 T상의 사고전류는 반주기 이내에 원활하게 제한된다는 것을 확인할 수 있었다.

6. EMTP 전력망 해석프로그램의 시뮬레이션 결과 사고유형에 따라 반주기 이후에 사고 전류를 약 90% 이상 제한함을 확인 할 수 있었고 SCR이 반주기 이내에 동작할 경우 초기 사고전류의 피크 값을 반주기 이후 동작하는 사고전류보다 약 20%이상 제한함을 확인 할 수 있었다. 이는 SCR의 동작이 반주기 이내 동작시 효과적으로 사고전류를 제한 할 수 있음을 확인 할 수 있다. 또한 실계통시 전력용 차단기의 차단용량을 증대시킬 수 있다는 것을 예상할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. Noe, K. P. Juengst, F. Werfel, L. Cowey, A. Wolf, and S. Elschner, “Investigation of High-Tc Bulk material for its Use in Resistive Superconducting Fault Current Limiters”, IEEE Trans. on Appl., Super., Vol 11 (2001), pp. 1960–1963.
- [2] E. M. Leung, “Superconducting Fault Current Limiters”, IEEE Power Engineering Review, Vol. 20 (2000), pp. 15–18.
- [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] 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.
- [6] 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.

- [7] H. S. Choi, H. R. Kim, O. B. Hyun, and S. J. Kim, "Quench Properties of Y-Ba-Cu-O Films After Overpowering Quenches", IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 11 (2001), pp. 2418-2421.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] T. Hoshino, M. Nishikawa, K. Mohammad Salim, T. Nakamura, I. Muta, "Preliminary Studies on Characteristics of Series-Connected Resistive Type Superconducting Fault Current for System Design", Physica C, Vol. 354 (2001), pp. 120-124.
- [11] H. S. Choi, O. B. Hyun, H. R. Kim, "Quench Characteristics of Resistive Superconducting Fault Current Limiters Based on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Films", Physica C, Vol. 351 (2001), pp. 415-420.
- [12] 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.

- [13] M. Yagami, S. Shibata, T. Murata, J. Tamura, "Improvement of Power System Transient Stability by Superconducting Fault Current Limiter", Trans. and Distri. Conf. and Exhi., (2002), pp. 359–364.
- [14] 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.
- [15] 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..
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.

- [19] 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.
- [20] H. R. Kim, H. S. Choi, H. R. Lim, I. S. Kim, O. B. Hyun, “Resistance of Superconducting Fault Current Limiters Based on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Thin Films after Quench Completion”, *Physica C*, Vol. 1 (2008), pp. 1606–1609.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [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] 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.

- [25] S. Elschner, F. Breuer, M. Breuer, M. Noe, T. Rettelbach, H. Walter, and J. Bock, "Manufacturing and Testing of MCP 2212 Bifilar Coils for a 10 MVA Fault Current Limiter", *IEEE Trans. Appl. Super.*, vol. 13 (2003), pp. 1980-1983.
- [26] B. Gronoll, G. Ries, W. Schmidt, H. -P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies, H. W. Newmuller, and A. G. Siemens, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO Films-100kVA Functional Model", *IEEE Trans. Appl. Super.*, vol. 9 (1999), pp. 656-659.
- [27] T. Matsumura, T. Uchii, and Y. Yokomizu, "Development of Flux-lock Type Current Limiter with High-T_c Superconducting Element", *IEEE Trans. Appl. Super.*, vol. 7 (1997), pp. 1001-1004.
- [28] S. H. Lim, H. G. Kang, H. S. Choi, S. R. Lee, and B. S. Han, "Current Limiting Characteristics of Flux-lock Type High-T_c Superconducting Fault Current Limiter with Control Circuit for Magnetic Field", *IEEE Trans. on Appl. Super.*, vol. 13 (2003), No, 2, pp. 2056-2059.
- [29] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "Fault Current Limiting Characteris due to Winding Direction Between Coil 1 and Coil 2 in a Flux-lock Type SFCL", *Physica C*, vol. 416 (2004), No, 1-2, pp. 34-38.
- [30] W. Paul, Th. Baumann, and J. Phyner, "Tests of 100 kW high-T_c Superconducting Fault Current Limiter", *IEEE Trans. Appl. Super.*, vol. 5 (1995), pp. 1059-1062.

감사의 글

1997년에 조선대학교 전기공학과에 입학하여 많은 세월이 흘렀지만 이제 박사를 졸업하여 사회에 첫발을 내딛는 시점이 되었습니다. 돌아보면 기쁜일, 슬픈일, 힘든일 등 많은 일이 있었지만 친구들, 후배들, 선배님들, 교수님들과 함께했던 모든 시간들이 소중한 추억으로 남습니다. 이 논문이 있기까지 부족한 저를 아낌없는 사랑과 가르침으로 이끌어 주신 모든 분들에게 이 글로써 감사의 뜻을 전하고자 합니다.

2004년에 대학원에 입학하여 석사, 박사까지 세심한 마음과 배려로 부족한 제자를 이끌어 주시고 논문이 완성될 때까지 논문지도 뿐만 아니라 대학원 생활, 연구 기법, 인생의 나아가야 할 방향 등 큰 가르침을 주신 최효상 지도교수님께 깊은 감사의 마음을 전합니다. 또한 전력계통 실험실 첫 제자로써 더 많은 관심과 애정에 말로 표현할 수 없을 정도로 감사드립니다. 대학교 1학년 때부터 졸업논문이 완성될 때 까지 무한한 지도와 조언을 아끼지 않으신 은사님들 백형래 교수님, 이우선 교수님, 조금배 교수님, 오금곤 교수님 깊은 감사와 인사를 드립니다. 이 은혜 잊지 않고 조선대학교 전기공학과 명예를 걸고 사회에 나가 열심히 하겠습니다. 또한 지금까지 많은 가르침을 주신 조선대학교 전기공학과 김창석 교수님, 송찬일 교수님, 최창주 교수님 정현상 교수님, 정수복 교수님, 이상일 교수님, 김용재 교수님, 김남훈 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

초전도 한류기를 인연으로 서로알게 되었던 연구 프로젝트를 수행하면서 많은 가르침을 주신 전북대학교 한병성 교수님, 두호익 박사님, 충렬이 형, 숭실대학교 임성훈 교수님, 우석대학교 정동철 교수님, 전남도립대학교 황종선 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

항상 따뜻한 마음으로 배려해 주시고 대학교 강단에 서게 될 기회를 주신 보건대학교 최명호 교수님, 동신대학교 차인수 교수님, 김동묵 교수님, 조선이공대 김병철 교수님, 전형석 교수님, 김남오 교수님, 민완기 교수님, 전남도립대학교 김원섭 교수님, 김종만 교수님, 김영민 교수님께도 감사의 인사를 드립니다.

대학원에 처음 입학하여 아무것도 모르는 저를 아낌없는 사랑으로 배려해 주신 대학원 선배님들 최연옥 박사님, 이강연 박사님, 정병호 박사님, 최권우 박사님, 박정민 박사님, 박정국 박사님, 고필주 박사님, 김형석 선배님, 문은아 선배님 정말 감사드리고 많은 조언들 마음속 깊이 새기겠습니다.

전력계통 실험실에 들어와 처음이라 힘들었지만 졸업하기까지 거의 같이 생활한 실험실 후배이자 친구인 조용선 박사에게 진심으로 감사드립니다. 또한 묵묵하게 항상 선배를 챙겨주고 싫은 내색 한번도 안한 정병익 후배님께도 감사드립니다. 실험실 생활에 불편함이 없도록 항상 옆에서 도와준 전기안전연구원의 김향곤 박사님과 실험실 후배들 공현, 나영, 주형, 경훈, 수근, 혜원, 인성에게도 깊은 감사를 드립니다. 전기공학과 대학원 후배들 영길, 판검, 지훈, 주선, 승호, 채현, 승학, 국도, 승학, 인혁, 보현, 문걸, 지혜, 규명, 남인, 지은, 성하, 권, 기현, 법준, 성진에게도 감사의 인사의 말을 드립니다. 후배님들에게 부끄럽지 않은 선배가 되도록 항상 노력하겠습니다.

대학원 생활에 힘들고 지칠 때 따뜻한 위로와 좋은 말을 해준 친구들에게 진심으로 감사드립니다. 초등학교 동창모임 나온회 친구들 상기, 경희, 호정, 기영, 용진, 문호, 영안, 석봉, 대연, 문호, 장학, 제현, 고등학교 동창모임, SC36회 친구들 성진, 오성, 승배, 인식, 남희, 제한, 금택, 승재, 용선, 정오, 광민, 현식, 성우, 정훈, 남걸, 전기공학과 동창 모임 대광회 친구들 태완, 상훈, 필선, 민철, 춘열, 철호, 기석, 재필 동아리 모임 TTC 14기 친구들 등 모두 고맙습니다.

또한 사회에서 동호회를 통해 알게 된 형 누나 친구들에게 감사드립니다. 특히, 이주엽, 최호응, 김지혜, 임재홍님께 감사의 말씀을 드립니다.

무엇보다도 지난 34년간 잘 할 수 있도록 뒤에서 든직한 버팀목이 되어주시고 사랑해 주신 아버님과 어머님, 형님에게 무한한 감사를 드립니다.

끝으로 졸업하기까지 큰 사랑을 주신 모든 분들께 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다. 여러분들의 깊은 조언과 사랑을 가슴속 깊이 간직하며 훌륭한 사람이 되도록 노력하겠습니다. 감사합니다.

2012년 6월 박형민 올림