

# 고속 인터럽터를 적용한 한류기의 전류제한요소에 따른 특성

## Characteristics of a FCL Applying Fast Interrupter According to the Current Limitation Elements

임인규\* · 최효상† · 정병익\*\*  
(In-Gyu Im · Hyo-Sang Choi · Byung-Ik Jung)

**Abstract** - With the development in industry, power demand has increased rapidly. As consumption of power has increased, Demand for new power line and electric capacity has risen. However, in the event of fault, problems occur in extending the range of fault coverage and increasing fault current. In these reasons, protection devise is recognized as the prevention of an accident and fault current. This paper dealt with minimizing fault propagation and limiting fault current by adjusting fault current limiter (FCL) with fast interrupter. At this point, we compared and analyzed characteristics between non-inductive resistance and fault current which is limited by superconducting units. In normal state of the power system, power was supplied to the load, but when fault occurred, the interrupter was operated as CT which detected the over-current. Its operation made the limitation of fault current through a FCL. We concluded that the limiter using superconducting units was more efficient with the increase of power voltage. Superconducting fault current limiter with the fast interrupter prevented the spread of a fault, and improved reliability of power system.

**Key Words** : Superconducting fault current limiter, Superconducting unit, Fault current, Fault current limiter, Interrupter, solenoid valve

### 1. 서 론

전기에너지는 산업발전과 생활 등에 있어서 없어서는 안 될 에너지이다. 하지만 전력수요가 증가함에 따라 전력계통이 복잡해지고 사고전류가 커지며 사고범위확대의 문제점이 발생하게 되었다. 현재 고장전류 문제를 해결하기 위해 다양한 방안을 고려하고 있으며 초전도체의 발견 이후 꾸준한 연구를 통해 고온초전도체를 이용하여 사고전류를 제한하는 방안이 연구되고 있다. 초전도체는 임계온도가 낮아 액화질소를 사용하여 0 저항을 얻어야하는 단점이 있지만 연구개발을 통해 전력분야 뿐만 아니라 다양한 분야의 발전에 크게 기여할 것으로 보인다. 초전도체를 이용한 한류기의 종류에는 저항형과 유도형, 하이브리드형이 있으며 초전도체의 발견 이후 현재까지도 임계온도가 보다 높은 고온초전도체가 연구 개발되고 있다. 고온초전도체를 이용한 한류기는 기존 저온초전도체를 이용한 한류기에 비해 높은 임계온도의 특성이 있어 냉각시스템의 비용이 줄어드는 장점이 있다. 또한 설치위치에 따라 발전단 보호와 여러 가지 전력기기들을 보호할 수 있는 능력이 탁월하다[1-4]. 전력계통에서의 초전도한류기 적용 방법은 초전도상태에서 사고가 발생하게 되면 초전도소자가 가지는 임계특성을 넘을 때 발생하는 Quench특성을 이용한다. 즉, 초전도상태에서 상전도 상

태로 전이되는 과정을 이용한 것이 초전도한류기이다[5-7]. 현재 초전도케이블을 송전선로에 적용한 시험연구가 진행 중이며 초전도를 사용하여 핵융합장치 및 전기자동차에 적용하는 연구도 진행되고 있다. 본 논문에서는 초전도체를 사용하여 사고전류 감소와 사고확대 방지를 위해 솔레노이드와 고속 진공 인터럽터를 적용하여 사고전류의 제한 특성을 비교분석하였다. 제한기로는 초전도한류소자와 무유도 저항 두 가지를 이용한 한류 특성을 비교하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 고속 인터럽터 구성

고장전류는 사고지속 시간이 길어질 경우 사고범위가 확대될 위험이 있다. 따라서 사고전류를 감지하여 제한할 수 있는 고속 인터럽터를 제작하였으며 솔레노이드와 VCB차단기를 이용해 그림 1과 같이 제작하였다. 본 논문에서 제안하는 고속 인터럽터는 사고발생시 CT의 사고전류 감지를 통해 Switching Control System에서 전원이 인가되어 동작하게 된다. 전원이 인가된 고속 인터럽터의 솔레노이드는 자화되면서 10mm간격으로 설정했던 밸브가 붙게 되면서 연결되어 있던 VCB 차단기를 동작시킨다. VCB 차단기가 동작 될 때 사고전류는 우회하여 한류기를 통해 제한되는 시스템으로 구성되어 있다. 솔레노이드 밸브의 사양은 표 1과 같으며 간단한 실험을 통해 VCB를 충분히 동작시킬 수 있는 힘을 가진 솔레노이드로 선정하였다. 또한, VCB 정격은 표 2와 같으며 실험에서 최고 인가전압의 사고전류를 충분히 견딜 수 있도록 고려하여 선정하였다.

\* 준 회원 : 조선대학교 전기공학과 석사과정

\*\* 정 회원 : 조선대학교 전기공학과 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 조선대학교 전기공학과 교수

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

접수일자 : 2012년 8월 29일

최종완료 : 2012년 10월 24일

2.1 고속 인터럽터 주변장치 및 회로구성

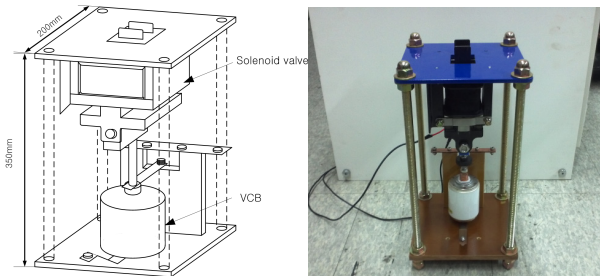


그림 1 솔레노이드와 VCB를 이용한 고속 인터럽터  
 Fig. 1 High-speed interrupter using a solenoid and a VCB

표 1 Solenoid 사양

Table 1 Specifications of a solenoid valve

Parameter	Value
입력전압	AC 220[V]
주파수	50/60[Hz]
무게	10[Kg]
스트로크	10[mm]

표 2 VCB정격

Table 2 The rated of a VCB

Parameter	Value
정격전압	3.6/7.2[KV]
정격전류	400[A]
정격차단전류	4.5[KA]



그림 2 제어장치 및 측정기기  
 Fig. 2 Control and measuring equipment



그림 3 사고발생장치  
 Fig. 3 Fault Generator

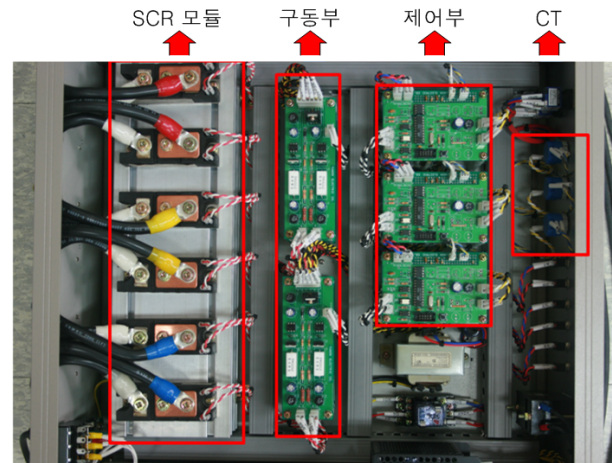


그림 4 Switching Control System의 내부회로  
 Fig. 4 Internal circuit of Switching Control System

표 3 Switching Control System의 요소

Table 3 Element of Switching Control System

System 요소	기능
POWER	ON/OFF
SCR1 ~ SCR6	초기동작 설정
CT1.ADJ ~ CT3.ADJ	동작 전류 값 설정
CT1 ~ CT3	케이블 연결단자
START	시작 SW
STOP	정지 SW
6module / 1module	개별/전체 동작 설정
INPUT AC-220V	입력 케이블 연결 단자
SCR module-1...	출력단자

고속 인터럽터는 대 전류를 우회시키고 제한하여 2차 사고를 방지하는 역할을 한다. 상용전원이 부하(LOAD)로 공급되다가 Fault Generator로 단락사고를 발생시키면 대 전류가 흘러 CT에서 감지를 하게 된다. 그림 2는 실험에 사용된 제어장치와 측정기기를 나타낸다. Fault Generator는 SCR을 역 병렬로 구성되며 그림 3과 같다. 감지된 신호는 Switching Control System에 전달되어 S/D(Slidacs)에 전원을 공급하게 된다. 그림 4은 Switching Control System의 내부회로 사진이며 표 3은 Switching Control System의 요

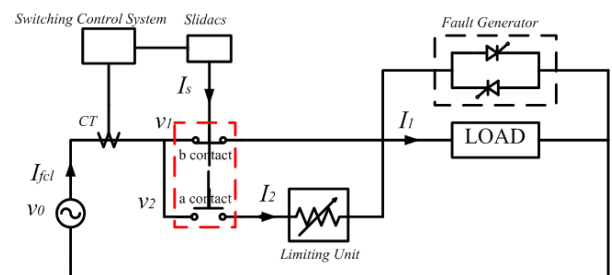
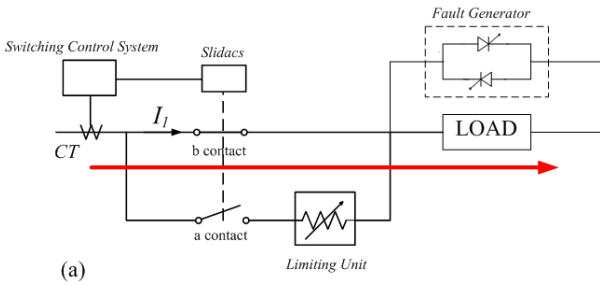
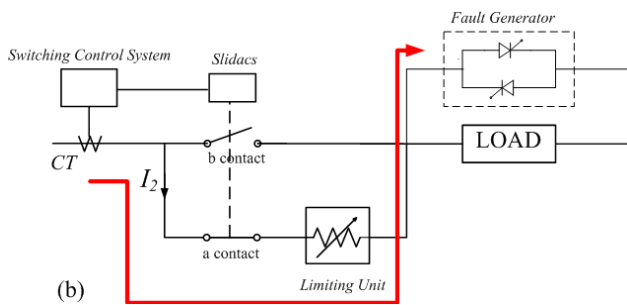


그림 5 고속 인터럽터를 이용한 초전도한류기 개념도  
 Fig. 5 Conceptual diagram of a SFCL using the high-speed interrupter



(a) 정상상태의 전류 흐름도  
(a) Current flow diagram of normal-state



(b) 사고상태의 전류 흐름도  
(b) Current flow diagram of fault-state

그림 6 고속 인터럽터의 전류 흐름도  
Fig. 6 Current flow diagram of the high-speed interrupter

소별 기능을 나타낸다. S/D는 설정된 전압 값을 고속 인터럽터에 공급하여 솔레노이드가 동작하게 된다. 이 과정은 1/2주기 이전에 수행하게 되며 인터럽터의 동작으로 한류기에 의해 사고전류가 제한되어 2차 사고를 방지하게 된다. 그림 5는 고속 인터럽터를 이용한 한류기의 개념도를 나타내며 그림 6의 (a)의 경우 계통이 정상적으로 운전하고 있는 상태이며 전류가 부하(LOAD)로 공급되는 것을 보여준다. 그림 6의 (b)의 경우 사고 상태의 전류 흐름도를 나타내며 사고가 발생하면 사고전류는 CT의 감지를 통해 Switching Control System이 작동한다. 이후 인터럽터가 동작되면서 b접점이 a접점으로 a접점이 b접점으로 변환되어 사고전류는 우회되고 한류기에 의해 제한되는 것을 보여준다. 사고발생 구간이 제거되면 그림 6의 (a)와 같이 인터럽터의 접점이 초기상태로 복귀되어 전원이 정상적으로 부하에 공급된다.

$$V_p = \frac{V_l}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

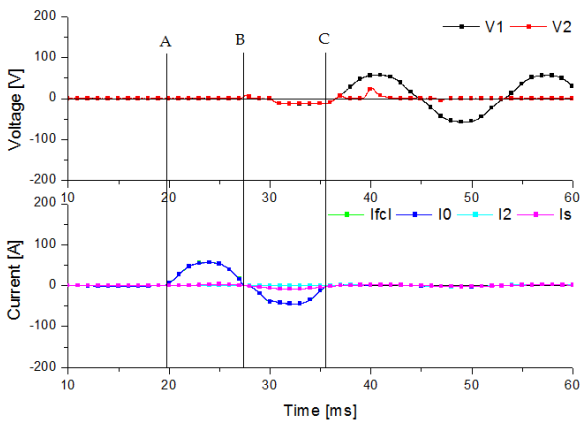
### 2.3 실험방법 및 데이터 분석

실험은 초전도소자와 무유도 저항을 제한기로 사용하여 계통에 적용했을 경우 두 모듈에 대한 사고전류의 제한특성을 분석하였다. 실험을 위해 그림 5와 같은 회로를 구성하였다. 한류부에는 용량증대를 위해 무유도 저항 20[Ω]을 병렬 연결하였고 초전도소자는 YBCO 박막의 임계온도는 85 K

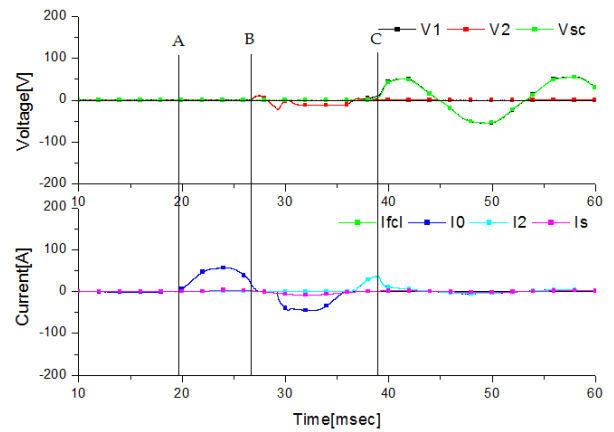
이고 48[A]의 임계 전류 값을 갖는다. 두 소자의 사고전류 특성과 제한율을 비교하기 위해 제한기에 무유도 저항과 초전도체를 교체하여 진행하였다. 실험에 표시되는 전압은 선간전압으로 80, 160, 240[V]이며 실제 측정값은 식 1에 따라 상 전압 값인 48.18, 92.37, 138.56[V]이었다. 데이터신뢰성 확보와 사고전류 및 제한전류를 비교하기 위해 80, 160, 240[V]의 순서로 인가하였고 실험 데이터를 통해 사고발생 시 무유도 저항과 초전도체에 따른 사고전류의 값을 비교하고 사고발생 후 인터럽터의 동작 소요시간과 제한율을 비교 분석하였다. 그림 7의 (a), (b), (c)는 무유도 저항 한류기를 사용한 고속 인터럽터의 전압-전류 특성곡선을 나타낸다. A는 사고 발생지점을 나타내며 B는 사고전류를 인지하여 인터럽터가 동작되는 시점이다. C점은 인터럽터 동작 후 사고전류가 제한되는 지점을 나타낸다. 무유도 저항을 사용한 한류기에 80, 160, 240[V]의 전압을 인가한 경우 A지점에서 사고가 발생하게 되면 사고전류가 흐르게 된다. 이때 CT가 사고전류를 감지하면 Switching Control System이 작동하게 된다. 이후 S/D는 설정된 전압을 인가하여 B점에서 인터럽터가 동작한다. 인터럽터의 접점이 변경되면 C점에서 사고전류가 우회되어 한류기에 의해 제한된다. 그림 7의 (a)의 경우 사고전류는 최대값이 56.1[A]이며 사고발생 후 B점에서 인터럽터가 동작하여 사고전류를 제한하는 C점까지는 9.5[ms]시간이 소요된다. 또한 사고전류 56.1[A]를 2.75[A]로 제한시키는 것을 데이터를 통해 확인할 수 있었다. 그림 7의 (b)의 사고전류는 113.04[A]이며 인터럽터가 동작하는 B점에서 사고전류를 제한하는 C점까지 소요되는 시간은 11.52[ms]이며 제한된 사고전류는 5.69[A]로 나타났다. 그림 7의 (c)의 사고전류는 172.58[A]이며 B에서 C의 구간까지 인터럽터의 접점 변경 시간은 12.03[ms]가 소요되었다. 사고발생 후 172.58[A]의 사고전류는 8.95[A]로 제한되는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 무유도 저항을 사용한 한류기는 고속 인터럽터는 인가전압이 80, 160, 240[V]으로 증가함에 따라 사고전류가 56.10, 113.04, 172.58[A] 증가함을 알 수 있다. 사고전류는 인터럽터 동작 이후 각각 2.75, 5.69, 8.95[A]으로 제한되는 것으로 확인 되었다. 인가전압에 따라 사고전류를  $I_0$ , 제한된 전류를  $I_0'$ 라고 할 때 사고전류 제한율은 식 2에 의해 95.09, 94.96, 94.87[%]로 나타났으며 인가전압이 증가함에 따라 제한율이 낮아지는 것으로 확인되었다. 그림 8의 (a), (b), (c)는 초전도한류기를 사용한 고속 인터럽터의 전압-전류 특성곡선을 나타낸다. 이 경우도 그림 7과 같이 A는 사고발생지점을 나타내며 B는 인터럽터가 동

$$\text{제한율} = \frac{I_0 - I_0'}{I_0} \times 100 \quad (2)$$

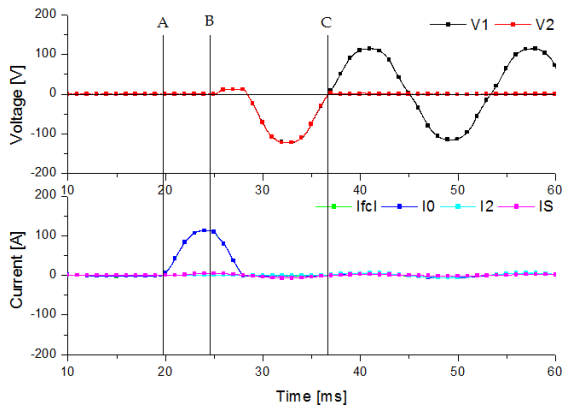
작되는 시작점을 나타낸다. C점은 인터럽터의 b접점이 a접점으로 완전히 개방되고 a접점이 b접점으로 단락된다. 이때 사고전류가 우회하여 한류기에 의해 제한되는 점을 나타낸다. 초전도소자를 제한요소로 사용하여 전압을 80, 160, 240[V]로 인가하였다. 사고를 발생시키면 A지점에서 사고전류가 흐르게 된다. CT가 사고전류를 감지하며 Switching Control System이 작동한다. 이후 S/D가 설정된 전압을 인가하여 B점에서 인터럽터가 동작하게 된다. 그림 8의 (a)의



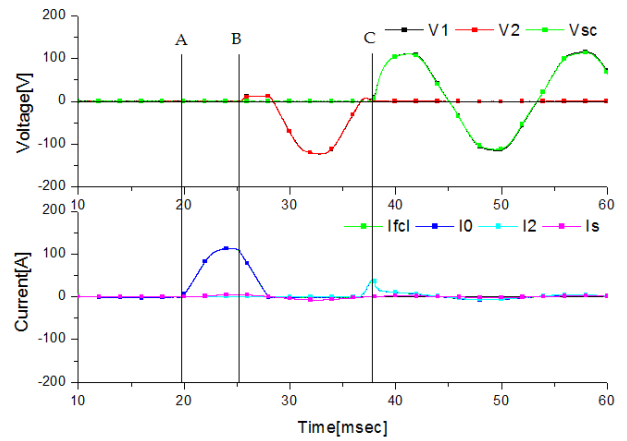
(a) 80V 인가 시 무유도 한류기의 전압-전류 곡선  
 (a) Voltage-Current curves of non-inductive limiter when put the 80V



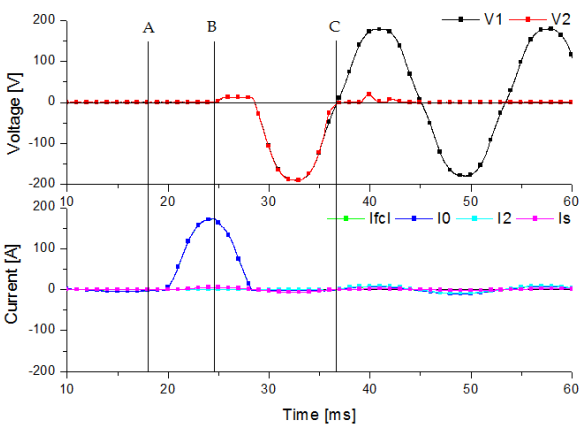
(a) 80V 인가시 초전도한류기의 전압-전류 곡선  
 (a) Voltage-Current curves of SFCL when put the 80V



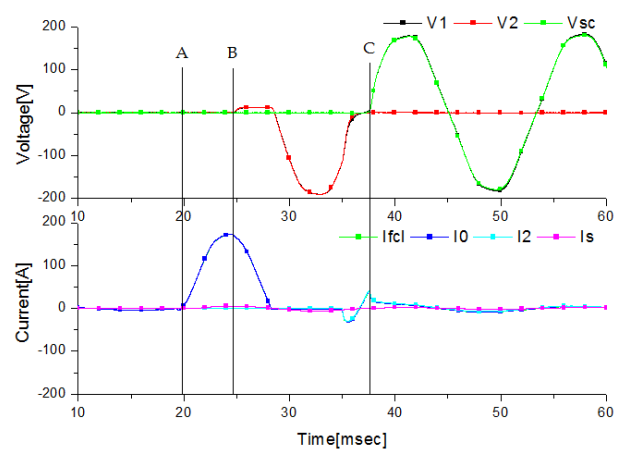
(b) 160V 인가 시 무유도 한류기의 전압-전류 곡선  
 (b) Voltage-Current curves of non-inductive limiter when put the 160V



(b) 160V 인가시 초전도한류기의 전압-전류 곡선  
 (b) Voltage-Current curves of SFCL when put the 160V



(c) 240V 인가 시 무유도 한류기의 전압-전류 곡선  
 (c) Voltage-Current curves of non-inductive limiter when put the 240V



(c) 240V 인가시 초전도한류기의 전압-전류 곡선  
 (c) Voltage-Current curves of SFCL when put the 240V

그림 7 무유도 임피던스를 사용한 한류기 전압-전류곡선  
 Fig. 7 The voltage and current curves of a FCL using the non-induction impedance

그림 8 초전도 한류소자를 사용한 한류기의 전압-전류 곡선  
 Fig. 8 The voltage and current curves of a FCL using the superconducting element

사고전류 값은 56.63[A]이며 사고발생 후 인터럽터는 B점에서 사고전류를 제한하는 C점까지 12.41[ms]가 소요되었고 사고전류는 4.97[A]으로 제한되었다. 그림 8의 (b)의 사고전류는 113.65[A]이며 인터럽터 동작소요시간은 12.61[ms]이고 6.12[A]로 제한시켰다. 그림 8의 (c)의 사고전류는 173.60[A]이며 B점에서 C점까지 인터럽터 동작시간은 12.90[ms]이고 6.98[A]로 제한하는 것을 데이터를 통해 확인 할 수 있다. 초전도한류기를 제한요소로 사용하여 고속 인터럽터에 적용한 경우 인가전압이 80, 160, 240[V]로 증가함에 따라 사고발생시 사고전류가 56.63, 113.65, 173.60[A]로 증가하였다. 인터럽터 동작 이후 제한된 사고전류는 각각 4.97, 6.12, 6.98[A]로 줄어드는 것을 알 수 있었다. 초전도한류기를 제한요소로 사용할 경우 사고전류를  $I_0$ , 제한된 전류를  $I_0'$ 라고 할 때 식 2에 의해 사고전류 제한율은 각각 91.22, 94.61, 95.97[%]로 인가전압이 증가함에 따라 제한율이 증가하는 것으로 확인되었다. 표 4은 인가전압의 증가에 따른 제한요소별 사고전류 제한율을 비교한 것이다. 실험결과 무유도 저항 한류기를 사용한 고속 인터럽터는 인가전압에 따라 제한율이 95.09, 94.96, 94.87[%]으로 감소하였고 초전도한류기를 사용한 고속 인터럽터는 인가전압에 따라 제한율이 91.22, 94.61, 94.84[%]으로 증가함을 확인하였다. 또한 사고가 발생한 A점에서 인터럽터의 완전한 동작으로 사고전류를 제한하는 C점까지 동작시간을 비교하였다. 그 결과 무유도 저항 한류기를 사용한 고속 인터럽터는 인가전압에 따라 16.94, 17.01, 17.05[ms]으로 동작시간이 증가한 반면 초전도한류기를 사용한 고속 인터럽터는 19.52, 18.20, 17.82[ms]으로 동작시간이 감소함을 확인할 수 있었다.

표 4 인가전압에 따른 사고전류 제한율

Table 4 Restriction rates of the fault current

	80[V]	160[V]	240[V]
무유도 저항	95.09[%]	94.96[%]	94.84[%]
초전도 소자	91.22[%]	94.61[%]	95.97[%]

### 3. 결 론

본 논문에서는 고속 인터럽터에 적용된 두 모듈을 각각 사용하여 사고전류를 제한함으로써 사고확대와 2차 사고방지를 위한 한류기를 제안하였다. 실험은 자체 제작한 모의 사고 발생장치와 Switching Control System, 고속 인터럽터를 사용하여 회로를 구성하였다. 계통사고모의 후 무유도 저항이 적용된 경우와 초전도 한류소자가 적용된 경우의 인가전압에 따른 인터럽터 동작시간과 사고전류 제한율을 비교하였다. 실험 결과 고속 인터럽터에 적용된 무유도 저항한류기는 인가전압이 증가함에 따라 사고전류 제한율은 감소하고 사고발생 지점부터 인터럽터가 동작하여 사고전류를 제한하는 시간은 증가하였다. 반면 고속 인터럽터에 적용된 초전도한류기는 인가전압이 증가함에 따라 사고전류 제한율은 증가함을 보였고 사고발생 지점에서 인터럽터가 동작하여 사고전류를 제한하는 시간은 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 저전압에 적용할 경우 큰 차이를 보이지 않지만 송·배전계통에 적용할 경우 두 모듈의 제한율과 인터럽터 동작시간이 큰 차이를 보이게 된다. 이는 무유도 저항 한류기에 비해 초전도한류기를 사용할 경우 전압이 증가함에 따라 사고발생시 인터럽터의 동작이 빨라지게 되고 사고전류제한효율 또한 증가된다는 것을 의미한다. 실험결과에 따라 사고시 사고범위가 확대되지 않는 계통에서는 고가의 초전도체와 냉각시스템을 도입하여 적용하는 것 보다 저가의 무유도 저항 한류기를 적용하는 것이 적절하다고 판단된다. 하지만 송·배전계통의 경우 무유도 저항 한류기에 비해 인터럽터의 동작이 빠르고 사고전류 제한율이 큰 초전도한류기를 적용하는 것이 사고전류 제한효율과 사고확대방지가 더욱 효과적일 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20111020400240)

### 참 고 문 헌

- [1] Yong-Sun Cho, Hyo-Sang Choi, Hyoung-Min Park "Characteristics of Hybrid-Type SFCL by the Number of Secondary Windings with YBCO Films", The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 55A no.2, pp. 62-66, 2006.
- [2] Hyo-Sang Choi "A Study on Combination Technology of a Transformer and a Superconducting Fault Current Limiter", The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 59P no. 3, pp. 330-334, 2010.
- [3] Yong-Sun Cho, Hyo-Sang Choi, Hyoung-Min Park, Soo-Bok Chung, "Characteristics of transformer-Type SFCL according to the Connecting Methods of Secondary Coils", The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 56, no. 12, pp. 2059-2276, 2007.
- [4] T. Matsumura, T. Uchii, and Y. Yokomizu, "Development of flux-lock-type fault current limiter with high-Tc superconducting element", IEEE Trans. Appl. Supercon., vol. 7, no. 2, pp. 1001-1004, 1996.
- [5] R. Kreutz, J. Bock, F. Breuer, K. P. Juengst, M. Kleimaier, H.-U. Klein, D. Krischel, M. Noe, R. Steingass, and K. H. Weck, "System technology and test of curl 10, a 10 kV, 10 MVA resistive high-Tc superconducting fault current limiter," IEEE Trans. on Appl. Superconduct., vol. 15, pp. 1961-1964, 2005.
- [6] 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 FCL", IEEE Trans. on Appl. Superconduct., vol. 20, pp.

1168-1171, 2010.

- [7] Sung-Yul Kim, Wook-Won Kim, Jin-O Kim, "A Study on the Evaluation of Distribution Reliability Considering Reliability Model for a Resistive-Type of Superconducting Fault Current Limiter", The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 60, no. 3, pp. 465-470, 2011.

## 저 자 소 개



### 임인규 (任仁圭)

1987년 9월 5일 생. 조선대학교 전기공학과 졸업 (학사). 2012~현재 동 대학원 전기공학과 (석사과정).

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : asiligol@naver.com



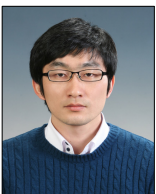
### 최효상 (崔孝祥)

1966년 2월 21일생. 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2003년 한전 전력연구원 선임연구원. 현재 조선대 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr



### 정병익 (鄭柄益)

1981년 8월 25일 생. 2003년 조선대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007~현재 동 대학원 박사 과정.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : chuzang@naver.com