

# 선트리액터의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기를 구성하는 초전도소자들의 전력부담 분석

## Analysis on Power Burden of HTSC Elements Comprising SFCL using Magnetic Coupling of Shunt Reactors

임성훈<sup>1,a</sup>  
(Sung-Hun Lim<sup>1,a</sup>)

### Abstract

The power burden of high-T<sub>c</sub> superconducting (HTSC) elements comprising superconducting fault current limiter (SFCL) using magnetic coupling of shunt reactors was analyzed. The magnetically coupled shunt reactors play a role in distributing the even power burden between HTSC elements comprising the SFCL, which contributes to the effective current limiting and recovery characteristics of the SFCL. It was confirmed through the comparative analysis on the SFCLs with both the magnetically coupled and the magnetically uncoupled shunt reactors that the magnetically coupled shunt reactors could improve the SFCL's performance by equalizing the power burden of HTSC elements.

**Key Words** : High-T<sub>c</sub> superconducting (HTSC) elements, Superconducting fault current limiter (SFCL), Magnetically coupled shunt reactors, Power burden

### 1. 서론

실계통적용을 위한 초전도 전류제한기의 용량증대를 위해서는 단위 초전도소자들의 직·병렬연결이 필수적이다. 하지만, 초전도소자들간의 미세한 임계전류차이는 고장발생시 초전도소자들의 켄치 발생시점을 달리하여 초전도 전류제한기가 동작하여 고장전류를 제한할 때 특정 초전도 소자에 전력부담이 집중되는 현상을 초래하게 되어 비효율적인 전류제한 동작을 수행할 뿐 아니라, 극단적인 경우 초전도 소자의 파손으로 이어질 수 있게 된다[1,2].

이와 같은 문제점들을 해결하기위한 노력에 힘입어 초전도 전류제한기를 구성하는 직·병렬연결된 특히, 직렬연결된 단위초전도 소자들의 동시켄

치를 통해 균일한 전력부담을 유도하기 위한 여러 가지 방안들이 제안되어 유용성을 입증한 사례들이 보고된 바 있다[2-5].

본 논문에서는 초전도 전류제한기를 구성하는 단위초전도소자들의 균일한 전력부담을 유도하기 위한 방안으로 자기적으로 결합된 선트리액터를 적용하는 방안에 대해 분석하였다.

분석을 위한 실험으로 초전도 소자와 선트리액터로 구성된 모의회로를 구성하여 모의단락실험을 수행하였다. 모의단락실험으로부터 전류제한과 회복특성에 대한 분석을 통해 자기적으로 결합된 선트리액터를 이용할 경우에 초전도 소자들간의 균일한 전압분담을 유지하는데 보다 효과적임을 확인할 수 있었다.

1. 숭실대학교 전기공학부

(서울시 동작구 상도5동 1-1)

a. Corresponding Author : superfish73@ssu.ac.kr

접수일자 : 2009. 9. 8

1차 심사 : 2009. 10. 15

심사완료 : 2009. 11. 16

### 2. 등가회로 분석 및 실험장치 구성

#### 2.1 등가회로 분석

그림 1은 자기적으로 결합된 선트리액터를 이용한 초전도 전류제한기의 등가회로를 보여주며, 선

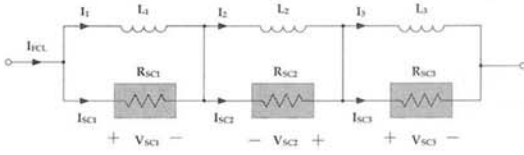


그림 1. 자기적으로 결합된 션트リアक्टर를 이용한 초전도 전류제한기의 등가회로.

Fig. 1. Equivalent circuit of a SFCL using shunt reactors magnetically coupled.

트리아क्टर간의 자기적인 결합은 등가회로의 간략화를 위해 그림에는 나타내지 않았다. 각 초전도소자의 저항( $R_{SC}=R_{SC1}=R_{SC2}=R_{SC3}$ )과 션트리아क्टर의 자기인덕턴스( $L=L_1=L_2=L_3$ )가 동일하고 자기적으로 완전하게 결합되어 있다고 가정할 때 전압, 전류방정식으로부터 제한기 임피던스를 식 (1)과 같이 유도할 수 있다. 반면에, 자기적으로 결합되지 않을 경우 제한기 임피던스는 식 (2)와 같이 전개할 수 있다.

$$Z_{SFCL} = \frac{j9\omega LR_{SC}}{R_{SC} + j3\omega L} \quad (1)$$

$$Z_{SFCL} = \frac{j3\omega LR_{SC}}{R_{SC} + j\omega L} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 비교할 수 있는 것처럼 션트리아क्टर가 자기적으로 결합된 경우 초전도 전류제한기 임피던스가 자기적으로 결합되지 않은 경우보다 증가되는 것을 분석할 수 있으며, 션트리아क्टर의 자기인덕턴스( $L$ )가 증가할 경우 제한기 임피던스 또한 증가되는 것을 분석할 수 있다.

## 2.2 실험장치 구성

단락모의 실험을 위한 회로구성은 전원과 부하를 포함하여, 자기적으로 결합된 션트리아क्टर, 초전도 소자로 구성된 초전도 전류제한기로 그림 2와 같이 구성하였다. 3개의 션트리아क्टर를 동일철심에 설치하여 자기적으로 상호 결합된 경우와 개별철심에 설치하여 자기적으로 서로 분리된 경우에 대해 모의 실험을 실시하였으며, 자기적으로 결합된 경우에는 자기인덕턴스를 증가시켰을 경우에 대해서도 실시하였다.

실험에 사용한 초전도 소자들의 임계전류값은 각각, 21.3 A, 21 A, 22 A였으며, 전원저항 및 부하저항은 각각 1.15 Ω, 41.5 Ω를 사용하였다. 실험

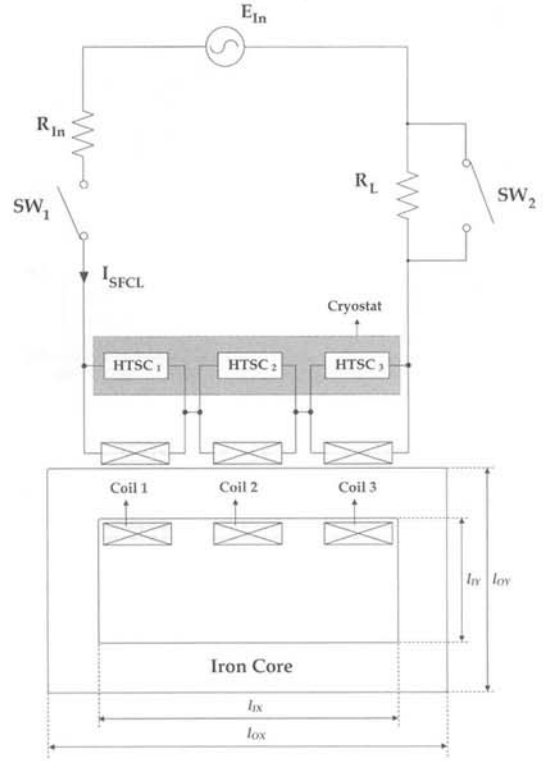


그림 2. 자기적으로 결합된 션트리아क्टर를 이용한 초전도 전류제한기의 실험회로 구성도.

Fig. 2. Experimental circuit of a SFCL using shunt reactors magnetically coupled.

에 사용한 철심 및 션트리아क्टर의 사양을 표 1에 기술하였다. 단락모의 SW1을 투입한 후 SW2를 주어진 주기동안 투입하여 실시하였으며, 다시 SW2를 일정주기동안 개방시켜 각 션트리아क्टर와 초전도 소자에 흐르는 전류와 초전도 소자 양단전압을 측정하여 전류제한과 회복특성을 분석하여 각 초전도소자의 전력부담을 비교하였다.

표 1. 실험에 사용한 철심 및 션트리아क्टर 사양.  
Table 1. Specification of an iron core and shunt reactors.

철심			션트리아क्टर		
설계변수	값	단위	설계변수	값	단위
$l_{oy}$	235	mm	자기인덕턴스 (L)	11	mH
$l_{ox}$	250	mm		45	mH
$l_{iy}$	137	mm	상호인덕턴스 (M)	11	mH
$l_{ix}$	155	mm		45	mH
t	49	mm	결합계수 (k)	1	

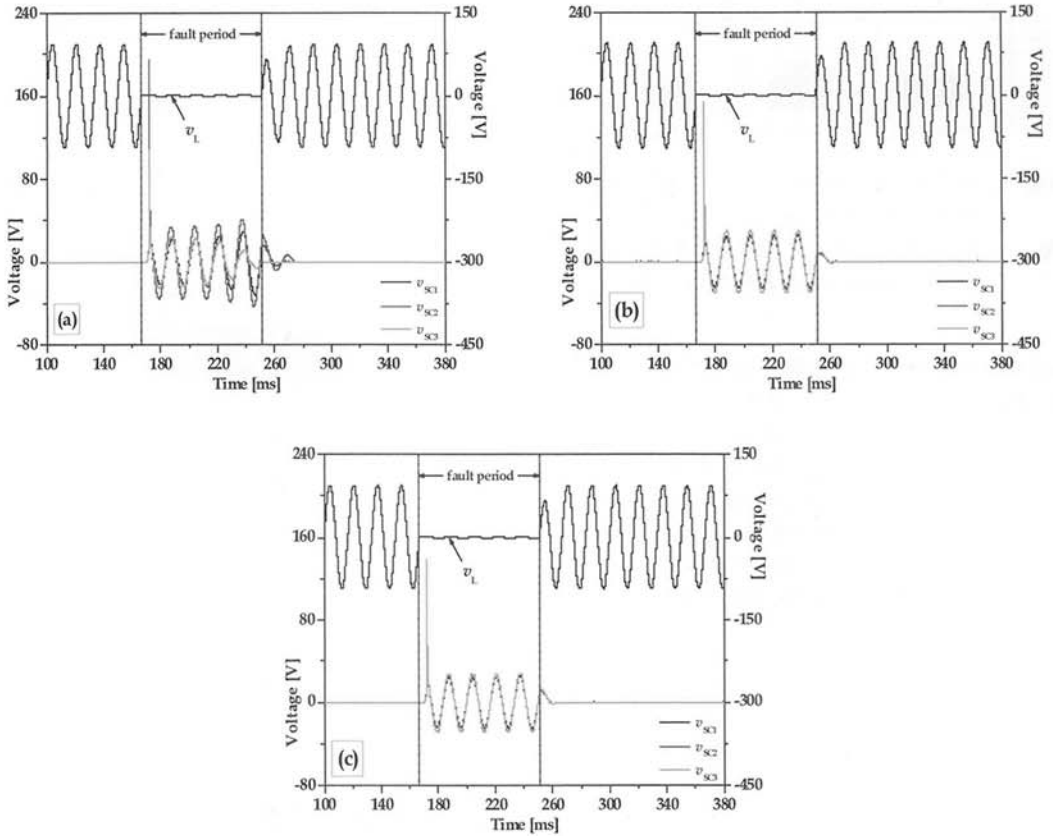


그림 3. 부하전압을 포함한 선트리액터를 이용한 초전도 전류제한기를 구성하는 단위 초전도 소자들의 전압파형.

- (a) 자기적으로 분리된 선트리액터를 적용한 경우 (자기인덕턴스(L) = 45 mH).
- (b) 자기적으로 결합된 선트리액터를 적용한 경우 (자기인덕턴스(L) = 11 mH).
- (c) 자기적으로 결합된 선트리액터를 적용한 경우 (자기인덕턴스(L) = 45 mH).

Fig. 3. Load voltage and voltage waveforms of HTSC elements comprising a SFCL using shunt reactors.

- (a) In case of using shunt reactors magnetically uncoupled (self inductance = 45 mH).
- (b) In case of using shunt reactors magnetically coupled (self inductance = 11 mH).
- (c) In case of using shunt reactors magnetically coupled (self inductance = 45 mH).

### 3. 결과 및 고찰

선트리액터의 자기결합 효과를 비교분석하기 위해, 자기적으로 분리된 선트리액터를 이용한 초전도 전류제한기를 구성하는 초전도 소자들의 전압파형을 분석하였다. 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 자기적으로 분리된 선트리액터를 적용한 경우에는 고장기간동안 초전도소자들의 전압불균형이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 고장제거 직후에도 고장기간 동안

안 유기전압이 크게 나타났던 초전도소자에서 회복이 느리게 진행되는 것을 볼 수 있다. 반면에, 자기적으로 결합된 선트리액터를 적용한 경우(그림 3(b), 3(c))에는 고장기간동안 각 초전도소자에서 유기되는 전압이 균일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 고장기간동안 전력부담이 균일하게 이루어지는 것을 볼 수 있으며 이로 인해 고장제거 후 회복시간 또한 동일하게 이루어져 자기적으로 분리된 경우보다 회복시간이 감소되는 것을 비교할 수 있다.

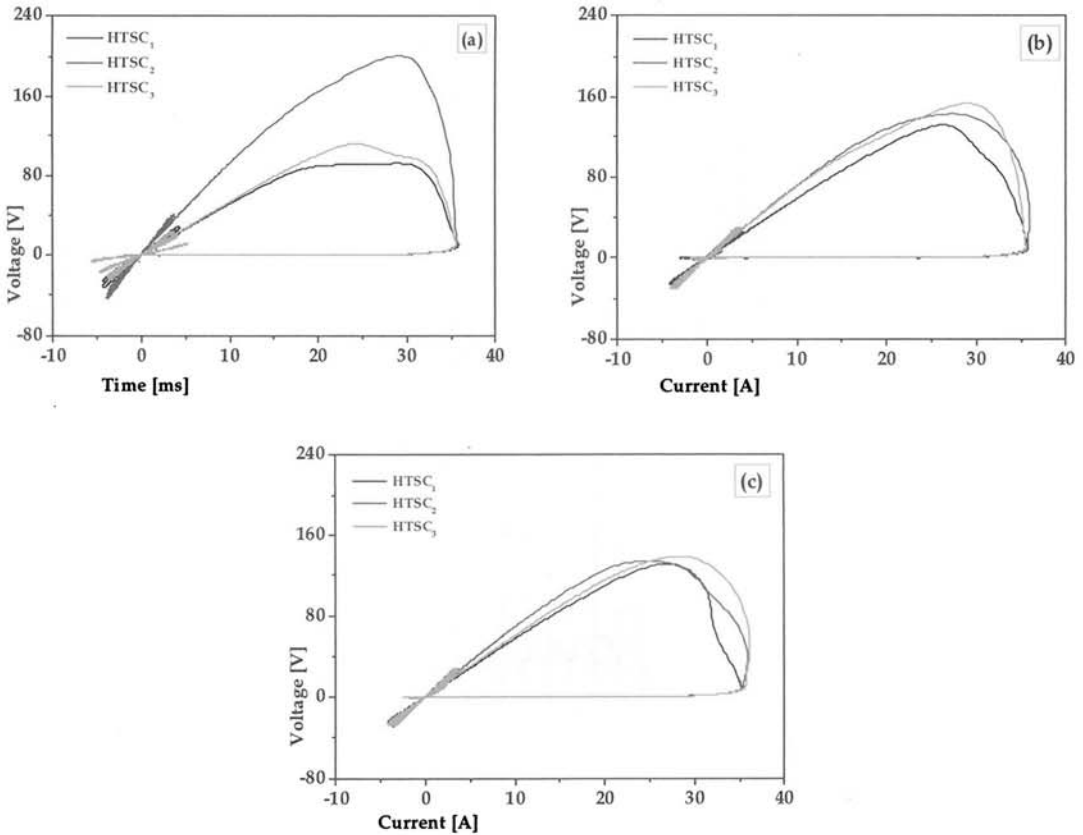


그림 4. 션트리액터를 이용한 초전도 전류제한기를 구성하는 단위 초전도소자들의 전압 전류 궤적.

(a) 자기적으로 분리된 션트리액터를 적용한 경우 (자기인덕턴스(L) = 45 mH).

(b) 자기적으로 결합된 션트리액터를 적용한 경우 (자기인덕턴스(L) = 11 mH).

(c) 자기적으로 결합된 션트리액터를 적용한 경우 (자기인덕턴스(L) = 45 mH).

Fig. 4. Voltage-current tracks of HTSC elements comprising a SFCL using shunt reactors.

(a) In case of using shunt reactors magnetically uncoupled (self inductance = 45 mH).

(b) In case of using shunt reactors magnetically coupled (self inductance = 11 mH).

(c) In case of using shunt reactors magnetically coupled (self inductance = 45 mH).

고장발생동안 초전도소자들이 갖는 전압, 전류부담을 하나의 곡선에서 비교하기 위해 션트리액터의 자기결합유무에 따른 초전도 전류제한기를 구성하는 단위 초전도소자들의 전압 전류 궤적을 그림 4에 도시하였다. 그림 4에서 각 곡선의 기울기는 각 초전도소자의 저항을 나타내며, 자기적으로 결합되지 않은 션트리액터를 이용한 경우에는 각 초전도소자의 전압, 전류궤적이 다르게 나타났으며, 특히, 임계전류가 작은 두 번째 소자의 경우에는 전압, 전류궤적이 다른 두 개의 소자에 비해 크게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 앞선 그림 3에서 분석한 각

초전도 소자에 유기되는 전압파형에서 전압이 크게 발생한 소자에서 그림 4에서 분석한 전압, 전류궤적이 크게 나타나는 것을 예상할 수 있다. 반면에, 자기적으로 결합된 션트리액터를 적용한 경우에는 (그림 4(b), (c)) 각 초전도소자들의 전압, 전류궤적이 동일하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 자기적으로 결합된 션트리액터의 자기인덕턴스가 45 mH에서 11 mH로 감소됨에 따라 초전도전류제한기를 구성하는 초전도소자들의 전압, 전류궤적에서도 그림 3(b), (c)에서 비교분석한 전압파형과 마찬가지로 큰 차이를 보이지 않는 것을 볼 수 있다.

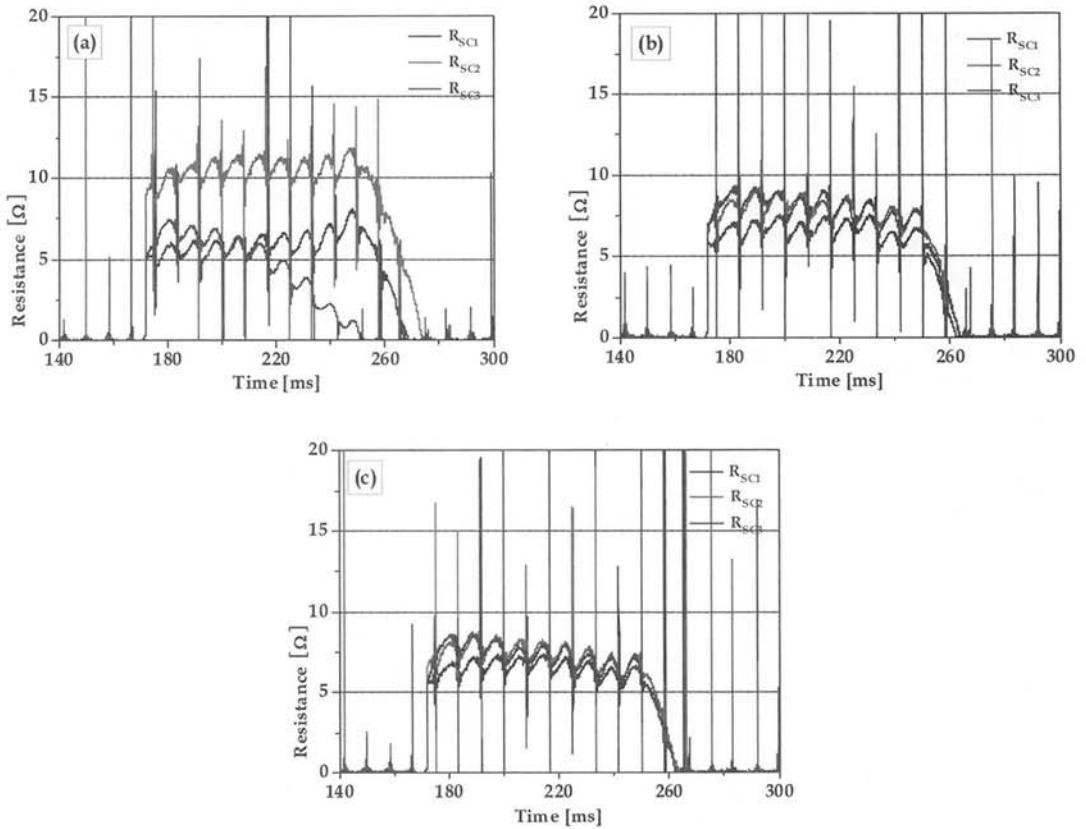


그림 5. 션트リアक्टर를 이용한 초전도 전류제한기를 구성하는 단위 초전도소자들의 저항곡선.

- (a) 자기적으로 분리된 션트리아क्टर를 적용한 경우 (자기인덕턴스(L) = 45 mH).
- (b) 자기적으로 결합된 션트리아क्टर를 적용한 경우 (자기인덕턴스(L) = 11 mH).
- (c) 자기적으로 결합된 션트리아क्टर를 적용한 경우 (자기인덕턴스(L) = 45 mH).

Fig. 5. Resistance curves of HTSC elements comprising a SFCL using shunt reactors.

- (a) In case of using shunt reactors magnetically uncoupled (self inductance = 45 mH).
- (b) In case of using shunt reactors magnetically coupled (self inductance = 11 mH).
- (c) In case of using shunt reactors magnetically coupled (self inductance = 45 mH).

션트리아क्टर를 이용한 초전도 전류제한기를 구성하는 단위 초전도소자들의 저항곡선을 그림 5에 비교하였으며, 자기적으로 분리된 경우 (그림 5(a)) 각 초전도소자들의 저항발생은 서로 다른 크기로 발생하는 것을 볼 수 있으며, 세 번째 초전도소자들의 경우에는 고장구간동안 저항크기가 반대로 감소되어 회복되는 것을 볼 수 있다. 자기적으로 결합된 션트리아क्टर를 이용할 경우 각 초전도소자들의 저항발생은 고장초기에 차이가 발생하기는 했지만 고장이 진행됨에 따라 동일한 크기로 수렴하는 것을

그림 5(b), (c)에서 비교 분석할 수 있다. 또한, 자기적으로 결합된 션트리아क्टर의 자기인덕턴스를 45 mH에서 11 mH로 감소한 경우에 앞서 분석한 그림 4의 초전도 소자들의 전압, 전류특성과 그림 5의 저항곡선에서도 큰 차이를 발견할 수 없는데 이는 다음과 같이 설명할 수 있다.

션트리아क्टर의 자기인덕턴스가 감소할 경우 고장 발생시 병렬연결된 각 초전도소자에 인가되는 전압 크기는 감소되지만, 자기적으로 결합된 션트리아क्टर의 초전도 전류제한기 임피던스는 식 (1)에서 분석한

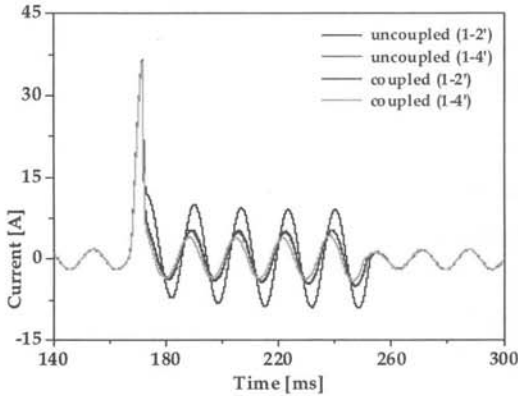


그림 6. 션트리액터를 이용한 초전도 전류제한기의 고장전류파형.

Fig. 6. Fault current waveforms of a SFCL using shunt reactors.

바와 같이 션트리액터의 자기인덕턴스가 감소함에 따라 감소되어 제한전류는 자기인덕턴스가 감소되기 전보다 증가하게 되어 초전도소자의 유기전압은 다시 증가하게 된다. 따라서, 자기인덕턴스 감소에 따른 션트리액터에 연결된 단위초전도소자들의 부담은 큰 차이가 없게 된다.

위와 같은 분석으로부터 자기적으로 결합된 션트리액터의 자기인덕턴스를 감소시키더라도 각 초전도소자의 전압, 전류부담은 큰 차이를 나타나지 않게 되는 것을 설명할 수 있게 된다.

그림 6은 션트리액터의 자기결합 유무와 션트리액터의 자기인덕턴스에 따른 초전도 전류제한기의 고장발생시 제한되는 전류파형을 보여준다. 앞선 션트리액터의 자기결합유무에 따라 유도한 식 (1), (2)의 제한기 임피던스에서 분석한 바와 같이 션트리액터의 자기결합이 있는 경우, 특히, 션트리액터의 자기인덕턴스가 클 경우에 고장전류가 크게 제한되는 것을 확인할 수 있다.

위의 결과로부터, 초전도 전류제한기의 용량증대를 위해 션트리액터를 이용할 경우 하나의 철심을 매개로 션트리액터를 자기적으로 결합하여 구성한다면 제한기를 구성하는 초전도소자들의 전력부담을 동일하게 유지하여 보다 효과적으로 전류제한을 수행할 수 있으며, 초전도 전류제한기의 용량증대에 보다 유리함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

초전도 전류제한기를 구성하는 직렬연결된 단위 초전도소자들의 균일한 전력부담을 유도하기 위한

방안으로 자기적으로 결합된 션트리액터를 적용하는 방안의 유용성을 검증하기 위해 자기적으로 분리된 션트리액터를 적용한 경우와 비교하였다.

초전도 소자와 션트리액터로 구성된 모의회로를 이용한 모의단락실험으로부터 전류제한과 회복특성을 분석하였으며, 자기적으로 결합된 션트리액터를 이용할 경우에 초전도 소자들간의 균일한 전압분담을 유지하는데 보다 효과적임을 확인할 수 있었으며, 자기적으로 결합된 션트리액터의 자기인덕턴스의 변화는 션트리액터에 연결된 단위초전도소자들의 전력부담에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과는 향후 초전도 전류제한기의 실제통용시 용량증대에 따른 동시랜치 유도방안으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2009년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(과제번호 : 2009-0075355)로서 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] O.-B. Hyun, S.-D. Cha, H.-R. Kim, H.-S. Choi, and S.-D. Hwang, "Shunt-assisted simultaneous quenches in series-connected resistive SFCL components", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 13, No. 2, p. 2060, 2003.
- [2] K.-B. Park, J.-S. Kang, B.-W. Lee, I.-S. Oh, H.-S. Choi, H.-R. Kim, and O.-B. Hyun, "Quench behavior of YBaCuO films for fault current limiters under magnetic field", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 13, No. 2, p. 2092, 2003.
- [3] J.-W. Sim, Y.-S. Choi, H.-R. Kim, and O.-B. Hyun, "Equal current distribution in parallel circuits of resistive superconducting fault current limiters using multiple superconducting inter-phase transformers", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 13, No. 2, p. 2092, 2003.
- [4] S.-H. Lim and H.-S. Choi, "Quench characteristics of HTSC elements in series-connected flux-lock type SFCLs through magnetic flux-linkage", *Physica C*, Vol. 445-448, p. 1073, 2006.
- [5] S.-H. Lim, Y.-S. Cho, H.-S. Choi, and B.-S. Han, "Improvement of current limiting capability of HTSC elements in hybrid type SFCL", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 17, No. 2, p. 1807, 2007.