

## 사고각에 따른 자속구속형 전류제한기의 전류제한특성

### Current Limiting Characteristics of Flux-lock Type High-Tc Superconducting Fault Current Limiter According to Fault Angles

박형민<sup>1</sup>, 최효상<sup>1,a</sup>, 조용선<sup>1</sup>, 임성훈<sup>2</sup>, 박충렬<sup>3</sup>, 한병성<sup>3</sup>  
(Hyoung-Min Park<sup>1</sup>, Hyo-Sang Choi<sup>1,a</sup>, Yong Sun Cho<sup>1</sup>, Sung-Hun Lim<sup>2</sup>,  
Chung-Ryul Park<sup>3</sup>, and Byoung-Sung Han<sup>3</sup>)

#### Abstract

We investigated the current limiting characteristics of the flux-lock type superconducting fault current limiter(SFCL) by fault angles. The flux-lock type SFCL consists of the primary and the secondary copper coils wound in parallel through the iron core and YBCO thin film. In this paper, the current limiting characteristics of the flux-lock type SFCL by fault angles in case of the subtractive and the additive polarity windings were compared and analyzed. The flux-lock type SFCL limited fault current more quickly as the fault angles increased. On the other hand, the initial power burden of the superconducting element during the fault increased as the fault angles increased. In addition, we found that the resistance of the flux-lock type SFCL in case of the subtractive polarity winding was more increased than that of the additive polarity winding. The peak current of the fault current in case of the subtractive polarity winding was larger than that of the additive polarity winding.

**Key Words** : Current limiting characteristics, Fault angles, Subtractive polarity winding, Additive polarity winding

#### 1. 서론

현재 국내의 전력계통은 최대 수용증가에 따른 지속적인 설비 증설로 등가임피던스가 점점 작아지고 있고 이에 따라 사고시의 고장전류가 계속 증대되어 송전 계통의 차단기들 중 차단내력을 초과하는 개소가 증가하고 있다. 따라서 사고가 발생하였을 시 고장전류를 안정적으로 제어할 수 없어 전기선로 뿐 아니라 송전계통상의 전력설비까지 영향을 미쳐 그 피해가 막대할 거라 예상된다[1].

단락사고에 대한 대책으로 차단내력이 큰 차단

기의 교체와 계통간의 모선 분리, 고임피던스 전력설비, 직렬 한류리액터 설치등 여러 가지 방법을 강구하고 있지만 계통의 안정도, 경제적, 기술적으로 많은 문제점이 있다[2-4]. 고온초전도 전류제한기는 정상상태에서 임피던스가 제로 이고 빠른 사고 감지와 신속한 복귀를 할 수 있으며 신뢰성이 높고 경제적이기 때문에 이상적인 전류제한기이라 할 수 있다. 그러므로 위의 문제점을 효과적으로 해결할 수 있는 신 개념의 보호기기로 대두되면서 전 세계적으로 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다[5-8].

초전도 전류제한기는 크게 영저항 특성을 이용한 저항형과 마이즈너 효과를 이용한 유도형으로 분류할 수 있다. 저항형 전류제한기는 구조가 간단하고 소형화 할 수 있는 장점이 있으나 용량 증대시 직·병렬 연결이 필수적이고 동시퀀치의 문제점이 있다. 유도형은 고장전류가 직접 초전도체에 흐르지 않아 소자 파손의 우려가 적고 회복시간이 빠르나 초전도체 제작의 어려움과 리액턴스 때문

1. 조선대학교 전기공학과  
(광주시 동구 서석동 375)  
2. 전북대학교 공업기술연구소  
3. 전북대학교 전기공학과  
a. Corresponding Author : hyosang@chosun.ac.kr  
접수일자 : 2005. 5. 14  
1차 심사 : 2005. 6. 30  
2차 심사 : 2005. 7. 13  
심사완료 : 2005. 7. 17

에 파형변이 있을 수 있는 단점이 있다[9,10].

본 논문에서 실험한 자속구속형 전류제한기는 영저항 특성을 이용한 저항형으로 분류할 수 있으며 고장전류가 코일과 소자에 양분되어 흐르기 때문에 소자 파손의 우려가 적고 단락용량이 저항형에 비해 증가될 수 있는 장점이 있다. 또한 유도형 전류제한기처럼 코일을 이용하지만 초전도 소자는 YBCO 박막을 사용하기 때문에 소자제작이 유도형 보다 간단하다는 장점이 있다.

전력계통내에서 고장시점의 사고각은 상황에 따라 변화한다. 따라서 본 절에서는 자속구속형 전류제한기의 결선방향과 사고각에 따른 전류제한 특성을 실험을 통해 비교·분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 자속구속리액터 설계 및 제작

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구성 요소인 자속구속 리액터는 하나의 철심코어와 두개의 코일로 구성된다. 누설자속을 최소화하기 위해 그림 1과 같이 적층된 구조로 두 개의 코일을 결선하였으며 사고발생 후에 두 코일에 균일하게 흐르는 점을 고려하여 코일 1의 턴수를 코일 2의 턴수보다 크게 설계하였다. 또한, 코일 2는 중간에 탭을 내어 코일 2의 턴수를 2개로 변화시킬 수 있도록 하였다. 그림 1은 제작한 자속구속리액터 외형을 보여준다.

### 2.2 결선방향에 따른 등가회로도

그림 1과 2는 결선방향에 따른 등가회로도를 나타내고 있다. 자속구속형 전류제한기의 동작은 사고시 코일 1, 2의 결선방향에 따라 철심코어에서 발생되는 쇄교자속이 증가하거나 감소하게 되는데

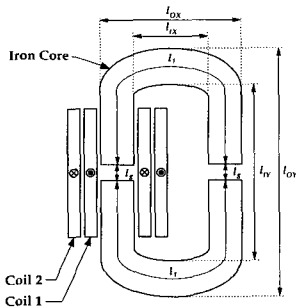


그림 1. 자속구속리액터의 구조.  
Fig. 1. Structure of a flux-lock type reactor.

증감여부에 의해 감극결선시 및 가극결선시로 나누어 동작할 수 있다. 코일 1의 전압을  $V_1$ , 코일 2의 전압을  $V_2$ , 소자전압을  $V_{SC}$ 라 하고 선로전류를  $I_{FCL}$ , 코일 1의 전류를  $I_1$ , 코일 2의 전류를  $I_{SC}$ 라 하면 감극결선일 경우 식 (1), (2)과 같이 전압·전류 관계식을 얻을 수 있다.

$$I_{FCL} = I_1 + I_{SC} \quad (1)$$

$$V_{SC} = V_1 + V_2 \quad (2)$$

가극결선일 경우 식(1), (2)과 같이 전압·전류 관계식을 얻을 수 있다.

$$I_{FCL} = -I_1 + I_{SC} \quad (3)$$

$$V_{SC} = V_1 - V_2 \quad (4)$$

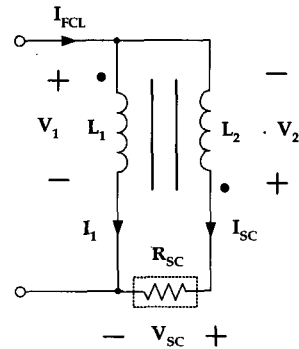


그림 2. 리액터의 감극결선시 등가회로.  
Fig. 2. Equivalent circuit of subtractive polarity winding between the two reactors.

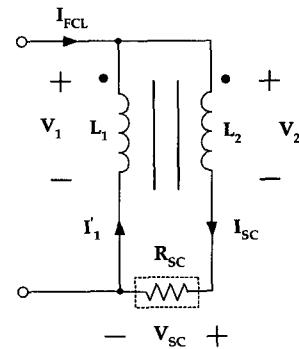


그림 3. 리액터의 가극결선시 등가회로.  
Fig. 3. Equivalent circuit of additive polarity winding between the two reactors.

### 2.3 실험장치 및 방법

자속구속형 전류제한기의 실험회로도도 그림 4와 같이 구성하였다.  $V_S$ 는 60 V<sub>rms</sub>로 인가된 전원 전압이고  $R_{in}$ 은 전류변화를 측정하기 위한 1 Ω짜리 기준저항을 나타내며 부하저항  $R_L$ 은 50 Ω으로 설정하였다. 코일 1과 코일 2를 감극결선 및 가극결선으로 한 후 그림에서 스위치  $SW_1$ 을 닫아 회로에 전압을 인가했다. 회로에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하지 않았기 때문에 자속구속형 고온 초전도 전류제한기는 단락선로처럼 동작했다. 스위치  $SW_2$ 를 닫아 단락사고를 발생시키면 고온초전도 소자에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하게 되고 켄치가 발생한다. 이때, 회로에 흐르는 선로전류( $I_{FCL}$ ), 코일 1에 흐르는 전류( $I_1$ ), 초전도소자에 흐르는 전류( $I_{SC}$ ), 코일 1, 2의 양단전압( $V_1, V_2$ )과 초전도소자 양단전압( $V_{SC}$ )을 사고각을 ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ )변화하면서 측정하였다.

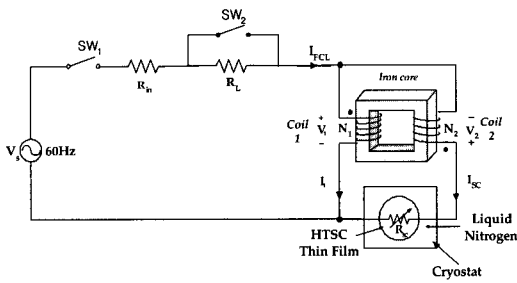


그림 4. 자속구속형 전류제한기의 실험회로도.  
Fig. 4. Circuit diagram for experiment of flux-lock type SFCL.

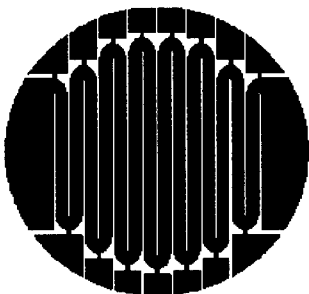


그림 5. 초전도 한류소자의 패턴모양.  
Fig. 5. The pattern shape of a superconducting current limiting element.

그림 5는 이번 실험에 사용한 초전도 소자인 YBCO 박막의 패턴형태를 보여주고 있다. 초전도 한류소자는 직경 2 inch의  $Al_2O_3$  기판 위에 성장된 두께 0.3  $\mu m$ 의  $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막을 이용하여 제작하였다. 독일 THEVA사에서 제작하였고 전체 길이 420 mm, 임계온도와 임계전류는 각각 87 K, 18 A의 제원을 가지고 있고 그림처럼 meander 형태로 이루어져 있다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 6은 자속구속형 전류제한기의 감극결선시 전류파형을 나타낸 그림이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 사고가 발생하여 선로전류( $I_{FCL}$ )가 급격히 증가하지만 초전도 소자의 임계전류를 넘는 순간 선로전류( $I_{FCL}$ )는 소자의 상전도 저항으로 인해 반주기만에 제한되는 것을 알 수 있다. 또한 등가회로도에서 유도한 식 (1)과 비교적 일치함을 확인할 수 있다. 사고각이 증가할수록 초전도 소자의 켄치 발생속도가 빠르게 진행되기 때문에 신속하게 사고전류를 제한하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 사고 직후 선로전류( $I_{FCL}$ ), 초전도소자에 흐르는 전류( $I_{SC}$ ), 코일 1에 흐르는 전류( $I_1$ )의 값들이 증가하지만 반주기만에 제한되어 3주기 이후에는 일정하다는 것을 확인할 수 있다. 이는 사고각이 증가할수록 고장되는 시점에 전류값이 높기 때문에 전류값들이 증가하는 것을 알 수 있고 3주기이후에 초전도체가 완전하게 상전도 상태가 되는 것을 알 수 있다.  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 에서 선로전류( $I_{FCL}$ )를 비교하였을때  $90^\circ$  선로 전류 피크값이 49 A로 가장 높은 값이 나왔는데 자속구속형 전류제한기 설계시 최대용량 한계를 결정하는데 사고각을 고려해서 설계 하여야겠다.

그림 7은 자속구속형 전류제한기의 감극결선시 전압파형을 나타내고 있다. 그림 7을 보면 사고 발생 직후 전압이 발생하는 것이 아니라 초전도소자가 임계전류를 넘어 켄치가 될 때 상전도 저항에 의해 전압이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 식 (2)와 비교적 일치함을 확인할 수 있다. 사고각이 증가 할수록 초전도 소자의 전압이( $V_{SC}$ ) 빠르게 발생하는 것을 확인할 수 있고 초전도소자의 최대전압은 사고각이 증가 할수록 감소하였는데 이는 빠른 켄치의 발생으로 전류가 감소하였기 때문이다.

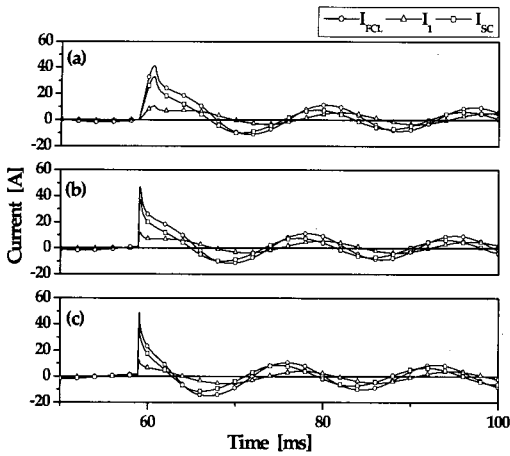


그림 6. 감극 결선시 사고각에 따른 전류파형(인가전압 : 60 V).  
(a) 0° (b) 45° (c) 90°.

Fig. 6. Current waveforms in subtractive polarity winding according to fault angles (applied voltage : 60 V).

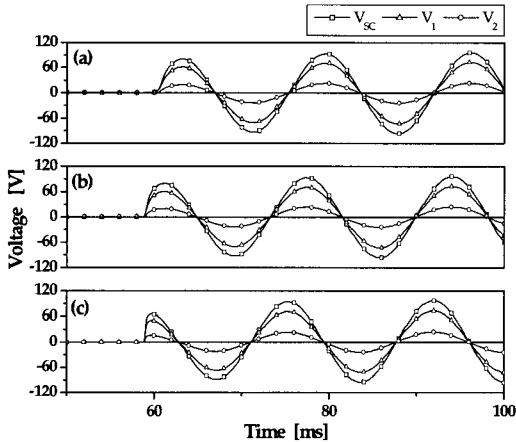


그림 7. 감극 결선시 사고각에 따른 전압파형(인가전압 : 60 V).  
(a) 0° (b) 45° (c) 90°.

Fig. 7. Voltage waveforms in subtractive polarity winding according to fault angles (applied voltage : 60 V).

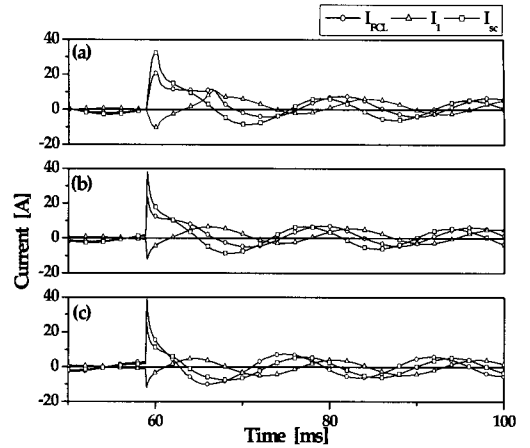


그림 8. 가극 결선시 사고각에 따른 전류파형(인가전압 : 60 V).  
(a) 0° (b) 45° (c) 90°.

Fig. 8. Current waveforms in additive polarity winding according to fault angles (applied voltage : 60 V).

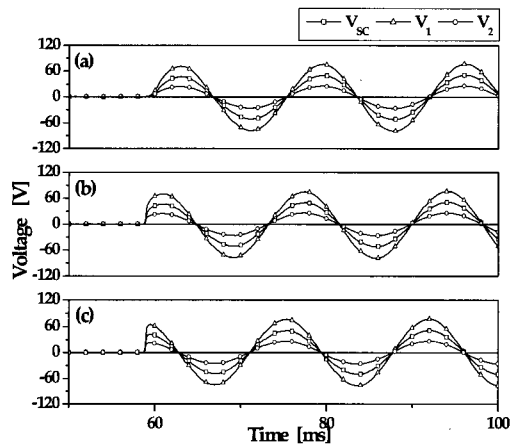


그림 9. 가극 결선시 사고각에 따른 전압파형(인가전압 : 60 V).  
(a) 0° (b) 45° (c) 90°.

Fig. 9. Voltage waveforms in additive polarity winding according to fault angles (applied voltage : 60 V).

그림 8은 자속구속형 전류제한기의 가극결선시 전류파형을 나타내고 있다. 식 (3)에서 확인했던 바와 같이 사고 전 코일 1과 코일 2에 흐르는 전류에서 180°의 위상차가 발생되고 있으며, 이로 인해 사고발생과 동시에 초전도소자의 전류( $I_{SC}$ )가 양의 방향으로 증가됨에 따라 코일1의 전류( $I_1$ )는 음의 방향으로 증가함을 관찰할 수 있다. 이후 초전도소자의 저항이 증가함에 따라 초전도소자에

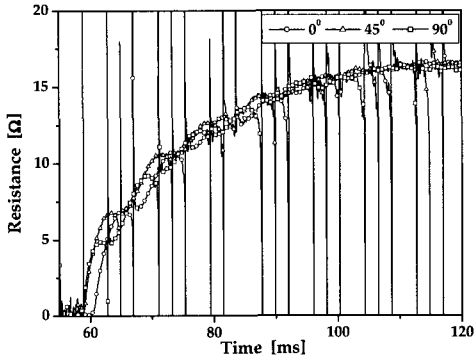


그림 10. 감극 결선시 사고각에 따른 소자 전체 저항 비교(인가전압 : 60 V).

Fig. 10. The whole resistances generated from element in subtractive polarity winding according to fault angles(applied voltage : 60 V).

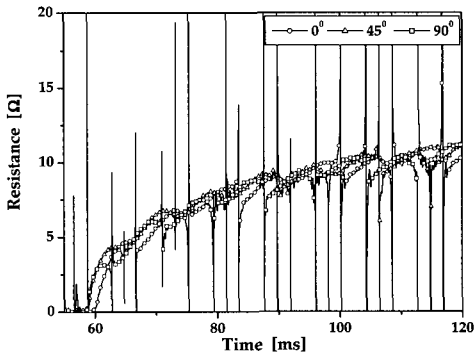


그림 11. 가극 결선시 사고각에 따른 소자 전체 저항 비교(인가전압 : 60 V).

Fig. 11. The whole resistances generated from element in additive polarity winding according to fault angles (applied voltage : 60 V).

흐르는 전류( $I_{SC}$ )는 감소되고 코일1에 흐르는 전류( $I_1$ )는 음의 값에서 영점을 향하는 것을 볼 수 있다. 사고각이 증가할수록 감극결선시와 마찬가지로 사고 직후 선로전류( $I_{FCL}$ ), 초전도소자에 흐르는 전류( $I_{SC}$ ), 코일1에 흐르는 전류( $I_1$ )의 값들이 증가하지만 반주기만에 제한되어 3주기 이후에는 일정하다는 것을 확인 할 수 있다.

그러나 동일한 사고각에서 선로전류( $I_{FCL}$ ) 피크 값이 감극결선시보다 가극결선시 적은값이 나온 것으로 보아 전류제한특성이 더 좋은 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 가극결선시 전압파형을 나타내고 있다. 식 (4)와 비교적 일치함을 확인할 수 있다. 사고각이 증가할수록 감극결선시와 마찬가지로 초전도소자의 전압( $V_{SC}$ )이 빠르게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 10과 11은 자속구속형 전류제한기의 감극결선시와 가극결선시 사고각에 따른 초전도소자의 저항( $R_{SC}$ )변화 파형을 보여주고 있다. 그림 10과 11에서 알 수 있듯이 사고직후 반주기 안에 초전도체에 저항이 급격히 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 3주기 이후에 초전도체에 상전도 전이가 완전하게 이루어져 일정한 값에 도달되는 것을 확인할 수 있다. 이는 반주기 동안의 저항의 급격한 발생으로 전류를 제한하는 것을 알 수 있고 3주기 이후에 전류가 안정하게 제한되는 것을 알 수 있다. 감극결선과 가극결선 모두 사고각이 증가할수록 반주기동안 저항이 빨리 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 반주기이후에는 사고각에 따라 초전도 소자의 저항( $R_{SC}$ )값은 일정했다. 또한 동일 조건시 감극결선시가 가극결선보다 저항값이 더 높은 것으로 보아 용량중대시 감극결선이 더 유리할 것으로 사료된다. 그러나 감극결선시 높은 저항의 열 발생으로 초전도 소자에 무리한 부담을 줄 수 있는 염려가 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 사고각에 따른 전류제한특성을 감극결선 및 가극결선시로 나누어 비교분석 하였다. 감극결선과 가극결선시 사고각이 증가할수록 초전도소자의 켈치 발생속도가 빠르게 진행되기 때문에 사고전류를 더 신속하게 제한 할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 반주기동안에 선로전류( $I_{FCL}$ ), 초전도소자전류( $I_{SC}$ ), 코일1의 흐르는 전류( $I_1$ ) 초전도소자 전압( $V_{SC}$ )이 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

이는 고장되는 시점에 전류가 높기 때문이라고 생각된다. 동일조건시 가극결선시 전류제한특성이 더 좋았으나 용량 증대시 감극결선시 더 우수하다는 것을 알 수 있었다. 초전도소자의 저항( $R_{SC}$ )을 분석한 결과 동일 조건에서 감극결선시 높은 저항의 열 발생으로 초전도 소자 파괴의 우려가 있었다. 전력계통내에서 사고각은 고장위치, 고장원인 등에 따라 변화하기 때문에 가장 가혹한 조건에서 견딜 수 있는 전류제한기를 제작하기 위해서는 사고각을 고려해서 제작해야 되겠다.

### 참고 문헌

- [1] 김영선, 이강완, “고장전류 저감을 위한 345 kV 직렬리액터 설치검토”, 전기저널, 1권, 1호, p. 37, 2000.
- [2] R. K. Smith, P. G. Slade, M. Sarkozi, E. J. Stacey, J. J. Bonk, and M. Mehta, “Solid state distribution current limiter and circuit breaker: application requirements and control strategies”, IEEE Trans. Power Deli., Vol. 8, No. 3, p. 1155, 1993.
- [3] W. Paul and M. Chen, “Superconducting control for surge currents”, IEEE Spectrum, Vol. 35, No. 5, p. 49, 1998.
- [4] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, “차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시물레이션”, 전기학회논문지, 48권, 3호, p. 173, 1999.
- [5] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, “15 kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성”, 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, p. 1058, 2000.
- [6] 김태중, 강형구, 고태국, “유도형 고온초전도 한류기용 prototype 직류 리액터의 설계와 제작”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 12S호, p. 1292, 2003.
- [7] 최효상, 황시돌, 현옥배, “1선 지락사고에 대한 배전급 저항형 초전도 한류기의 전류제한 특성”, 전기전자재료학회논문지, 14권, 6호, p. 505, 2001.
- [8] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성 “자속 구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교”, 전기전자재료학회논문지, 18권, 4호, p. 363, 2005.
- [9] Y. Jiang, S. Dongyuan, D. Xianzhong, T. Yuejin, and C. Shijie, “Comparison of superconducting fault current limiter in power system”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, No. 1, p. 43, 2001.
- [10] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, and W. Lanz, “Fault current limiter based on high temperature superconductors—different concepts, test results, simulations, applications”, Physica C, Vol. 354, No. 1-4, p. 27, 2001.