

## 자속구속형 전류제한기의 초기 사고전류 제한시점 변화

### Variance of Initial Fault Current Limiting Instant in Flux-lock Type SFCL

박충렬<sup>1,a</sup>, 임성훈<sup>2</sup>, 박형민<sup>3</sup>, 최효상<sup>3</sup>, 한병성<sup>1</sup>

(Chung-Ryul Park<sup>1,a</sup>, Sung-Hun Lim<sup>2</sup>, Hyoung-Min Park<sup>3</sup>, Hyo-Sang Choi<sup>3</sup>, and Byoung-Sung Han<sup>1</sup>)

#### Abstract

A flux lock-type SFCL consists of two coils which are wound in parallel each other through an iron core, and a HTSC thin film connects in series with coil 2. The operation of the flux-lock type SFCL can be divided into the subtractive polarity winding and the additive polarity winding operations according to the winding directions between coil 1, coil 2. When a fault occurs, the fault current in the HTS thin film exceeds the critical current so that resistance is generated in the HTS film, and thereby the fault current is limited by an instant rise in the impedance of the flux-lock type SFCL. We investigated the variances of initial fault current limiting instant according to the ratio of inductance of coil 1 and coil 2 in the flux-lock type SFCL. It was confirmed from experiments that the initial fault current limiting instant in the subtractive polarity and additive polarity windings were faster as the ratio of coil 2' inductance for coil 1's inductance increased. The 1st peak of fault current in case of the subtractive polarity winding was higher as the ratio of coil 2's inductance for coil 1's inductance increased. On the other hand, in case of the additive polarity winding, the 1st peak of fault current was lower.

**Key Words :** The flux-lock type SFCL, Subtractive polarity winding, Additive polarity winding, Limiting instant

#### 1. 서론

지속적인 전력수용의 증가와 더불어 대단위 발전설비가 증가됨에 따라 전력전송 용량이 날로 증가하게 되었다. 전력전송 용량의 증가는 단락사고로 인한 사고전류의 증가를 야기시켰고, 증가된 사고전류는 전력계통과 장비들의 안정도 문제에 심각한 영향을 주게 되었다[1]. 증가된 고장전류로 인한 계통보호 방안으로 여러가지 고온초전도 전류제한기가 제안되었다[2-8]. 이러한 고온초전도 전류제

한기 중 자속구속형 전류제한기는 영저항의 특성을 이용하기 때문에 저항형 고온초전도 전류제한기로 분류된다. 저항형 고온초전도 전류제한기는 사고전류가 소자에 직접 도통되기 때문에 고온초전도 소자 파손의 우려가 크다. 또한 고온초전도 소자의 직병렬연결을 통해 용량을 증대시킬 수 있지만 소자의 동시퀀치 문제가 시급히 해결해야 할 과제로 남아있다. 이에 비해 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 사고전류가 코일과 소자에 양분되어 흐르기 때문에 저항형 고온초전도 전류제한기에 비해 고온초전도 소자 파손의 우려가 적다. 또한 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 인덕턴스의 조절로 사고전류를 조절할 수 있고, 단위소자의 통전전류 및 한류저항이 증가하는 구조로 되어 있기 때문에 저항형 고온초전도 전류제한기에 비해 단위소자의 수가 감소된다. 뿐만아니라 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 유도형 고온초전도

1. 전북대학교 전기공학과  
(전북 전주시 덕진동 1가 664-14)  
2. 전북대학교 공업기술연구소  
3. 조선대학교 전기공학과  
a. Corresponding Author : clarkpark86@hotmail.com  
접수일자 : 2004. 12. 6  
1차 심사 : 2004. 12. 30  
심사완료 : 2005. 2. 4

전류제한기처럼 철심을 사용하지만 링이나 튜브형태의 고온초전도 소자대신 벌크나 YBCO 박막같은 저항형 한류소자를 사용하기 때문에 제작이 용이하다. 또한 평상시 철손손실이 적기 때문에 유도형 고온초전도 전류제한기의 단점을 보완할 수 있다.

자속구속형 고온초전도 전류제한기는 정상 작동시 철심에 교류자속이 발생되지 않다가 사고전류가 임계전류를 넘으면 고온초전도 소자에 저항이 발생하게 되고, 이로 인해 쇄교자속의 시간적인 변화가 생긴다. 결국 각 코일에 전압이 유기되어 사고전류를 제한하는 방식이다[9].

본 논문에서는 이러한 자속구속형 전류제한기를 설계, 제작하여 1차코일과 2차 코일의 인덕턴스의 비율을 달리하여 초기 사고전류 제한 시점의 변화를 실험을 통해 비교분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 자속 구속형 고온초전도 전류제한기의 구조 및 동작원리

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조는 그림 1과 같이 강자성체 철심에 코일 1과 코일 2가 각각  $N_1$ ,  $N_2$ 번 권선되어 선로에 병렬연결되어 있다. 고온초전도 소자(YBCO박막)는 임계온도 특성을 고려해 액체질소가 담겨진 Cryostat 내부에 존재하며 코일 2에 직렬 연결되어 있다. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작특성은 병렬로 연결된 코일 1과 코일 2의 결선 방향에 따라 가극성과 감극성으로 나누어진다. 코일 1과 코일 2에 유도되는 전압을  $V_1$ 과  $V_2$ 라 하면 각 코일의 전압은 식 (1)과 (2)와 같이 표현된다.

$$V_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

$$V_2 = \pm N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

정상 작동시 고온초전도 소자 양단전압은 0이므로 코일 1과 코일 2의 양단 전압은 같게 되어 식 (3)과 같이 표현된다.

$$(N_1 \pm N_2) \frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (3)$$

식 (3)에서  $N_1 \pm N_2 \neq 0$ 이 만족한다면  $d\Phi/dt=0$ 은 언제나 성립된다. 이것은 각 코일에 쇄교되는 자속은 시간적으로 변하지 않고 구속되어 있는 것처럼 동작한다. 사고전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 초과하면 소자의 켄치발생으로 저항( $R_{sc}$ )이 발생하고 이로 인해 전압( $V_{sc}$ )이 유기된다. 결국 식 (3)은 더 이상 성립되지 않는다. 따라서 코일의 쇄교 자속은 시간에 따른 변화가 생기게 되고 이로써 사고전류는 제한된다.

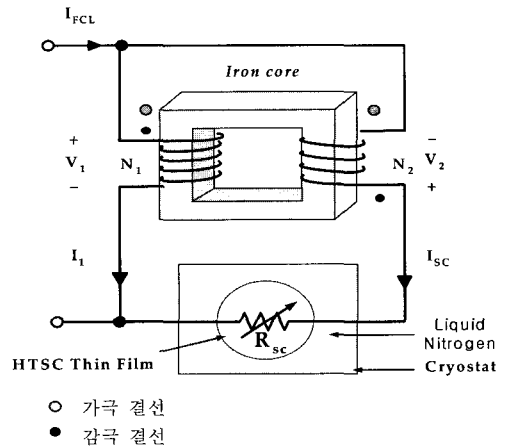


그림 1. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조.  
Fig. 1. Scheme of flux-lock type HTSC fault current limiter.

그림 1의 구조로부터 그림 2의 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로를 유도할 수 있다.

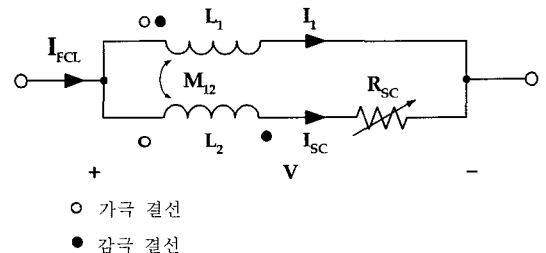


그림 2. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로.  
Fig. 2. Equivalent circuit of flux-lock type HTSC-FCL.

그림 2의 등가회로로부터 식 (4)에서 식 (6)과 같은 제한기의 임피던스와 전류에 관계식을 얻을 수 있다.

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega R_{SC} L_1}{j\omega L^2 + R_{SC}} \quad (4)$$

$$\frac{I_{SC}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega(L_1 + \sqrt{L_1 L_2})}{j\omega L^2 + R_{SC}} \quad (5)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega\sqrt{L_1 L_2} + j\omega L_2 + R_{SC}}{j\omega L^2 + R_{SC}} \quad (6)$$

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 사고 발생 직후에 고온초전도 소자에 흐르는 전류가 임계전류값( $I_q$ )에 도달 되었을 때 초기 제한 전류를  $I_{ini}$ 로 정의하고 식 (5)에서  $R_{sc}=0$ ,  $I_{sc}=I_q$ 을 대입하여 정리하면 식 7과 같은 초기제한 선로전류에 관한 식으로 유도될 수 있다.

$$I_{ini} = \left(1 \pm \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}\right) I_q = \frac{L}{\sqrt{L_1}} I_q \quad (7)$$

$L = \sqrt{L_1} \pm \sqrt{L_2}$  이고 +또는 부호는 1, 2차 코일에 의한 자속의 증감에 따라 결정된다. 위 식에서 보는 것처럼 초기 제한되는 선로전류 크기를 코일 1과 코일 2의 인덕턴스 값을 조절함으로써 설정할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 2.2 실험장치 및 방법

자속구속형 전류제한기의 초기 사고전류제한 시점에 대한 실험회로도에는 그림 3과 같이 나타난다.  $V_s$ 는 60 V<sub>rms</sub>로 인가된 전원 전압이고  $R_{in}$ 은 전류 변화를 측정하기 위한 1 Ω짜리 기준저항을 나타내며 부하저항  $R_L$ 은 50 Ω으로 설정하였다.

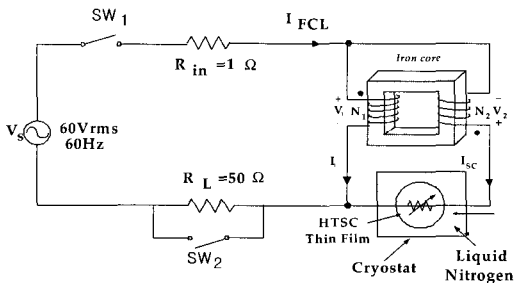


그림 3. 실험 회로 구성도.  
Fig. 3. Diagram of the circuit for experiment.

저항형 한류소자에는 벌크보다는 임계밀도가 높은 YBCO박막을 사용하였다. 저항형 한류소자로 사용된 YBCO박막은 직경 2 inch, 전체 길이 420 mm, 스트립 폭 2 mm, 임계전류 17 A, 임계온도 87 K의 제원을 가지고 있다.

코일 1과 코일 2를 감극으로 결선한 후 그림 5에서 스위치 SW<sub>1</sub>을 닫아 회로에 전압을 인가했다. 회로에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하지 않았기 때문에 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 단락선로처럼 동작했다. 스위치 SW<sub>2</sub>를 닫아 단락 사고를 발생시키면 고온초전도 소자에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하게 되고 켄치가 발생했다. 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 측정하였다. 또 코일 1과 2의 턴수를 변화시켜 위와 동일한 실험을 수행하고 측정된 전류, 전압 데이터로부터 코일 1과 2의 감극 결선시 초기 사고전류제한 특성을 살펴보았다.

코일 1과 코일 2를 가극으로 결선한 후 코일 1과 코일 2의 턴수를 변화시켜 위와 동일한 실험을 반복 수행한 후 측정된 전류, 전압 데이터로부터 코일 1과 코일 2의 가극 결선 시 초기 사고전류제한 특성을 살펴보았다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 4는 저항형 고온초전도 전류제한기의 사고 발생 직후 전압전류 파형을 나타낸 것이다.

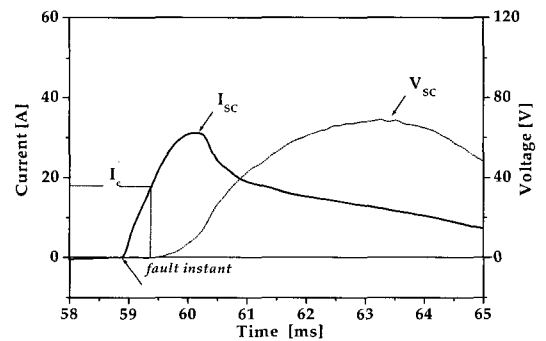


그림 4. 저항형 고온초전도 전류제한기의 사고 발생 직후 전압전류 파형(60 V<sub>rms</sub>, 사고각 0°).

Fig. 4. Voltage and current waveforms immediately after a fault instance in resistive type SFCL.

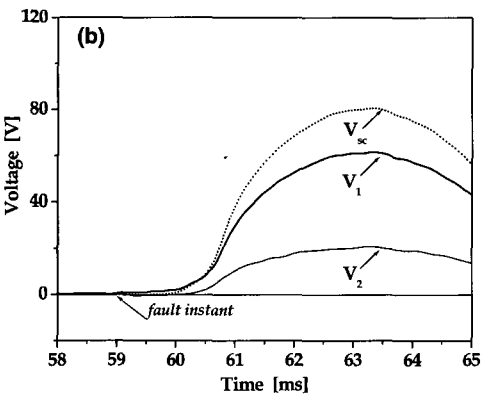
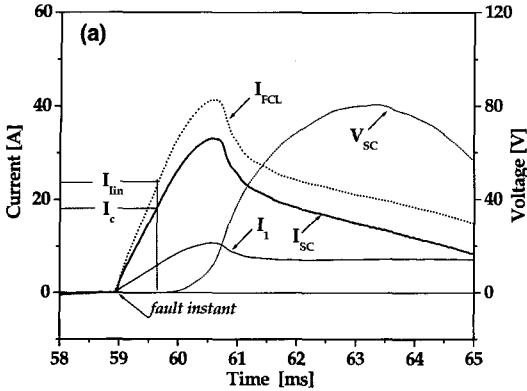


그림 5. 감극 결선시 사고발생직후 전압전류 파형 (a)전류 (b)전압 ( $N_1=63, N_2=21$ ).

Fig. 5. Voltage and current waveforms immediately after a fault instance in subtractive polarity winding (a) Current (b) Voltage ( $N_1=63, N_2=21$ ).

선로전류( $I_{sc}$ )가 임계전류( $I_c=17$  A)를 넘는 순간부터 소자의 저항 발생으로 인해 소자양단에 전압이 발생하기 시작하였음을 확인할 수 있다. 선로전류( $I_{sc}$ )와 소자전압( $V_{sc}$ )의 첫 번째 피크값은 각각 31 A와 69 V로 나타났다.

그림 5와 그림 6은 감극 결선시 사고발생 직후 반주기 동안의 전류전압 파형을 나타낸 것이다. 그림 5(a)와 6(a)에서 초기 제한전류의 크기는 각각 21.72 A, 29.65 A로 식 7에서 계산한 값(22.66 A, 28.33 A)과는 약간의 오차를 보였다. 이러한 오차는 철심을 사용한다에 따른 초기 포화문제와 누설인덕턴스에 기인한 것으로 사료된다. 그림 5(b)와 6(b)에서 소자의 양단 전압은 코일 1과 코일 2의 전압의 크기의 합과 같게 나타남을 확인할 수 있다.

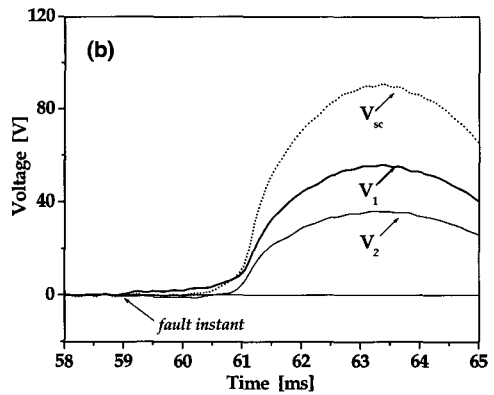
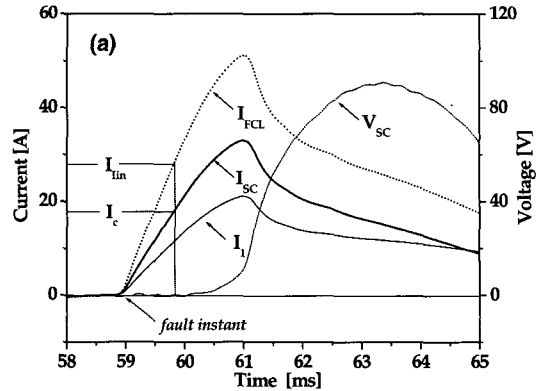


그림 6. 감극 결선시 사고발생직후 전압전류 파형 (a)전류 (b)전압 ( $N_1=63, N_2=42$ ).

Fig. 6. Voltage and current waveforms immediately after a fault instance in subtractive polarity winding (a) Current (b) Voltage ( $N_1=63, N_2=42$ ).

코일 2의 권선수가 21턴인 경우보다 42턴인 경우 각 코일의 전류가 증가되어 제한되는 선로전류( $I_{FCL}$ ) 역시 증가된 것을 관찰할 수 있다. 이는 코일 2의 권선수 증가에 따라 사고초기에 제한되는 전류크기가 증가된 것에 기인한다.

그림 7과 그림 8은 가극 결선시 사고 발생 직후 반 주기 동안 권선 수에 따른 전류 전압의 파형을 나타낸 것이다.

사고 전 코일 1과 코일 2에 흐르는 전류에서 180° 위상차가 발생되고 있으며 이로 인해 사고발생과 동시에 코일 2의 전류가 양의 방향으로 증가됨에 따라 코일 1의 전류는 음의 방향으로 증가함을 관찰할 수 있다. 이후 고온초전도 소자의 저항이 증가됨에 따라 코일 2에 흐르는 전류는 감소되

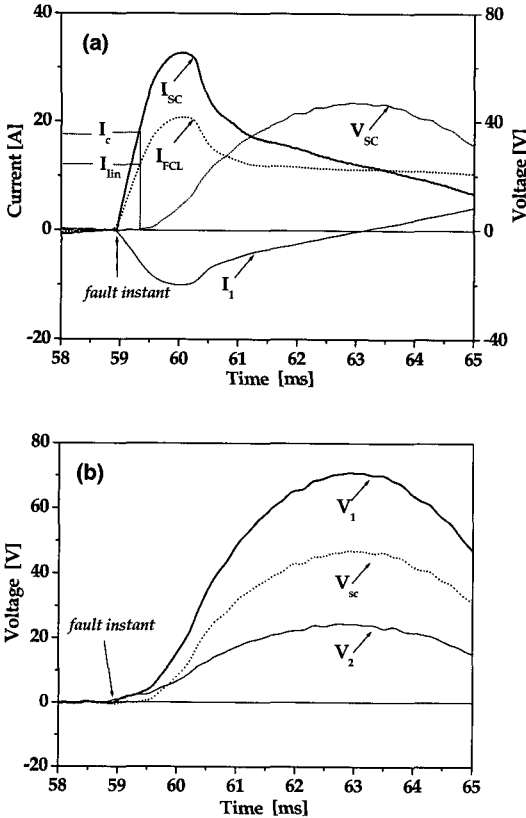


그림 7. 가극 결선시 사고발생직후 전압전류 파형 (a)전류 (b)전압 ( $N_1=63, N_2=21$ ).

Fig. 7. Voltage and current waveforms immediately after a fault instance in additive polarity winding (a) Current (b) Voltage ( $N_1=63, N_2=21$ ).

고 코일 1에 흐르는 전류는 음의 값에서 영점을 향하게 된다.

그림 7(a)와 8(a)에서 사고 발생후 반주기동안 제한되는 선로전류의 크기는 같은 조건의 감극결선의 경우보다 향상되는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 4의 저항형 고온초전도 전류제한기의 제한되는 선로전류( $I_{sc}$ )와 비교해도 향상됨을 확인할 수 있다. 또한, 가극 결선시 코일 2에 흐르는 전류가 고온초전도 소자의 임계전류 값을 넘게 되는 시점이 그림 5과 6의 감극 결선의 경우보다 빨라지는 것을 볼 수 있다.

이로 인해 초기에 제한되는 선로전류의 크기도 감소하는 것을 볼 수 있다.

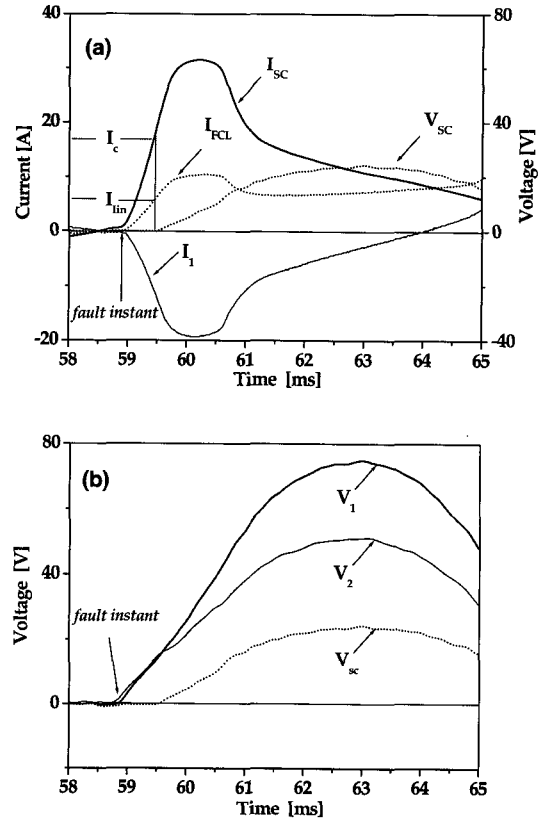


그림 8. 가극 결선시 사고발생직후 전압전류파형 (a)전류 (b)전압 ( $N_1=63, N_2=42$ ).

Fig. 8. Voltage and current waveforms immediately after a fault instance in additive polarity winding (a)Current (b) Voltage ( $N_1=63, N_2=42$ ).

그림 7(a)와 8(a)에서 초기 제한전류의 크기는 각각 11.69 A, 5.5 A로 식 (7)에서 계산한 값(11.33 A, 5.6 A)에 비교적 일치함을 볼 수 있다. 그림 7(b)와 그림 8(b)의 가극 결선시 사고직후 반주기 동안 소자양단의 전압파형은 코일 1과 코일 2의 전압의 차로 나타난다.

그림 7(a)와 그림 8(a)에서 확인할 수 있는 것처럼 사고 직후의 코일 2의 권선 수가 21턴 인 경우보다 42턴인 경우 권치 발생이 빨라지고, 초기에 제한되는 선로 전류의 크기도 작아진다. 이는 감극 결선의 경우와는 반대로 권선 수가 증가함에 따라 초기 제한 전류의 크기가 감소되는 결과를 얻을 수 있다.

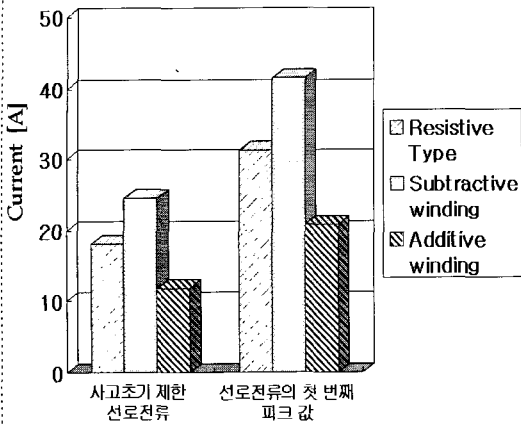


그림 9. 사고 초기 제한 선로전류의 크기와 사고 후 선로전류의 첫 번째 피크 값.

Fig. 9. Magnitude of initial line current limiting and the 1st peak value of line current after fault instant.

그림 9는 저항형 고온초전도 전류제한기와 자속 구속형 고온초전도 전류제한기의 감, 가극 결선방향에 따른 사고 초기 제한 선로전류의 크기와 사고 후 선로전류의 첫 번째 피크값을 나타낸 것이다. 소자에 흐르는 전류( $I_{sc}$ )가 임계전류( $I_c$ )를 넘어서는 순간 선로전류( $I_{fcl}$ )는 제한되기 시작하고 초기 제한되는 선로전류의 값은 각각 18 A, 24.5 A, 11.9 A 이고, 사고 발생 후 선로전류의 첫 번째 피크값의 크기는 31.21 A, 41.44 A, 20.75 A이다. 그림 9에서 확인할 수 있듯이 초기 제한되는 선로전류의 크기는 선로전류의 첫 번째 피크값에 영향을 미치고, 초기 제한되는 선로전류의 값이 작으면 첫 번째 피크값의 크기도 작게 나타남을 확인할 수 있다.

그림 10은 사고 발생 후 고온초전도 소자에 흐르는 전류( $I_{sc}$ )가 임계전류( $I_c$ )를 넘어선 후 선로에 흐르는 전류( $I_{fcl}$ )가 제한되기까지 걸린 시간을 나타낸 그래프이다. 고온초전도 소자 단독으로 동작했을 때 선로에 흐르는 전류가 제한되기까지 걸린 시간(59.38 ms)은 감극으로 결선한 경우(59.64 ms) 보다 작고 가극으로 결선한 경우(59.33 ms)보다 크게 나타난다. 다시 말해, 가극으로 결선한 경우에서 보다 신속한 전류제한동작이 이루어짐을 확인할 수 있다.

그림 11은 저항형 고온초전도 전류제한기와 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 감극, 가극결선

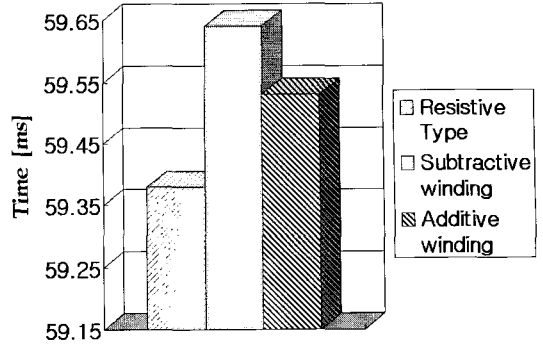


그림 10. 사고 발생후 전류제한이 이루어질 때까지의 도달시간.

Fig. 10. The arrival time until current limiting after fault instant.

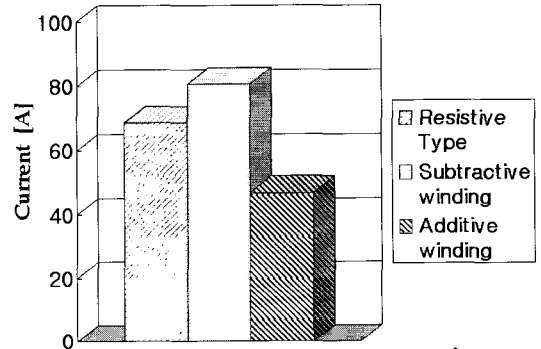


그림 11. 사고 발생후 소자전압의 첫 번째 피크값.

Fig. 11. The 1st peak value of HTSC element voltage after fault instant.

시 사고 발생 후 소자전압( $V_{sc}$ )의 첫 번째 피크 값을 나타낸 그래프이다. 소자전압( $V_{sc}$ )의 첫 번째 피크 값의 크기는 각각 68.66 V, 80.65 V, 46.80 V로 나타난다. 소자 전압( $V_{sc}$ )은 소자에서 소비되는 순시전력과 밀접한 관계가 있다. 결국 소자전압( $V_{sc}$ )이 높을수록 소자의 파손 우려도 높다. 이런 점에서 가극으로 결선한 경우가 고온초전도소자 보호 측면에서 보다 효과적이란 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

이 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한

기의 동작특성에 대해 분석하고 등가회로를 이용하여 각 권선에 흐르는 전류와 제한기의 임피던스를 유도하였다. 또한 고온초전도 박막을 이용하여 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 감, 가극 결선방향에 따라 1, 2차 코일의 턴 수를 조절하면서 초기 사고전류 제한시점의 변화에 대해 비교분석하였고, 1차, 2차 코일의 인덕턴스 비가 고온초전도 소자의 켄치 특성에 영향을 줌으로서 사고초기 제한되는 전류크기를 조절할 수 있음을 확인하였다. 사고초기 제한되는 전류크기는 등가회로로부터 계산한 값에 유사한 값을 얻었으며, 가극 결선 시 사고초기 신속한 전류제한 동작이 이루어짐을 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] 김준환, 이강완, “전력계통, 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, 1권, 2호, p. 19, 1998.
- [2] L. salasoo, A. F. Imece, R. W. Delmerico, and R. D. Wyatt, “Comparison of superconducting fault limiter concepts in electric utility applications”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, No. 2, p. 1079, 1995.
- [3] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, “차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션”, 전기학회논문지, 48C권, 3호, p. 173, 1999.
- [4] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시들, “15 kVA 급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성”, 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, p. 1058, 2000.
- [5] 조동원, 박경국, 김동원, 정길도, 한병성, “고온초전도 전류제한기용 후막의 특성 연구”, 전기전자재료학회논문지, 11권, 12호, p. 1139, 1998.
- [6] 김태중, 강형구, 고태국, “유도형 고온초전도 한류기용 prototype 직류 리액터의 설계 및 제작”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 12호, p. 1292, 2003.
- [7] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidit, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies, H.-W. Newmuller, E. Baltzer, and S. Fischer, “Resistive fault current limiters with YBCO films-100 kVA functional model”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, p. 656, 1999.
- [8] M. Yamaguchi, S. Fukui, T. Satoh, Y. Kaburaki, T. Horikawa, and T. Honjo, “Performance of DC reactor type fault current limiter using high temperature superconducting coil”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, p. 940, 1999.
- [9] T. Matsumura, T. Uchii, and Y. Yokomizu, “Development of flux-lock type fault current limiter with high-Tc superconducting element”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, No. 2, p. 1001, 1997.