

## 감극 결선시 자속구속형 전류제한기의 켄치 특성

황중선\*, 한태희, 최효상, 박형민, 조용선, 남궁현, 이나영, 임성훈\*\*, 정동철\*\*\*, 한병성\*\*\*\*  
 남도대학\*, 조선대학교, 송실대학교\*\*, 우석대학교\*\*\*, 전북대학교\*\*\*\*

### Quench Characteristics of Flux-lock Type SFCL in Subtractive Polarity Winding

Jong-Sun Hwang\*, Tae-Hee Han, Hyo-Sang Choi, Hyoung-Min Park, Yong-Sun Cho, Guong-Hyun Nam,  
 Na-Young Lee, Sung-Hun Lim\*\*, Dong-Chul Chung\*\*\*, Byoung-Sung Han\*\*\*\*  
 Namdo College\*, Chosun Univ., Soongsil Univ\*\*, Woosuk Univ\*\*\*, Chonbuk National Univ.\*\*\*\*

**Abstract :** As one of methods to increase the voltage rating of the flux-lock type SFCL, the fault current limiting characteristics of the flux-lock type SFCL with HTSC elements connected in series were analyzed. The initial fault current amplitudes in two SFCLs with the series connection of two HTSC elements and with single HTSC element were the same. In addition, the resistance amplitude of each HTSC element in SFCL with the series connection of two HTSC elements had the similar one in SFCL with single HTSC element. With increase of applying voltage, the unbalance of voltage between two HTSC elements in SFCL with the series connection of two HTSC elements disappeared.

**Key Words :** Fault current limiter, quench, superconducting.

### 1. 서론

국내의 전력계통은 매년 전력수요의 증가로 사고전류가 증가되고 있고 사고전류에 대한 문제점을 해결하기 위해서 고안된 기기 장치들이 개발되어왔다. 그 중에서 초전도의 특성을 이용한 초전도 전류제한기는 사고전류를 대폭 감소시켜 차단기의 용량 증대효과, 전력기기 기준안화, 신뢰도향상, 유연한 운영을 가능하게 한다.

초전도 전류제한기는 켄치특성에 따라 크게 켄치형과 무켄치형으로 분류할 수 있다. 켄치형은 영저항 특성을 이용한 저항형과 마이스너 효과를 이용한 유도형으로 분류할 수 있다[1]. 무켄치형은 포화 리액터형, 다이오드 브리지형, 하이브리드 브리지형이 있다. 자속구속형 전류제한기는 저항형과 유도형을 접목한 켄치형으로 실제통에 적용하기 위해서는 전압용량과 전류용량의 증대를 위하여 소자의 직·병렬연결이 필수적이다[2].

본 논문에서는 자속구속형 전류제한기의 초전도 소자를 직렬로 연결하여 동작원리에 대해 고찰하고, 감극 결선구조에 따른 전류제한 특성을 분석하였다.

### 2. 실험

실험에 사용한 한류소자는 meander형태로 YBCO 박막이며, 소자수를 1~3개 직렬로 연결하였다. 그림 1은 자속구속형 전류제한기의 등가 회로도를 보여주고 있다. 그림 1에서  $I_{FCL}$ 은 사고전류이며,  $I_1$ 은 변압기의 1차측 권선에 흐르는 전류,  $I_{SC}$ 는 2차측 권선에 직렬로 연결된 초전도 소자에 흐르는 전류이다.  $L_1$ 과  $L_2$ 는 변압기 1, 2차측 권선의 인덕턴스를 각각 나타낸다. 1, 2차측의 결합계수  $k$ 가 1 이라고 가정하였을 때,  $M_{12}$ 는 상호 인덕턴스로서  $M_{12} = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$  이라고 할 수 있다. 그림 1을 통해서 전압과 전류의 관계식을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_1 = V_2 + V_{SC} \quad (1)$$

$$I_{FCL} = I_1 + I_{SC} \quad (2)$$

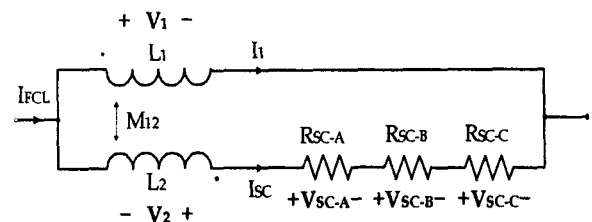


그림 1. 자속구속형 전류제한기의 등가회로도.

### 3. 결과 및 검토

변압기 1,2차측의 권선에서 누설인덕턴스는 무시하고 상호 인덕턴스만이 존재하며 초전도 소자에서 발생하는 저항이  $R_s$ 로 같다고 가정하였을 때, 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

#### 1) 직렬 연결한 단독소자

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_1 R_s}{j\omega L^2 + R_s} \quad (3)$$

$$\frac{I_{SC}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega (L_1 + \sqrt{L_1 L_2})}{j\omega L^2 + R_s} \quad (4)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega \sqrt{L_1 L_2} + j\omega L_2 + R_s}{j\omega L^2 + R_s} \quad (5)$$

#### 2) 직렬 연결한 소자2개

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_1 (2R_s)}{j\omega L^2 + 2R_s} \quad (6)$$

$$\frac{I_{SC}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega(L_1 + \sqrt{L_1L_2})}{j\omega L^2 + 2R_S} \quad (7)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega\sqrt{L_1L_2} + j\omega L_2 + 2R_S}{j\omega L^2 + 2R_S} \quad (8)$$

3) 직렬 연결한 소자3개

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_1(3R_S)}{j\omega L^2 + 3R_S} \quad (9)$$

$$\frac{I_{SC}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega(L_1 + \sqrt{L_1L_2})}{j\omega L^2 + 3R_S} \quad (10)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega\sqrt{L_1L_2} + j\omega L_2 + 3R_S}{j\omega L^2 + 3R_S} \quad (11)$$

사고 발생 직후 초전도 소자에 흐르는 전류가 임계 전류값에 도달하였을 때 초기 제한전류를  $I_{ni}$ 라고 정의하였을 때, 다음과 같이 하나의 식으로 표현할 수 있다.

$$I_{ni} = \left(\frac{L}{L_1}\right) I_q \quad (12)$$

위의 식을 통해서 초전도 소자가 직렬로 연결되더라도 초기에 제한되는 사고전류는 같은 값이다.

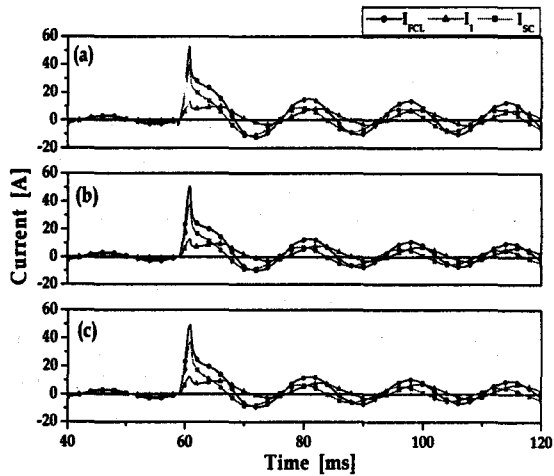


그림 2. 감극 결선시 초전도 소자에 따른 전류 파형  
(a) 단독 소자 (b) 소자 2개 (c) 소자 3개

그림 2는 감극 결선시 소자를 직렬 연결하였을 때 전류파형을 보여주고 있다. 그림 2(a)를 보면 단독 소자시 선로전류( $I_{FCL}$ ) 피크값이 53 A에서 3주기에는 13A로 감소되는 것을 알 수 있다. 소자 2개를 직렬 연결한 그림 2(b)에서 선로전류 피크값은 50A에서 3주기에는 11A로 감소하였고, 소자 3개를 직렬 연결하였을 때 선로전류 피크값이 49A에서 3주기에는 10A로 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 자속구속형 전류제한기를 직렬 연결하였을 때 직렬로 연결되더라도 초기에 제한되는 사고전류는 식 12와 일치함을 알 수 있었다.

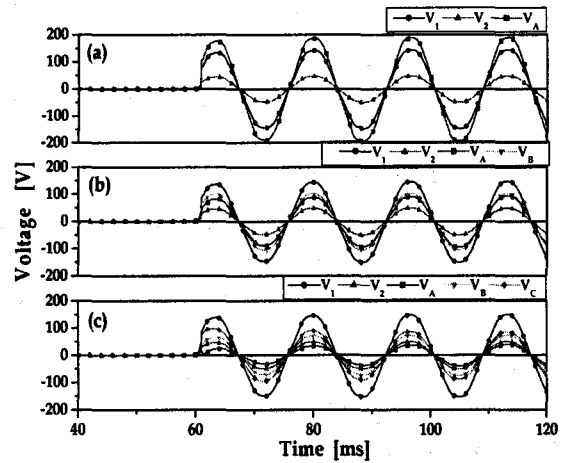


그림 3. 감극 결선시 초전도 소자에 따른 전압 파형  
(a) 단독 소자 (b) 소자 2개 (c) 소자 3개

그림 3은 전압 파형을 나타내고 있다. 그림 3(a)에서 초전도 소자의 전압 피크값은 177V, 2개의 직렬 연결시 소자 A는 81V, 소자 B는 100V로 전압분배가 확실하게 되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 초전도소자 1개가 갖는 부담을 줄일 수 있고, 동시첸치 유도과 용량증대에 유리하다는 것을 알 수 있다. 그림 3(b)의 전압파형을 보면 사고 발생 후 임계 전류값을 넘어 첸치가 발생할 때 직렬 연결된 초전도소자의 약간의 첸치전류의 편차 때문에 발생하는 첸치시작의 차이가 보이지만 3주기 이후에는 거의 같음을 알 수 있다. 그림 3(c)의 전압파형을 보면 첫주기 때 소자 A는 45V, 소자 B는 64V, 소자 C는 96V였고 3주기 이후에 소자 B와 소자 C의 전압 값이 비슷하다는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

자속구속형 전류제한기를 감극 결선하여 직렬로 연결하였을 때 초기에 제한되는 사고전류는 식 12와 일치함을 확인할 수 있었다. 전압파형을 보면 사고 발생 후 임계 전류 값을 넘어 첸치가 발생할 때 직렬 연결된 초전도소자의 약간의 첸치 전류의 편차 때문에 발생하는 첸치 시작의 차이가 보이지만 3주기 이후에는 거의 같음을 알 수 있다. 초전도 소자를 직렬로 연결 시 초전도소자 1개가 갖는 부담을 줄일 수 있고, 자속구속형 전류제한기가 동시 첸치 유도과 용량증대에 유리하다는 것을 알 수 있다.

#### 참고 문헌

- [1] Y. Jiang, 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.
- [2] 박형민, "전력계통용 자속구속형 초전도 한류기의 특성연구", 조선대학교 대학원 2003.