

## 설계 파라미터에 따른 자속구속형 사고전류제한기의 단락전류 제한 특성 분석

서문현, 박재완, 오수진, 최준영, 이걸열, 임성훈  
 송실대학교 전기공학부

### Analysis of short current limiting characteristics of a flux-lock type superconducting fault current limiter(SFCL) depending upon design parameters

Hyun. Seomoon, Jae-Wan. Bak, Su-Jin. Oh, Jun-Yeong. Choi, Geol-Yeol. Lee, Sung-Hun. Lim  
 School of Electrical Engineering, Soong-Sil University

**Abstract** - 고온 초전도체를 이용한 자속구속형 사고전류제한기는 1차 권선과 2차 권선을 감는 방향이나 감은 횟수의 비율에 따라서 부하전류 용량과 전류제한용량이 다르다. 부하전류용량은 사고 발생 시 최초의 전류 제한 레벨과 밀접하게 관련이 있는데 자속구속형 사고전류제한기에서 최초의 전류 제한 레벨은 인덕턴스에 의해서 결정되기 때문이다. 전류제한용량은 사고전류제한기의 임피던스와 관계된다. 이 논문에서 자속구속형 사고전류제한기의 변압기 특성을 변화시키면서 부하전류용량과 전류제한용량의 변화를 살펴보았다.

#### 1. 서 론

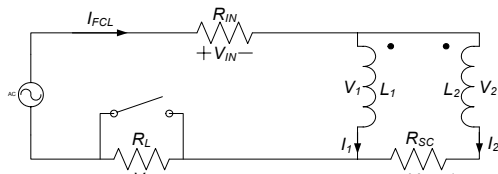
전기에너지를 만들어 수요자까지 보내는 과정에서 전선이 끊어지거나 버락 등 사고가 발생하면 전선에는 정상전류의 수십 배에 이르는 고장 전류가 발생한다. 이를 0.1밀리초 이내에 감지, 수초 이내에 사고전류(fault current)를 정상전류로 바꿔 정전사태 등 대형 사고를 방지할 수 있는 새로운 개념의 전력기기가 바로 사고전류제한기이다. 여기에 초전도체를 이용하여 사고전류제한기를 구성함으로써 차단기의 용량 증대와 선로 증설 감축 등을 피할 수 있어 전력계통의 유연성, 안정도, 신뢰도를 개선할 수 있다[1].

본 논문에서는 두 코일이 병렬 연결된 리액터에 초전도체를 연결해서 자속구속형 사고전류제한기를 구성하여 부하전류용량 및 전류제한용량을 구하는 실험을 수행했다. 자속구속형 사고전류제한기는 자기장의 작용이 고온초전도체 소자와 두 코일로 구성된 변압기의 구조에 병렬 사고전류 통로를 만들기 때문에 부하전류용량과 전류제한용량이 증가할 뿐만 아니라, 변압기의 특성 변화에 따라 다양한 특성을 가지게 된다는 장점이 있다. 이를 이용하여 자속구속형 사고전류제한기의 여러 파라미터에 따른 용량 특성을 확인해보고 부하전류용량과 전류제한용량을 크게 하기 위한 적합한 설계방법에 대해 알아보려고 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 사고전류제한기의 용량계산

<그림 1>은 자속구속형 사고전류제한기의 도식적인 그림이다.  $I_1$ 은 1차 권선에 흐르는 전류,  $I_2$ 는 2차 권선에 흐르는 전류,  $I_{FCL}$ 은 시스템에 흐르는 전류이다. 1차 권선과 2차 권선이 서로 병렬로 연결되어 있고 초전도체 소자는 2차 권선과 직렬로 연결되어 있다.  $L_1$ 과  $L_2$ 는 각각 1,2차 권선의 인덕턴스를 나타낸다. 코일의 누설인덕턴스를 무시하면 결합계수가 1이 되기 때문에 상호 인덕턴스는  $M = \sqrt{L_1 L_2}$ 으로 나타낼 수 있다. 시스템에 사고가 발생하여 사고 전류가 흐른다면 식 (3)에서  $I_{FCL} = I_{mi}$ ,  $R_{SC} = 0$  이 된다. 사고 발생 직후의 동작전류( $I_{mi}$ )를 유도하면 식(1)과 같다[2].



<그림 1> 자속구속형 사고전류제한기 회로도

$$I_{mi} = \frac{L}{\sqrt{L_1}} I_2 \quad \text{-----(1)}$$

$$Z_{FCL} = \frac{L_1}{L^2} \cdot R_{SC} \quad \text{-----(2)}$$

여기서 L은 변압기가 감극 결선일 경우  $\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2}$  이고, 가극 결선일 경우  $\sqrt{L_1} - \sqrt{L_2}$  이 된다.

위에서 구한 식 (1)의 동작전류는 부하전류용량과 관계된다. 부하전류 용량이란 사고전류제한기가 설치될 시스템이 견딜 수 있는 부하의 용량을 의미한다. 즉, 부하전류용량이 클 경우 부하가 많은 시스템인 경우에도 사고전류제한기를 설치할 수 있다.

아래의 <표 1>은 식 (1)을 이용하여 각 조건의 사고전류제한기의 인덕턴스로 동작전류를 정리하여 나타낸 것이다. 식 (1)을 유도할 때  $R_{SC} = 0$ 인 경우를 가정했으므로 2차 권선의 전류( $I_2$ )값은 초전도체의 임계전류이므로, 감극성 사고전류제한기일 경우에는 2:1의 권선비를 가질 때 가장 큰 동작전류를 가지며 가극성 사고전류제한기일 경우에는 4:1의 권선비를 가질 때의 동작전류가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 또한 감극성의 경우 가극성 사고전류제한기보다 더욱 큰 동작전류를 가지는 것을 예측할 수 있다.

<표 1> 자속구속형 사고전류제한기의 동작전류

권선비	$L_1$ (mH)	$L_2$ (mH)	감극성(A)	가극성(A)
2:1	188.540	45.951	$1.4860 I_2$	$0.5140 I_2$
3:1	423.700		$1.3203 I_2$	$0.6797 I_2$
4:1	747.407		$1.2387 I_2$	$0.7613 I_2$

식 (1)에서 동작전류( $I_{mi}$ )와 2차 권선 전류( $I_2$ )의 인덕턴스 비를 비교하면 감극형 사고전류제한기의 인덕턴스 비는 1이상으로 초전도체만을 사용한 사고전류제한기보다 큰 부하전류용량을 가진다는 것을 알 수 있다. 이와 반대로 가극형 사고전류제한기의 인덕턴스 비는 1이하의 값을 갖게 된다.

사고전류제한기의 설계시 고려하는 용량은 부하전류용량 뿐만 아니라 전류제한용량도 고려해야 한다. 전류제한용량은 시스템의 사고시 사고전류를 제한하는 양을 말한다. 즉, 전류제한용량이 클수록 사고전류를 많이 제한하여 제한된 전류가 작아지므로 과전류로부터 부하를 보호할 수 있다. 즉, 시스템 임피던스가 클수록 전류제한용량은 커진다.

식 (2)의 사고전류제한기의 시스템 임피던스( $Z_{FCL}$ )는 <그림 1>에서 유도될 수 있다[2].

<표 2> 자속구속형 사고전류제한기의 시스템 임피던스

권선비	$L_1$ (mH)	$L_2$ (mH)	감극성( $\Omega$ )	가극성( $\Omega$ )
2:1	188.540	45.951	$0.4482 R_{SC}$	$3.9008 R_{SC}$
3:1	423.700		$0.5659 R_{SC}$	$2.2232 R_{SC}$
4:1	747.407		$0.6421 R_{SC}$	$1.7681 R_{SC}$

<표 2>에서 초전도체 저항이 동일하다면 전류제한용량은 인덕턴스 비에 따라 변한다. 감극성 사고전류제한기 일때 인덕턴스 비는 권선비 ( $\sqrt{L_1} / \sqrt{L_2}$ )가 클수록 커진다. 인덕턴스 비가 커지면 시스템 임피던스도 커지므로 전류제한용량이 커진다. 가극성 사고전류제한기의 경우에는 감극성과는 반대로 권선비가 작을수록 전류제한용량이 커진다.

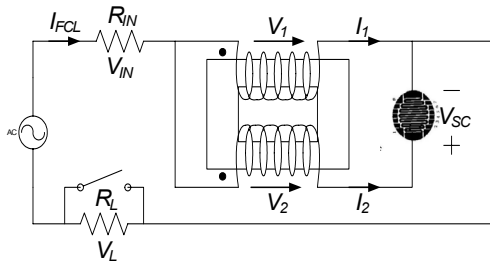
##### 2.2 실험 장치 구성 방법

실험 장치는 <그림 2>와 같이 전원, 선로저항, 부하저항, 변압기, 초전도체, 냉각용기, 선로단락기로 구성된다. 전원은 선간전압 120 V를 인가한다.  $R_{TN}$ 은 2.3  $\Omega$ 으로 선로저항을 모의했으며  $R_L$ 은 41.6  $\Omega$ 으로 부하저항을 모의를 하였다.

시스템에 정상전류가 흐를 때에는 자속구속형 사고전류제한기의 고온 초전도체에 저항이 생기지 않기 때문에 1차 권선의 자속과 2차 권선의 자속이 서로 상쇄된다. 따라서 사고전류제한기는 단락선로처럼 동작하므로 시스템에 영향을 주지 않는다. 하지만 사고를 내기위해 부하저항의 스위

치를 단게 되면 시스템에 정상전류의 몇 배에 이르는 단락전류가 흐른다. 단락전류로 인해 사고전류제한기의 초전도체는 임계전류값을 넘게 되고 저항이 발생하여 사고전류를 제한하게 된다[1].

이때 시스템 전류( $I_{FCL}$ ), 1차권선의 전류, 전압( $I_1, V_1$ ), 2차권선의 전류, 전압( $I_2, V_2$ ), 초전도체전압( $V_{SC}$ ), 선로저항전압( $V_{IN}$ ), 부하저항전압( $V_L$ )를 측정하였다.



〈그림 2〉 자속구속형 사고전류제한기 실험 구성도

실험 장치는 〈그림 2〉와 같이 전원, 선로저항, 부하저항, 변압기, 초전도체, 냉각용기, 선로단락기로 구성된다. 전원은 선간전압 120 V를 인가한다.  $R_{IN}$ 은 2.3  $\Omega$ 으로 선로저항을 모의했으며  $R_L$ 은 41.6  $\Omega$ 으로 부하저항을 모의를 하였다.

시스템에 정상전류가 흐를 때에는 자속구속형 사고전류제한기의 고온 초전도체에 저항이 생기지 않기 때문에 1차권선의 자속과 2차권선의 자속이 서로 상쇄된다. 따라서 사고전류제한기는 단락선로처럼 동작하므로 시스템에 영향을 주지 않는다. 하지만 사고를 내기위해 부하저항의 스위치를 단게 되면 시스템에 정상전류의 몇 배에 이르는 단락전류가 흐른다. 단락전류로 인해 사고전류제한기의 초전도체는 임계전류값을 넘게 되고 저항이 발생하여 사고전류를 제한하게 된다[1].

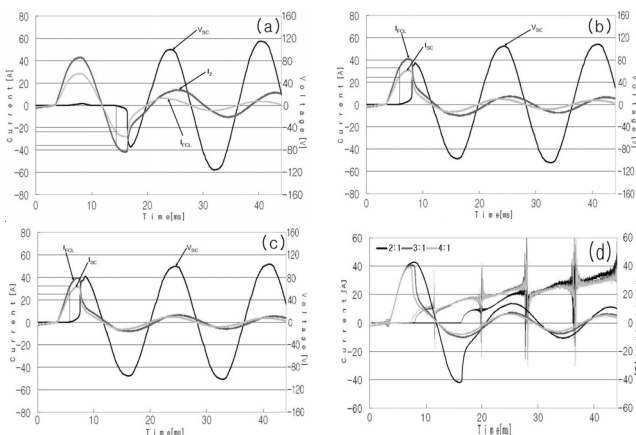
이때 시스템 전류( $I_{FCL}$ ), 1차권선의 전류, 전압( $I_1, V_1$ ), 2차권선의 전류, 전압( $I_2, V_2$ ), 초전도체전압( $V_{SC}$ ), 선로저항전압( $V_{IN}$ ), 부하저항전압( $V_L$ )를 측정하였다.

자속구속형 사고전류제한기의 특성은 변압기와 초전도체의 특성에 따라 변한다. 그러나 초전도체는 가격이 비싸고 만들 수 있는 형태가 한정되어 있다. 때문에 실제 설계할 때 고려할 수 있는 파라미터는 변압기이다. 이런 변압기의 형태는 1차권선과 2차권선의 방향에 따라 감극형과 가극형 변압기로 구분된다. 또한 각 권선을 감는 횟수를 조절하여 권선비( $\sqrt{I_1} / \sqrt{I_2}$ )를 조절할 수 있다.

본 논문에서는 2차권선의 방향에 따라 감극성과 가극성을 조절하였고, 2차권선을 고정하고 1차권선을 2차권선의 2배, 3배, 4배로 감아서 2:1, 3:1, 4:1의 권선비를 가진 사고전류제한기의 용량 특성을 분석해 보았다.

### 2.3 실험 결과 및 분석

감극성 자속구속형 사고전류제한기의 권선비에 따라 인덕턴스의 값이 변하게 되고, 부하전류용량도 차이가 발생하게 된다.



〈그림 3〉 감극성 사고전류제한기의 권선비에 따른 단락전류 (a) 권선비 2:1; (b) 권선비 3:1; (c) 권선비 4:1; (d) 시스템전류와 초전도체 저항

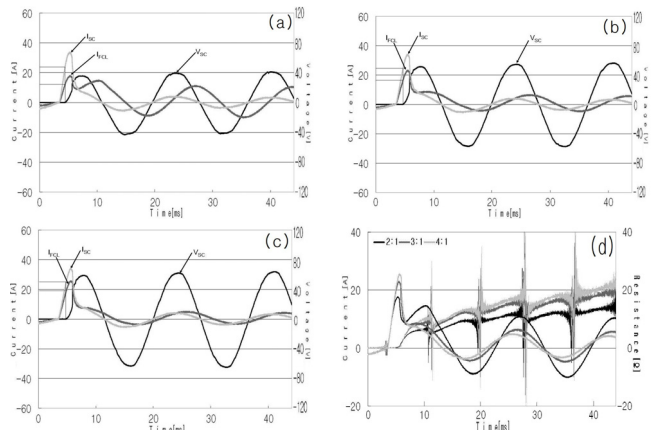
〈그림 3〉에서 초전도체 소자의 임계전류(23.5 A)를 넘는 순간 초전도체 소자에 전압이 발생하는 것을 볼 수 있다. 초전도체 전압이 유기되는

순간의 시스템의 전류는 권선비가 2:1의 경우 34.867[A]이고, 3:1인 경우 31.467 A, 4:1인 경우 29.667 A이다. 권선비가 감소함에 따라 초전도체 소자가 저항 발생 순간의 시스템 전류는 증가하게 되고 더 큰 부하전류 용량을 가지게 된다는 것이다. 이것은 권선비가 작아짐에 따라 인덕턴스의 값은 작아지게 되고 인덕턴스의 비는 커지게 되기 때문이다.

우측 하단 그래프에서 권선비 2:1의 경우 사고 발생 후 반주기 늦게 동작이 되는데, 사고 발생 후 2차권선에 흐르는 전류가 초전도체 소자의 임계전류를 넘어서 저항이 발생하지만 전류가 임계특성을 충분히 만족하지 못하고 다시 저항이 줄었다가 반주기 후에 전기적 스트레스에 의해 초전도체 임계특성을 충분히 넘어서면서 사고전류가 제한된다.

〈표 2〉에서 초전도체 저항이 모두 같다고 가정을 하였지만, 실험에서는 〈그림 3〉에서 보는 것과 같이 권선비가 달라지면 초전도체 저항의 값도 변했다. 하지만 그 변화량이 크지는 않았다. 때문에 인덕턴스 비에 비례해서 시스템 임피던스가 변하게 되므로 권선비가 작아지면 더 큰 전류제한용량을 가지게 된다.

가극성도 감극성과 마찬가지로 권선비에 따라 인덕턴스의 값이 변하게 되고, 부하전류용량도 차이가 발생하게 된다.



〈그림 4〉 가극성 사고전류제한기의 권선비에 따른 단락전류 (a) 권선비 2:1; (b) 권선비 3:1; (c) 권선비 4:1; (d) 시스템전류와 초전도체 저항

〈그림 4〉에서 가극성 사고전류제한기도 감극성과 마찬가지로 2차권선에 흐르는 전류가 초전도체 소자의 임계전류를 넘으면서 초전도체 소자에 전압이 유기되고, 그 순간의 시스템 전류는 권선비가 2:1인 경우 11.933 A이고, 3:1의 경우 15.867 A, 4:1의 경우 17.700 A이다. 가극성의 경우에는 권선비가 감소함에 따라 감극성과는 반대로 부하전류용량이 작아진다. 권선비가 작아짐에 따라 인덕턴스가 작아지고 인덕턴스의 비도 작아지기 때문이다.

가극성도 권선비가 변하면서 초전도체 저항이 변하게 되는데, 이때 초전도체 저항의 변화량이 권선비에 따른 임피던스의 변화량보다 더 커서 권선비가 클수록 전류제한용량이 커지게 된다. 즉, 감극성 사고전류제한기의 경우와 같이 가극성 사고전류제한기도 권선비가 클수록 전류제한용량이 커지는 것을 알 수 있다.

〈그림 3〉과 〈그림 4〉에서 동일한 권선비를 비교하면 감극성이 가극성 사고전류제한기보다 부하전류용량이 크고, 가극성은 감극성 사고전류제한기보다 전류제한용량이 큰 것을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 자속구속형 사고전류제한기의 유리한 설계 조건을 찾기 위해 등가회로를 이용해 동작전류와 시스템 임피던스를 계산하였다. 그리고 고온초전도체를 이용한 자속구속형 사고전류제한기의 감,가극 결선 방향에 따라 부하전류용량과 전류제한용량을 확인하였고, 사고전류제한기의 1차권선과 2차권선의 권선비를 달리해가며 부하전류용량과 전류제한용량도 확인하였다. 이를 통해 감극성이 가극성 사고전류제한기보다 부하전류용량이 크고, 가극성이 감극성 사고전류제한기보다 전류제한용량이 크다는 것을 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 이광원, "전력계통 고장전류 문제와 초전도 한류기", 초전도와 저온공학, 3권 1호, PP. 8-12(5), 2001
- [2] S-H. Lim et. al., "Fault current limiting characteristics due to winding direction between coil 1 and coil 2 in a flux-lock type SFCL", Physica C, Vol. 416, PP. 34-42(9), 2004.