

## 삼상 분리형 자속커플링 전류제한기의 2차 권선의 턴 수 및 결선 방향에 따른 전류제한 특성

### Current Limiting Characteristics of Separated Three-phase Flux-coupling Type SFCL according to Winding Number of Coil 2 and Winding Direction

김용진<sup>1</sup>, 두호익<sup>1,a</sup>, 두승규<sup>1</sup>, 김민주<sup>1</sup>, 이동혁<sup>1</sup>, 한병성<sup>1</sup>

(Yong-Jin Kim<sup>1</sup>, Ho-Ik Du<sup>1,a</sup>, Seung-Gyu Doo<sup>1</sup>, Min-Ju Kim<sup>1</sup>, Dong-Hyeok Lee<sup>1</sup>, and Byoung-Sung Han<sup>1</sup>)

#### Abstract

The separated three-phase flux-coupling type superconducting fault current limiter(SFCL) is composed of a series transformer and superconducting unit of the YBCO coated conductor. The primary and secondary coils in the transformer were wound in series each other through an iron core and the YBCO coated conductor was connected with secondary coil in parallel. In this paper, we investigated the current limiting characteristics through winding number of coil 2 and winding direction in the flux-coupling type SFCL. Through the analysis, it was shown that additive polarity condition and lower winding number of coil 2 have advantaged from the point of view of fault current limiting and burned of YBCO coated conductor.

**Key Words** : Flux-coupling type SFCL, YBCO coated conductor, Inductance ratio, Winding direction

#### 1. 서론

정전사고로 인한 전력공급의 일시 중단이 우리 사회에 미칠 파장을 고려할 때 원활한 전력 수급은 우리사회를 유지하기 위한 필수적인 요소이다. 최근 우리나라의 전력수요는 지속적인 경제성장에 따라 안정적인 전력공급 뿐만 아니라 전력공급의 고밀도화, 고품질화 및 고 신뢰도가 중시되고 있다. 현재 전력수요 증가로 인한 사고전류 대책방안으로 모선분리, 파워퓨즈 등 여러 가지 해결책이 모색되고 있다. 하지만 기존의 대책 방안들은 전력계통의 경제성 및 안전성, 신뢰성을 저하시키고 있기 때문에 새로운 기술적 대안이 절실히 요구되고 있는 실정이다[1]. 이러한 이유에서 사고 전류 발생시 빠르게 사고전류를 제한하며, 소형화가 가

능한 초전도 전류제한기(이하 SFCL)에 대한 연구가 대두되고 있다[2]. 초전도 전류제한기는 저항형, 유도형, 매트릭스형 자속구속형, 자속결합형 등과 같은 다양한 형태의 구조로 개발되어져 왔다. 이중 자속결합형 SFCL은 다른 전류제한기에 비해 전류제한 특성이 우수하며, 사고 시 초전도소자에서 발생하는 줄열이 적기 때문에 소자가 감당해야하는 부담이 적다.

이에 본 논문에서는 자속결합형 SFCL을 삼상으로 분리시킨 후 2차 권선의 권선 수의 변화를 통하여 가극과 감극 상황에서 전류제한특성을 비교 분석하였다.

#### 2. 실험

표 1은 본 실험에서 사용된 초전도 전류제한 소자 및 초전도 전류제한기를 구성하는 요소의 제원이다. 초전도 전류제한 소자로는 임계전류가 70 A이며, 임계온도 90 K인 스테인레스 스틸 안정화층의 YBCO coated conductor를 사용하였으며, 소

1. 전북대학교 전기공학과  
(전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14)  
a. Corresponding Author : dudoc@chonbuk.ac.kr  
접수일자 : 2009. 6. 16  
1차 심사 : 2009. 7. 13  
심사완료 : 2009. 7. 22

자를 무유도성으로 제작하기 위해 2 m씩 나선형 테프론 포미 상에 권선하였다[3,4].

표 1. 자속커플링 SFCL의 실험 요소.

Table 1. Specification of flux-coupling SFCL.

YBCO(Y-Ba-Cu-O) coated conductor	
Stabilizer layer	Stainless steel surround 20 $\mu\text{m}$
Overlayer	Ag 2 $\mu\text{m}$
Substrate layer	Nikel 50 $\mu\text{m}$
$I_c$ & $T_c$	70 A (1 $\mu\text{V}$ , @77 K), 90 K
Rated voltage	0.6 V/m (@300 K)
Resistance	3.6676 m $\Omega$ /cm (@300 K)
Length of CC	400 cm
Primary winding and Secondary winding	
Turns of primary winding ( $N_1$ )	63 Turns
Turns of secondary winding ( $N_2$ )	21, 42 Turns
Iron Core	
External Horizontal Length	370 mm
External Vertical Length	350 mm
Internal Horizontal Length	230 mm
Internal Vertical Length	210 mm
Thickness	181 mm

그림 1은 삼상분리형 자속결합형 SFCL의 구성도를 나타내고 있다. 자속결합형 SFCL은 철심에 1차 권선( $N_1$ )과 2차 권선( $N_2$ )이 직렬연결 되어있으며, 2차 권선과 초전도소자가 병렬로 연결된 구조이다. 삼상 분리형 자속결합형 SFCL은 R, S, T상 각각 개별적인 자속결합형 SFCL이 연결된 구조이다. 사고전류의 조절을 위해 기준저항으로 0.5  $\Omega$ 인 무유도 저항을 사용 하였고, 부하저항으로는 40  $\Omega$ 를 사용하였다. SW<sub>1</sub>을 통하여 선간전압(360 V<sub>rms</sub>)을 인가하고, SW<sub>2</sub>를 통하여 사고전류(587.86 A<sub>peak</sub>)를 모의 하였다. 사고 각은 90° (R상 기준)에서 실험을 모의하였다.

자속결합형 SFCL의 1차 권선과 2차 권선사이의 관계를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_{FCL}(I_1) = I_2 + I_{SC} \quad (1)$$

$$V_2 = j\omega L_2 I_2 \pm j\omega M_{12} I_1 = R_r + I_r \quad (2)$$

식(1), 식(2)에서  $L_1$ ,  $L_2$ 는 1차 권선, 2차 권선의 자기 인덕턴스이며,  $M_{12}$ 는 1차, 2차 권선의 상호 인덕턴스를 나타낸다. 여기서  $M_{12} = k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$ 이다. (결합계수  $k=1$ ) 식(2)를 식(1)에 대입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

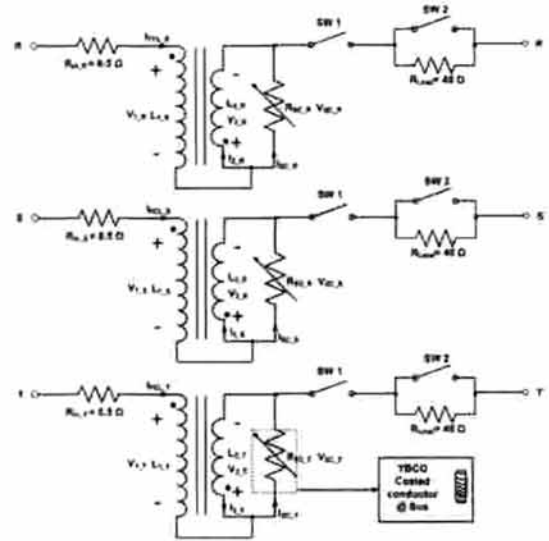


그림 1. 삼상분리형 자속커플링 SFCL의 구성도.  
Fig. 1. Schematic configuration of the separated three-phase flux-coupling SFCL.

$$I_{SC} = \frac{I_1 (j\omega L_2 \pm j\omega M_{12})}{R_r + j\omega L_2} \quad (3)$$

$I_{FCL}$ 는 초전도 전류제한기에 흐르는 선로전류를 말하며,  $V_2$ 는 2차 권선의 전압,  $I_{SC}$ 는 초전도 소자에 흐르는 전류를 나타낸다. 식(2)와 식(3)의  $\pm$ 은 각각 가극(+), 감극(-)을 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 가극 결선시 선로에 흐르는 전류( $I_{FCL}$ )와 초전도 소자의 전압( $V_{SC}$ ) 파형( $N_1:N_2=63:21$ )을 보여준다. 사고 후 선로전류의 첫 주기 피크값은 각각 R상 72.05 A<sub>peak</sub>, S상 -67.83 A<sub>peak</sub>, T상 77.88 A<sub>peak</sub>으로 각 상의 다른 사고 시점으로 인하여 S상에서 가장 많은 사고 전류를 제한하였고, T상에서 가장 적은 사고 전류가 제한되었다. 그림 2에서 각각의 R, S, T상 초전도 소자의 전압파형은 사고 전에는 0인 값을 나타내다가 사고 후 사고전류로 인하여 초전도 소자가 켄치가 발생하고, 이로 인하여 사고전류를 제한하는걸 보여주고 있다. T상의 경우 사고 전류반주기에서 전압이 발생하는데, 이는 반주기 이전의 사고전류는 초전도소자의 임계 전류에 다다르지 못하여 켄치가 발생하지 않음을 보여준다.

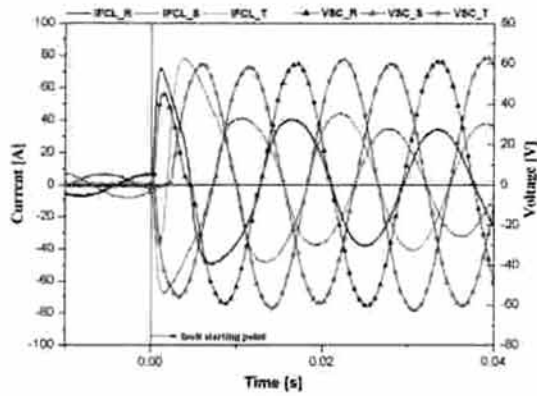


그림 2. 가극 결선시 전압전류 파형( $N_1:N_2=63:21$ ).  
Fig. 2. Voltage and Current pattern of additive polarity( $N_1:N_2=63:21$ ).

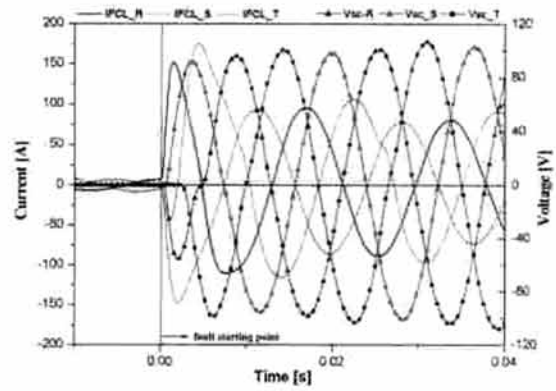


그림 4. 감극 결선시 전압전류 파형( $N_1:N_2=63:21$ ).  
Fig. 4. Voltage and Current pattern of subtractive polarity( $N_1:N_2=63:21$ ).

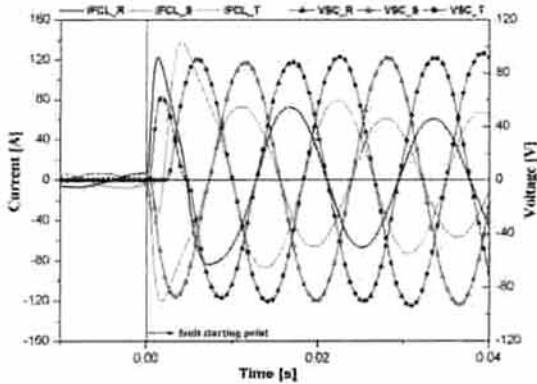


그림 3. 가극 결선시 전압전류 파형( $N_1:N_2=63:42$ ).  
Fig. 3. Voltage and Current pattern of additive polarity( $N_1:N_2=63:42$ ).

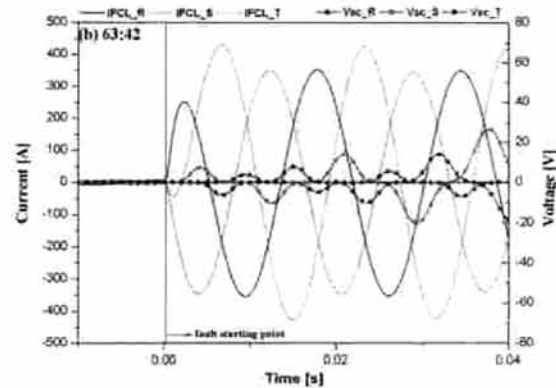


그림 5. 감극 결선시 전압전류 파형( $N_1:N_2=63:42$ ).  
Fig. 5. Voltage and Current pattern of subtractive polarity( $N_1:N_2=63:42$ ).

그림 3은 가극 결선시 2차 권선을 42턴으로 증가 하였을 때 전압전류 파형을 보여준다. 사고 후 선로전류는 각각의 R상 122.6 A<sub>peak</sub>, S상 -120.06 A<sub>peak</sub>, T상 137.7 A<sub>peak</sub>을 나타낸다. 2차 권선의 권선 수를 증가하면 제한된 사고전류의 값이 작아지고 초전도 소자에 흐르는 전류의 증가로 인하여 초전도 소자의 전압이 증가 하는걸 확인 할 수 있었다.

그림 4는 감극 결선시 전압전류파형( $N_1:N_2=63:21$ )을 보여준다. 감극 결선시 1차 권선에 흐르는 전류와 초전도 소자에 흐르는 전류는 180° 위상차가 발생한다. 사고 후 선로전류는 각각 R상 151.64 A<sub>peak</sub>, S상 -147.33 A<sub>peak</sub>, T상 174.82 A<sub>peak</sub>을 나타낸다.

그림 5는 감극 결선시 2차 권선을 42턴으로 증가 하였을 때 전압전류 파형을 보여준다. 사고 후 선로전류는 각각 R상 251.82 A<sub>peak</sub>, S상 -346.64 A<sub>peak</sub>, T상 430.47 A<sub>peak</sub>을 나타낸다. 2차 권선의 임피던스의 증가로 인하여, 초전도 소자에 흐르는 전류가 작아진다. 그림 5와 같이 초전도 소자의 완전한 렌치가 발생하지 않았으며 이로 인해 제한된 사고 전류의 값도 작음을 보여 주고 있다.

그림 6은 1차 권선과 2차 권선 사이의 결선 방향과 2차 권선의 권선 수의 변화에 따른 초전도 소자의 저항( $R_{SC}$ )을 나타내고 있다. 가극 결선 시 2차 권선의 권선 수를 증가 시키면 초전도 소자의 저항도 증가 하였다. 감극 결선시 2차 권선의 권선

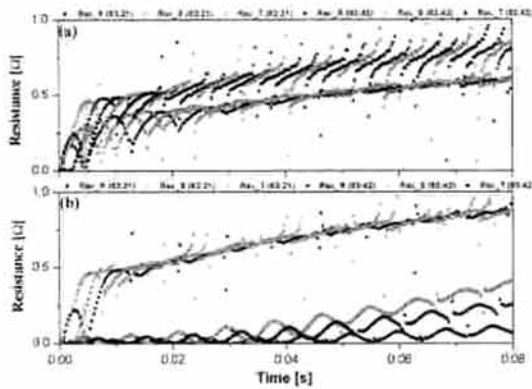


그림 6. 저항 과형 (a:가극 결선, b:감극 결선).  
 Fig. 6. Resistance pattern (a: additive polarity, b: subtractive polarity).

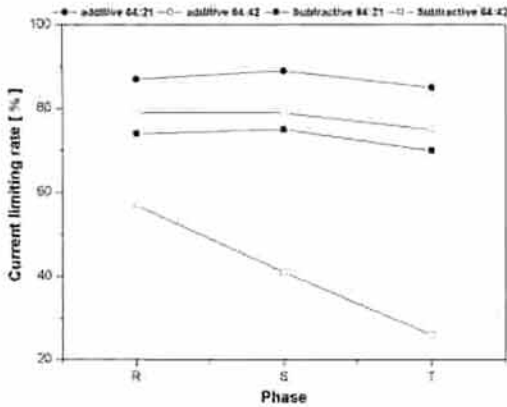


그림 7. R, S, T 상의 전류제한률.  
 Fig. 7. Current limiting rate of R, S, T phase.

수를 증가 시키면 초전도 소자의 저항은 감소하는 것을 확인 하였다.

그림 7은 1차 권선과 2차 권선 사이의 결선 방향과 2차 권선의 권선 수의 변화에 따른 전류제한률을 보여준다. 가극인 경우와 2차 권선의 권선 수가 작을 때에 가장 높은 전류제한률을 나타내었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 삼상분리형 자속결합형 전류제한 특성을 2차 권선의 턴 수 및 결선방향에 따라 살펴 보았다. 이번 실험을 통하여 전류제한 특성은 1차 권선과 2차 권선 사이의 결선 방향과 2차 권선의 권선 수의 변화에 따라 변화 한다는 걸 알 수 있었다.

사고 전류 제한특성은 가극이 감극보다 나은 특성을 보였으며, 가극 결선시 2차 권선의 턴 수를 줄일수록 보다 나은 사고 전류제한 특성과 초전도 소자의 부담 측면에서 나은 특성을 확인 할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2007년도 교육과학기술부의 지원으로 한국학술진흥재단(KRF-2007-521-D00177)의 지원 받아 수행된 연구임.

#### 참고 문헌

- [1] 김준환, 이장완, "전력계통, 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, 통권 257호, p. 19, 1998.
- [2] 박형민, 임성훈, 박중렬, 최효상, 한병성, "자속 구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교", 전기전자재료학회논문지, 18권, 4호, p. 363, 2005.
- [3] 두호익, 김민주, 박충렬, 두승규, 김용진, 한병성, "안정화층을 갖는 YBCO coated conductor 와 BSCCO 선재의 결합이 과전류 통전 특성에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 21권, 10호, p. 950, 2008.
- [4] H.-I. Du, M.-J. Kim, S.-G. Doo, Y.-J. Kim, and B.-S. Han, "Resistance increase behavior of HTS wire with stabilizer layer on applied over-currents", Trans. Electr. Electron. Mater., Vol. 10, No. 2, p. 62, 2009.