

## 개선된 자속구속형의 2차 축 권선 방향과 1차 권선수와 2차 권선수의 변화에 따른 사고전류제한 특성

김용진<sup>1</sup>, 두호익<sup>2,a</sup>, 이동혁<sup>1</sup>, 한병성<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 전북대학교 전기공학과

<sup>2</sup> 전북대학교 전자정보고급인력양성사업단

### Current Limiting Characteristics of Improved Flux-Lock Type SFCL According to Winding Direction of Coil 2 and Variable Number of Coil 1 and Coil 2

Yong-Jin Kim<sup>1</sup>, Ho-Ik Du<sup>2,a</sup>, Dong-Hyeok Lee<sup>1</sup>, and Byoung-Sung Han<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

<sup>2</sup> Advanced Graduate Education Center of Jeonbuk for Electronics and Information Technology-BK21, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

(Received July 6, 2010; Revised August 12, 2010; Accepted August 20, 2010)

**Abstract:** The improved flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) is composed of a series transformer and superconducting unit of the yttrium-barium-copper-oxide (YBCO) coated conductor. In this paper, we investigated current limiting characteristics through winding direction of coil 2 and variable number of coil 1 and coil 2 in improved flux-lock type SFCL. The better fault current characteristics and the burden of YBCO coated conductor can be confirmed from the experimental result in the higher turn ratio of coil 1 and coil 2 in the additive conditions. In case of subtractive condition, we can confirm a similar result in the same case of experimental conditions. but the burden of YBCO coated conductor has been increased from an increase in winding numbers of coil 2.

**Key Words :** SFCL, YBCO coated conductor, Inductance ratio, Winding direction

#### 1. 서론

우리나라의 급속한 산업발달은 전력수요의 증가를 가져왔으며, 선진 IT사회에 적합한 경제적이고 고 신뢰성의 전력공급을 요구받고 있는 실정이다. 하지만 전력사용의 증가로 단락용량은 꾸준히 증가 하고 있고, 이에 따라 기존의 차단기들의 용량이 한계에 다 다르고 있다. 이에 대한 대책으로 용량이 큰 차단기

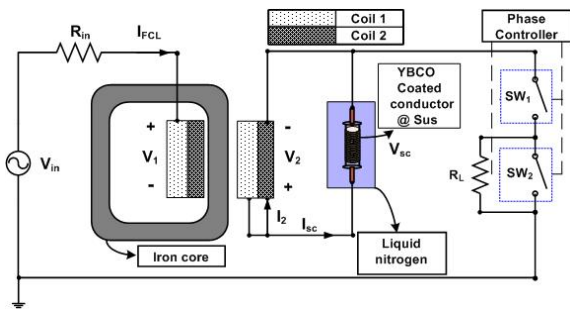
로의 교체나 연계선로의 분리운전이 시행되고 있다. 하지만 이들의 대책들은 경제적인 부담 및 전력계통의 과부하, 계통안정도 등의 부작용등을 유발하게 된다 [1]. 이러한 이유에서 빠르게 사고전류를 제한하며, 소형화가 가능한 초전도 전류제한기에 대한 연구가 대두되었다 [2,3].

이에 본 논문에서는 개선된 자속구속형 SFCL (superconducting fault current limiter)의 1차 권선수와 2차 권선수의 권선비의 변화를 통하여 가극과 감극 상황에서 사고 전류제한 특성을 살펴보았다.

a. Corresponding author; dudoc@chonbuk.ac.kr

**Table 1.** Specification of improved flux-lock SFCL

YBCO(Y-Ba-Cu-O) coated conductor	
Stabilizer layer	Stainless steel surround 20 $\mu\text{m}$
Overlayer layer	Ag 2 $\mu\text{m}$
Substrate layer	Nickel 50 $\mu\text{m}$
I <sub>c</sub> & T <sub>c</sub>	80 A(1 $\mu\text{N}/\text{cm}$ , @77 K), 90 K
Rated voltage	0.77 V/cm (@300 K)
Resistance	3.6676 m $\Omega$ /cm (@300 K)
Length of CC	200 cm



**Fig. 1.** Schematic configuration of improved flux-lock type SFCL.

## 2. 실험 방법

표 1은 본 실험에서 사용된 초전도 전류제한 소자 및 초전도 전류제한기를 구성하는 요소의 제원이다. 초전도 전류제한 소자로는 임계전류가 80 A이며, 임계온도 90 K인 스테인레스 스틸 안정화 층의 YBCO (yttrium-barium-copper-oxide) coated conductor를 테프론 폼에 권선하여 사용하였다 [4].

그림 1은 개선된 자속구속형 SFCL의 구성도를 나타내고 있다. 개선된 자속구속형 SFCL은 철심을 매개로 1차권선 (N<sub>1</sub>)과 2차권선 (N<sub>2</sub>)이 직렬연결되어 있으며, 2차 권선과 초전도소자가 병렬로 연결된 구조이다. 사고전류의 조절을 위해 기준저항으로 0.2  $\Omega$  인 무유도 저항을 사용하였고, 부하저항으로는 40  $\Omega$  를 사용하였다. SW<sub>1</sub>을 통하여 선간전압 (200 V<sub>rms</sub>)을 인가하고, SW<sub>2</sub>를 통하여 사고전류 (601 A<sub>peak</sub>)를 모의하였다. 사고 각은 0° (R상 기준), 1차 권선수와 2차 권선 수는 (N<sub>1</sub>:N<sub>2</sub>=62:21, 42:21, 21:21, 21:42, 21:63에서 실험을 모의하였다.

개선된 자속구속형 SFCL의 1차 권선과 2차 권선 사이의 관계를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_{FCL}(I_1) = I_{sc} \mp I_2 \quad (1)$$

$$V_1 = j\omega L_1 I_1 \pm j\omega M I_2 \quad (2)$$

$$V_2 = j\omega L_2 I_2 \pm j\omega M I_1 = R_{sc} + I_{sc} \quad (3)$$

식 (1)에서 - 부호는 1차 코일과 2차 코일이 가극 결선시를 나타내고 + 부호는 감극 결선시를 나타낸다. 식 (2), 식 (3)의 + 부호는 가극결선 시를 나타내고 - 부호는 감극결선 시를 나타낸다. 다음 식으로부터 전류제한기의 발생임피던스(Z<sub>T</sub>)는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_T = \frac{(j\omega L_1 + j\omega L_2 \mp j\omega 2MR_{sc})}{R_{sc} + j\omega L_2} \quad (4)$$

식 (4)에서는 -는 가극결선 시를 나타내고 +는 감극결선 시를 나타낸다. 여기서, 상호인덕턴스  $M = k\sqrt{L_1 \pm L_2}$  ( $k = 1$ )이다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2(a)는 초전도 소자의 전압 (V<sub>sc</sub>)파형 (N<sub>1</sub>:N<sub>2</sub>=63:21, 42:21, 21:21, 21:42, 21:63)을 보여준다. 초전도 소자로 흐르는 전압의 경우, 식 (1)에서 알 수 있듯이 초전도 소자에 흐르는 전류는 1차 코일의 권선수와 2차 코일의 권선수의 턴 비로써 결정되는 유도 전류와 1차 코일의 전류의 합으로 초전도 소자에 흐르는 전류의 양이 결정되게 된다. 63:21턴일 경우 가장 큰 권선 비로 2차 권선에 유도되는 전류는 가장 크지만, 제한되는 사고 전류양이 가장 크기 때문에 초전도 소자에 흐르는 전류의 양도 작아지고 전압 또한 가장 작은 값을 나타내었다. 그림 2(b)는 가극 결선 시 선로에 흐르는 전류 (I<sub>FCL</sub>)을 보여준다. 사고 후 선로전류의 첫 주기 피크 값은 각각 63:21일 경우 80.53 A<sub>peak</sub>, 42:21일 경우 115.99 A<sub>peak</sub>, 21:21일 경우 189.92 A<sub>peak</sub>, 21:42일 경우 260.63 A<sub>peak</sub>, 21:63일 경우 294.04 A<sub>peak</sub>를 나타낸다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 L<sub>1</sub>이 증가하면 발생 임피던스도 증가하게 된다. 이로 인해 보다 많은 사고 전류를 제한하는 것을 보여 주고 있다.

이와 반대로 L<sub>2</sub>가 증가하면 발생 임피던스는 감소하게 되고, 제한되는 사고전류는 감소하게 된다.

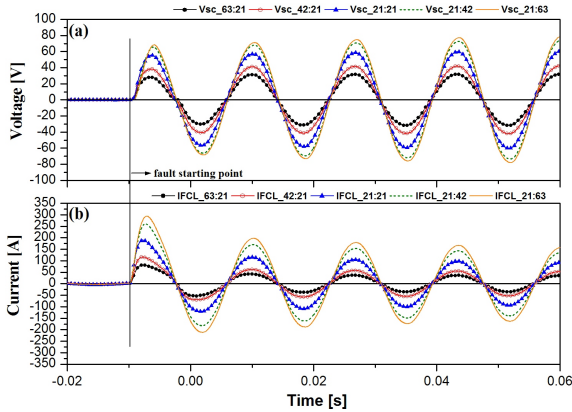


Fig. 2. Voltage and current pattern of additive polarity (a) voltage of superconductor unit ( $V_{sc}$ ) (b) current of the line ( $I_{FCL}$ ).

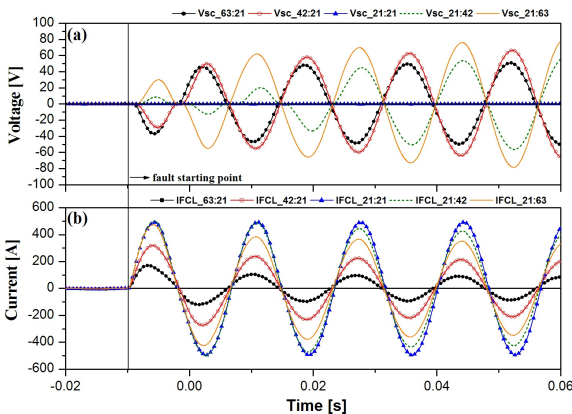


Fig. 3. Voltage and current pattern of subtractive polarity (a) voltage of superconductor unit ( $V_{sc}$ ) (b) current of the line ( $I_{FCL}$ ).

그림 2(a)는 감극 결선 시 초전도 소자의 전압 ( $V_{sc}$ )파형 ( $N_1:N_2=63:21, 42:21, 21:21, 21:42, 21:63$ )을 보여준다. 초전도 소자로 흐르는 전압의 경우, 식 (1)에서 알 수 있듯이 초전도 소자에 흐르는 전류는 1차 코일의 권선수와 2차 코일의 권선수의 턴 비로써 결정되는 유도 전류와 1차 코일의 전류의 차로 초전도 소자에 흐르는 전류의 양이 결정되게 된다. 1차 권선과 2차 권선의 권선비가 클수록 2차 권선에 유도되는 전류의 양은 1차 권선의 전류보다 커지게 되고 초전도 소자에 흐르는 전류는 1차 권선의 전류와 반대방향으로 전류가 흐르게 된다. 반대로 2차 권선수가 1차 권선수보다 커질 경우 2차 권선에 유도되는 전류는 1차

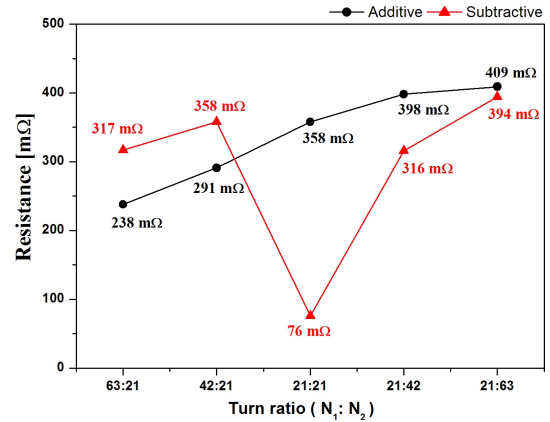


Fig. 4. Resistance pattern according to turn ratio and winding diction.

권선에 흐르는 전류보다 작아지게 되고 초전도 소자에 흐르는 전류는 1차 권선의 전류와 같은 방향으로 흐르게 된다. 그리고 권선비가 1인 경우 1차 권선의 전류와 2차 권선의 전류의 양이 거의 같아지게 된다. 그로 인하여 초전도 소자에 발생하는 매우 작은 전압 파형을 그림 3(a)에서 보여 주고 있다. 그림 3(b)은 감극 결선 시 선로에 흐르는 전류 ( $I_{FCL}$ )를 보여준다. 사고 후 선로전류의 첫 주기 피크 값은 각각 63:21일 경우 169.5  $A_{peak}$ , 42:21일 경우 318.67  $A_{peak}$ , 21:21일 경우 429.08  $A_{peak}$ , 21:42일 경우 500  $A_{peak}$ , 21:63일 경우 414.67  $A_{peak}$ 를 나타낸다. 식 (4)에서 알 수 있듯이  $L_1$ 이 증가 할수록 발생 임피던스는 커지게 되고 보다 많은 사고전류를 제한하는걸 보여주고 있다. 또한,  $L_2$ 가 증가 할수록 발생 임피던스 커지게 되고 2차 권선수가 증가 할수록 제한되는 사고전류가 많아지는 것을 보여주고 있다.

그림 4는 1차 권선과 2차권선의 권선비와 2차권선의 결선 방향에 따른 저항파형을 보여주고 있다. 가극일 경우 1차 권선과 2차 권선의 권선비가 감소 할수록 초전도 소자에 흐르는 전류의 양이 커져 초전도 소자의 저항도 커지는 것을 보여 주고 있다. 감극일 경우에도 1차 권선과 2차 권선의 권선비가 작아질수록 초전도 소자저항이 높아지는 것을 보여주고 있다. 이때에 권선비가 1보다 클 경우 초전도 소자에 흐르는 전류의 양이 권선비가 1보다 작을 경우 보다 크기 때문에 권선비가 1보다 작을 경우 보다 높은 저항 값을 나타나게 되고, 권선비가 1일 경우 초전도 소자에 흐르는 전류는 매우 작아지고 다음과 같이 매우 작은 저항 값을 나타나게 된다.

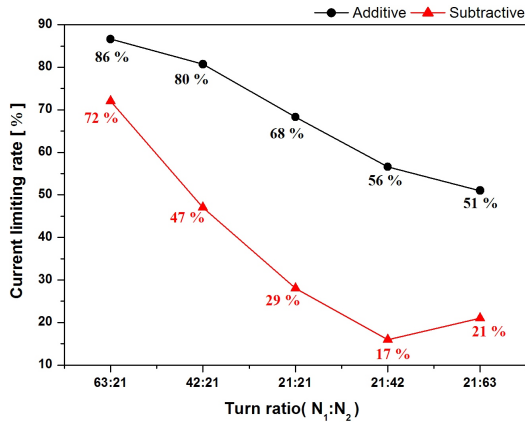


Fig. 5. Current limiting rate pattern according to turn ratio and winding diction.

그림 5는 권선비와 결선 방향에 따른 전류제한율을 보여주고 있다. 가극일 경우 1차 권선과 2차 권선의 권선비가 작아질수록 전류제한율이 작아지는 것을 보여주고 있다. 감극 결선시일 경우 1차 권선과 2차 권선의 권선비가 1보다 클 경우 권선비가 작아질수록 전류제한율이 작아지게 되고, 권선비가 1보다 작을 경우 권선비가 작아질수록 전류제한율은 증가하는 것을 보여 주고 있다. 또한, 권선비가 1일 경우 초전도 소자에 흐르는 전류의 양은 매우 작지만 초전도 소자에 퀵치가 발생하여 사고전류를 제한하는 것을 보여 주고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 개선된 자속구속형 전류제한기의 1차 권선과 2차 권선의 권선비와 2차 권선의 결선 방향에

따른 전류제한 특성을 살펴보았다. 가극 결선 시 권선비가 증가할수록 사고 전류를 보다 많이 제한하였으며, 초전도 소자에 흐르는 전류의 양의 감소로 인하여 초전도 소자의 저항 역시 작아지는 것을 알 수 있었다. 감극 결선시의 경우 권선비가 1보다 클 경우 권선비가 클 수록보다 많은 사고전류를 제한하였으며 초전도 소자의 저항 작았다. 하지만 권선비가 1보다 작을 경우 권선비가 작아질수록 사고 전류의 제한측면 및 초전도 소자의 부담 측면에서 보다 나은 특성을 나타내었다. 또한, 권선비가 1일 경우 2차 권선의 인덕턴스 값이 권선비가 1보다 작은 권선비보다 크기 때문에 보다 나은 전류제한 특성을 확인 할 수 있었다.

#### 감사의 글

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

#### REFERENCES

- [1] J. H. Kim and K. W. Lee, *Journal of Electrical World*, **256**, 19 (1998).
- [2] J. Sim, H. R. Kim, K. B. Park, J. S. Kang, B. W. Lee, I. S. Oh, and O. B. Hyun, *Superconductivity and Cryogenics* **6**, 50 (2004).
- [3] H.-S. Choi, N.-Y. Lee, Y.-H. Han, T.-H. Sung, and B.-S. Han, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18**, 737 (2008).
- [4] H.-I. Du, M.-J. Kim, S.-G. Doo, Y.-J. Kim, and B.-S. Han, *Trans. Electr. Electron. Mater.* **10**, 62 (2009).