

## 자속구속형 초전도전류제한기의 권선비 변화에 따른 전류제한 및 전압강하 보상 특성

한태희<sup>1</sup>, 임성훈<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> 중원대학교 에너지자원공학부

<sup>2</sup> 숭실대학교 전기공학과

### Current Limiting and Voltage Sag Suppressing Characteristics of Flux-lock Type SFCL According to Variations of Turn Number's Ratio

Tae-Hee Han<sup>1</sup> and Sung-Hun Lim<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy Resources Engineering, Jungwon University, Goesan 367-805, Korea

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received November 15, 2010; Revised January 26, 2011; Accepted March 25, 2011)

**Abstract:** In this paper, we investigated the fault current limiting and the load voltage sag suppressing characteristics of the flux-lock type SFCL, designed with the additive polarity winding, according to the variations of turn number's ratio and the comparative analysis between the resistive type and the flux-lock type SFCLs were performed as well. From the analysis for the short-circuit tests, the flux-lock type SFCL designed with the larger turn number's ratio was shown to perform more effective fault current limiting and load voltage sag suppressing operations compared to the flux-lock type SFCL designed with the lower turn number's ratio through the fast quench occurrence of the high- $T_c$  superconducting (HTSC) element comprising the flux-lock type SFCL. In addition, the recovery time of the flux-lock type SFCL after the fault removed could be confirmed to be shorter in case of the flux-lock type SFCL designed with the lower turn number ratio.

**Keywords:** Flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL), Fault current, Voltage sag suppressing operation, Additive polarity winding, Recovery time.

#### 1. 서론

산업사회의 지속적인 발전에 따른 전력 수요와 설비의 증가는 계통의 선로 임피던스를 감소시키고 있고, 단락이나 번개 등 사고전류 발생 시 사고전류의 증가로 기존 차단기의 차단내력을 초과하게 되어 전력계통 보호 기기들에 심각한 피해를 주게 된다.

현재 사고전류의 대책으로는 단락 용량이 큰 차단

기 교체나 고 임피던스 전력설비 설치, 직렬 리액터 설치, 모선분리 등 여러 방법들을 시도하고 있지만 교체 비용과 용량증대에 따른 문제점들을 가지고 있다. 이와 같이 기존의 방법들이 가지고 있는 문제점들을 해결하고 보다 효율적으로 제어할 수 있는 대안으로 초전도전류제한기 (SFCL)가 가장 이상적인 대안으로 평가되고 있다 [1].

자체 사고전류 검출과 고속 동작이 가능한 초전도전류제한기는 계통적용 시 차단기 교체에 따른 비용

a. Corresponding author: superlsh73@ssu.ac.kr

감소, 계통의 안정성, 환경 친화성, 소형화 등의 장점으로 선진국에서 그 우수성들을 보고하고 있다 [2-4].

현재까지 개발된 초전도전류제한기중 자속구속형 초전도전류제한기 (SFCL)는 정상작동 시에는 자속이 발생되지 않지만, 고장전류가 유입되어 초전도 소자의 임계전류를 넘는 순간 초전도 소자는 퀘치가 발생되고 철심코어 내부자속이 발생되어 전압이 유기됨으로써 고장전류를 제한하게 된다 [5-10]. 자속구속형 초전도전류제한기 구조는 철심코어를 매개로 두 개의 코일이 병렬로 결선되어 있으며 결선방향과 두 코일의 권선비 조절을 통해 제한기의 임피던스를 조절할 수 있다. 가극결선인 경우 고장발생시 고장전류 제한특성이 감극결선한 경우보다 우수하며, 전류제한기를 구성하는 초전도 소자의 부담도 감소될 수 있다 [11-13].

본 논문에서는 고장선로와 건전선로로 구성된 모의전력 계통에 가극 결선으로 설계된 자속구속형 초전도전류제한기를 설치한 후 전력계통 내에 고장발생시 두 코일의 권선비의 변화에 따른 초전도 소자의 퀘치 시간, 소비전력과 고장제거 후 회복시간을 저항형 초전도전류제한기와 비교·분석하였다. 또한, 부하저항 변화에 따른 고장선로와 건전선로에서 전압강하 보상특성과 고장선로의 전류제한 특성들을 측정하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 등가회로 분석

강자성체 철심을 매개로 두 코일을 병렬로 결선하고 초전도 소자를 2차 코일에 직렬로 연결한 자속구속형 초전도전류제한기의 구조를 그림 1에 도시하였다. 코일의 결선방향에 따라 감극결선과 가극결선으로 나누어지며, 철심코어의 쇄교 자속은 결선방향에 따라 증가되거나 감소하게 된다. 강자성체 철심의 1차 코일과 2차 코일의 권선수를  $N_1$ 과  $N_2$ 라 하면, 각 코일의 전압은 식 (1)과 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$V_{N1} = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$$V_{N2} = \pm N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

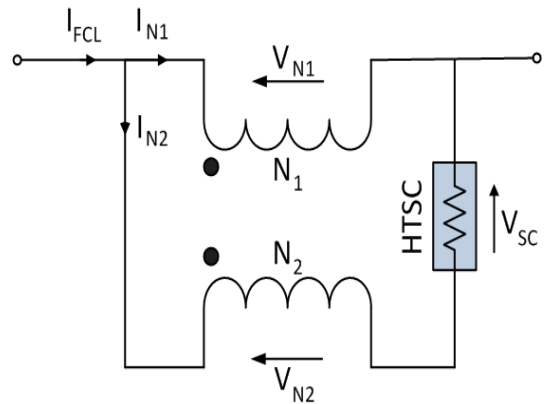


Fig. 1. Structure of a flux-lock type SFCL.

초전도소자에 유기되는 전압은 식 (3)과 같이 두 코일의 전압으로 표현할 수 있다.

$$V_{sc} = (N_1 \pm N_2) \cdot \frac{d\phi}{dt} = V_{N1} \pm V_{N2} \quad (3)$$

식 (3)에서  $(N_1 \pm N_2) \neq 0$ 이면 정상 시 초전도 소자의 전압은 0이 되므로  $d\phi/dt = 0$  조건에 의해 두 코일의 전압도 영을 유지하게 된다. 고장발생 시 초전도 소자 전압은 0이 아니므로  $d\phi/dt \neq 0$  조건에 의해 각 코일에 0이 아닌 전압이 유기된다.

식 (3)에서 +는 두 코일의 결선방향이 감극결선한 경우를, -는 가극결선한 경우를 나타낸다.

고장전류를  $I_{FCL}$ , 1차코일과 2차코일의 전류를  $I_{N1}$ 과  $I_{N2}$ 라 하면 고장전류를 포함한 각 코일의 전류는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{FCL} = \pm I_{N1} + I_{N2} \quad (4)$$

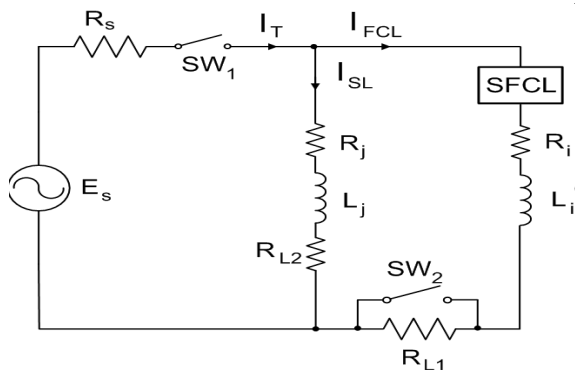
### 2.2 실험장치 구성 및 방법

두 코일의 권선비의 변화에 따른 자속구속형 초전도 전류제한기의 전류제한 특성을 측정하기 위한 모의실험장치 구성을 그림 2에 도시하였다. 실험장치의 구성요소와 각 파라미터를 표 1에 나타내었다.

모의계통실험은 1차 코일과 2차 코일을 가극방향으로 결선한 다음 고장발생을 모의하기 위해 계통실험장치에 전원전압( $E_s$ ) 120 [ $V_{rms}$ ]를 인가하고, 스위치  $SW_1$ 을 투입하였다.

**Table 1.** Specification of experimental circuit including a flux-lock type SFCL.

Component	Parameter		Value	Unit
Power	Power Resistor	$R_s$	1.2	$\Omega$
Line	Resistor	$R_i, R_j$	0.108	$\Omega$
	Inductance	$L_i, L_j$	2.655	mH
Load	Load Resistor 1	$R_{L1}$	51.5	$\Omega$
	Load Resistor 2	$R_{L2}$	10.3, 30.9, 51.5	$\Omega$
Flux-lock Type SFCL	Turn Number of Two Coils (additive winding)	$N_2/N_1$	0.25, 0.5	
Resistive Type	Critical Current	$I_c$	19	A



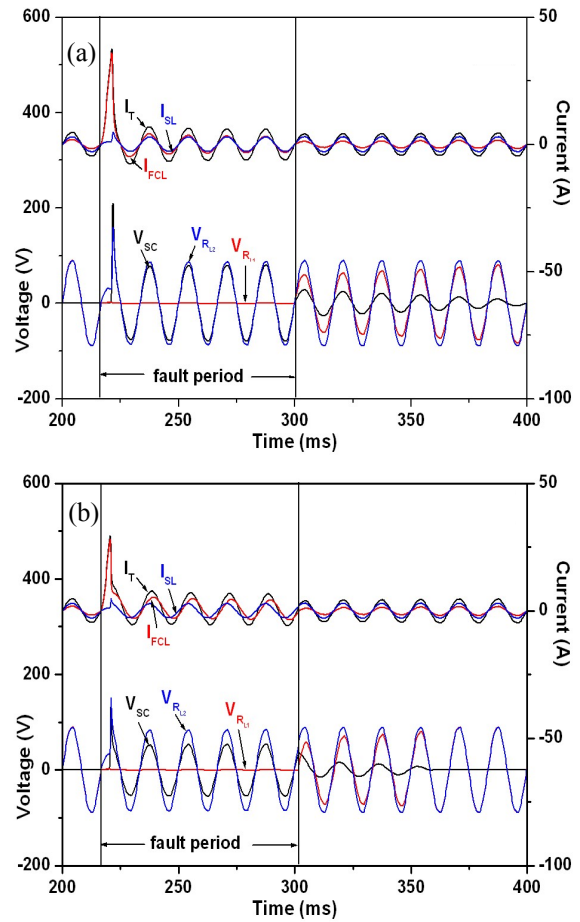
**Fig. 2.** Experimental circuit with fault and sound lines.

고장주기 동안 스위치  $SW_2$ 를 작동하여 단락사고를 유발시켜 자속구속형 초전도전류제한기를 구성하는 초전도 소자의 퀘치를 발생시켰으며, 각 선로에서 고장 전류제한과 부하전압 강하억제특성을 측정할 전압과 전류로부터 분석하였다.

그림 2에서  $I_T$ 는 전원에 흐르는 전류이며,  $I_{FCL}$ ,  $I_{SL}$ 은 각각 고장선로와 건전선로에 흐르는 전류를 나타낸다. 부하저항  $R_{L1}$ ,  $R_{L2}$ 는 고장선로와 건전선로의 저항을 나타내고 있다. 본 실험에서는 부하저항 변화에 따른 고장선로와 건전선로에서 전압강하 보상특성을 측정하기 위해 고장선로의 부하저항( $R_{L1}$ )을 51.5[ $\Omega$ ]으로 고정하고, 건전선로의 부하저항( $R_{L2}$ )를 10.3[ $\Omega$ ], 30.9[ $\Omega$ ], 51.5[ $\Omega$ ] 으로 변화하여 전압보상 특성을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 건전선로의 부하저항이 30.9[ $\Omega$ ]일 때, 저항형과 자속구속형 초전도전류제한기의 고장발생 시



**Fig. 3.** Fault current limiting and load voltage suppressing characteristics of fault and sound lines, (a) resistive type SFCL, (b) flux-lock type SFCL.

고장선로와 건전선로에서의 전류 및 전압파형을 보여 준다. 저항형과 자속구속형 초전도전류제한기 모두 초기 고장전류 ( $I_{FCL}$ )는 급격하게 증가하고 있으며 반주기 이후 고장전류가 제한되는 것을 확인할 수 있다. 이는 초전도소자에 퀘치 (quench)발생으로 저항이 증가되고 1, 2차 코일에 전압이 유기됨으로써 고장전류를 제한하는 것임을 알 수 있다.

사고발생 5주기 동안 초전도소자 ( $V_{sc}$ )의 전압은 저항형에 비해 자속구속형 초전도전류제한기의 전압이 낮게 나타나고 있다. 이는 식 (3)에서와 같이 가극 결선인 경우 초전도소자 전압은  $V_{sc} = V_{M1} - V_{M2}$ 로 나타나기 때문이다.

그림 4는 저항형과 자속구속형 초전도전류제한기의 권선비에 따른 퀘치 시간을 보여준다. 저항형보다 자

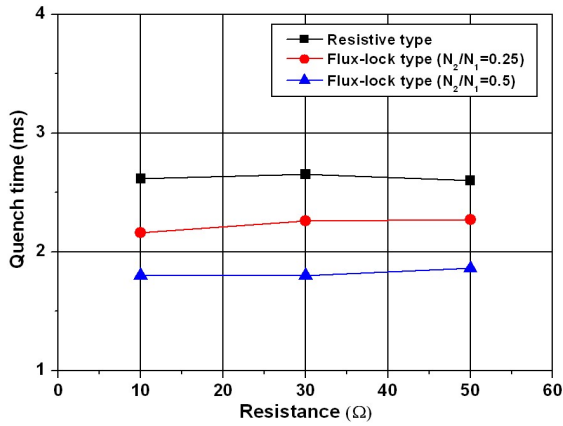


Fig. 4. Quench time variations of the resistive type and the flux-lock type SFCLs according to load resistance connected with the sound line.

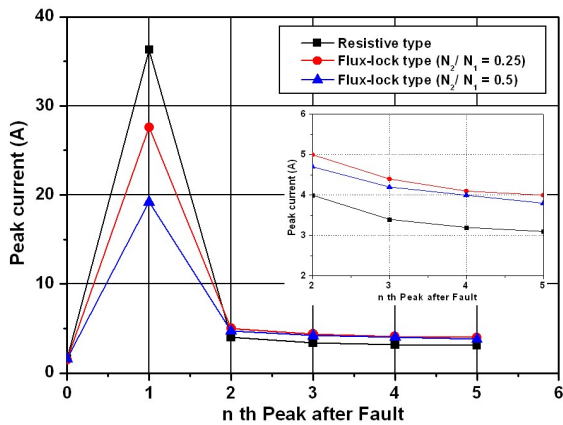


Fig. 5. Variation of peak values of fault current during the fault period in both cases of the resistive type and the flux-lock type SFCLs.

속구속형 초전도전류제한기가 빠른 켜치 시간을 나타내고 있고, 권선비( $N_2/N_1$ )가 0.25에 비해 0.5로 증가한 경우 켜치 시간은 짧게 나타나고 있다. 건전선로의 부하저항을 변화한 경우 저항형과 자속구속형 전류제한기 모두 켜치 시간에는 영향이 없었다. 이는 건전선로를 구성하는 부하저항의 전압강하에 의한 것으로 사료된다.

그림 5는 부하저항이 10.3[Ω]일 때 저항형 초전도전류제한기와 자속구속형 초전도전류제한기의 권선비에 따른 고장전류( $I_{FCL}$ )의 피크전류를 나타내었다. 저항형과 자속구속형 모두 고장발생 즉시 고장전류가 급격

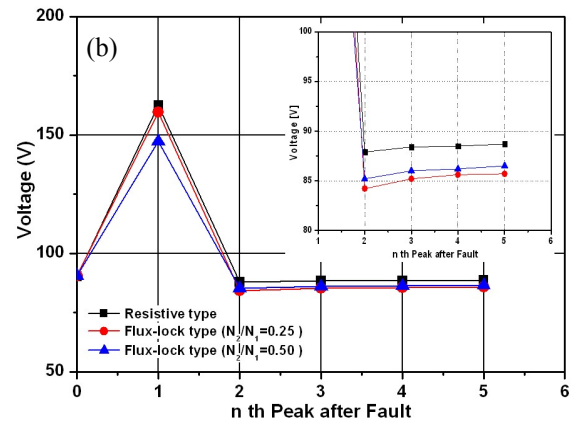
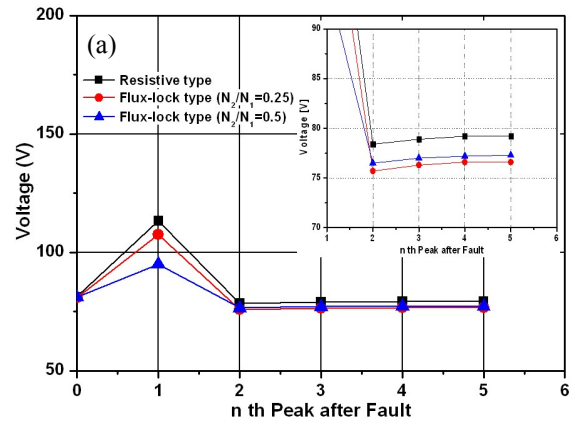


Fig. 6. Variation of load voltage of the sound line during the fault period in both the cases of the resistive type and the flux-lock type SFCLs, (a)  $R_{L2} = 10.3$  [Ω], (b)  $R_{L2} = 51.5$  [Ω].

하게 상승하고 있으며 저항형의 경우 피크전류는 가장 크게 나타나고 있고, 자속구속형의 경우 권선비( $N_2/N_1$ )가 0.25에 비해 0.5인 경우 작은 피크전류를 발생시킨다. 권선비에 따라 피크전류가 다른 것은 관계식 (4)에서와 같이 1, 2차 코일전류가 180° 위상차를 나타내기 때문이다.

그림 6은 건전선로의 부하저항( $R_{L2}$ )을 변화하였을 때 권선비에 따른 전압강하 보상특성을 보여준다. 고장전류 발생 전 부하저항이 10.3[Ω]과 51.5[Ω]일 때 건전선로 전압은 각각 81[V]와 90[V]를 나타내고 있다. 고장발생 직후 피크전압은 자속구속형에 비해 저항형에서 높은 전압을 보인다.

2주기에서의 건전선로 전압은 저항형일 경우 78[V]와 88[V], 자속구속형일 경우 76[V]와 85[V]를 나타

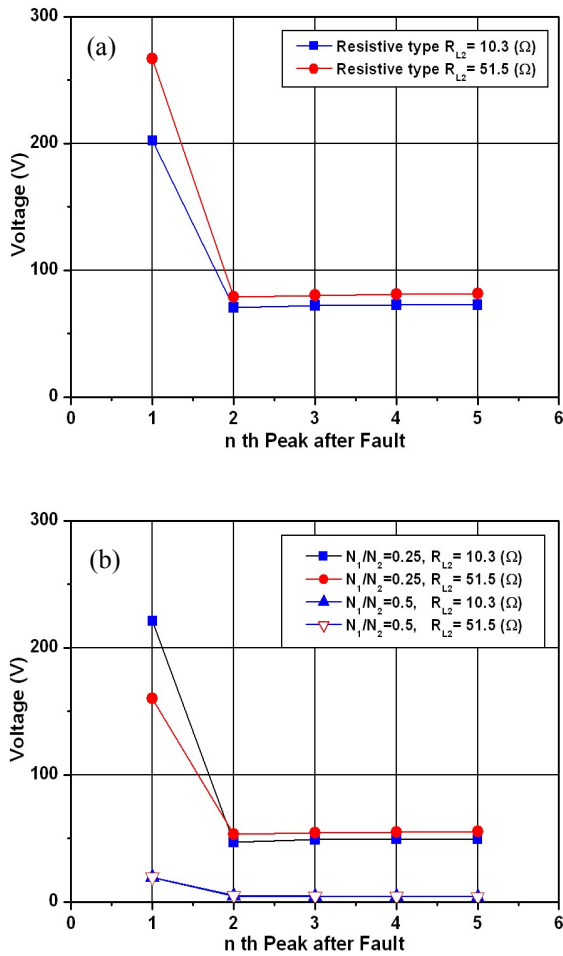


Fig. 7. Variation of voltage across HTSC element during the fault period, (a) resistive type SFCL, (b) flux-lock type SFCL.

났고, 이후 5주기까지 일정한 전압을 나타냈다. 부하 저항 51.5[Ω]에서 저항형일 경우 98%, 자속구속형일 경우 94%의 전압강하 보상특성을 보인다.

그림 7은 건전선로의 부하저항( $R_{L2}$ )을 증가한 경우 저항형과 자속구속형 초전도전류제한기의 고장주기에 따른 초전도소자 전압을 나타내었다. 부하저항을 증가한 경우 저항형과 자속구속형 모두 초전도소자 전압이 증가하고 있는 것을 관찰할 수 있다.

고장전류가 제거되고 정상전류가 초전도 소자에 흐르면 상전도 상태에서 초전도상태로 상전이 일어나는 시점을 회복시간으로 하였다.

건전선로의 부하저항을 10.3[Ω]에서 51.5[Ω]으로 증가한 경우 저항형과 자속구속형 모두 회복시간이 증가하고 있으며

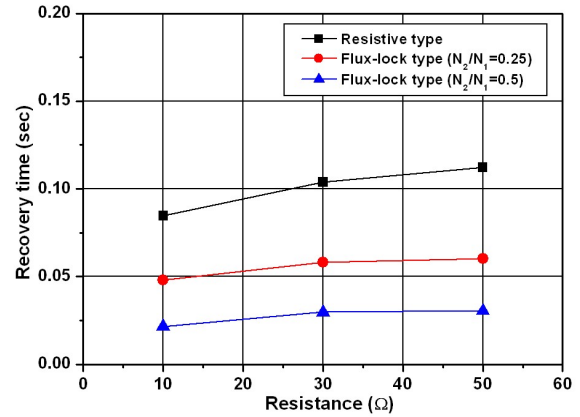


Fig. 8. Recovery characteristics of the resistive type and the flux-lock type SFCL according to turn's ratio.

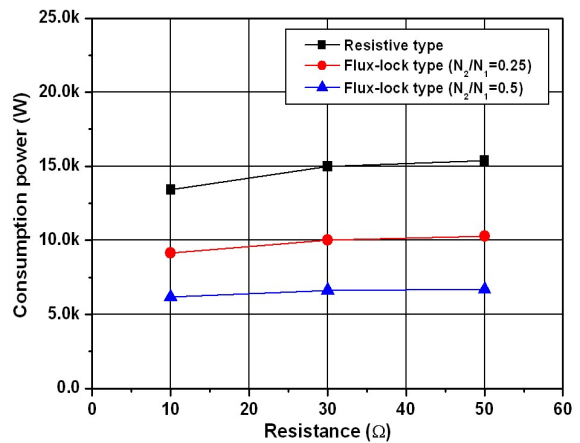


Fig. 9. Power consumption of the HTSC element according to the variation of load resistance of a sound line.

자속구속형의 경우 저항형에 비해 회복시간이 짧았다.

그림 8은 건전선로의 부하저항을 변화하였을 때 저항형과 자속구속형의 권선비에 따른 회복시간을 비교하여 나타내었다. 저항형의 경우 부하저항이 증가할수록 회복시간이 선형적으로 증가하고 있는 반면 자속구속형의 경우 권선비가 0.5인 경우가 0.25에 비해 회복시간이 짧게 나타났고 부하저항이 30.9[Ω]이후 비슷한 시간으로 수렴되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 초전도소자의 상전이 시 발생하는 열에너지는 소비에너지에 비례하기 때문이며 회복시간과 상관관계를 갖고 있기 때문이다.

그림 9는 저항형 초전도전류제한기와 자속구속형 초전도전류제한기의 고장발생 5주기 동안 초전도 소

자의 소비에너지와의 관계를 나타내고 있다. 저항형의 경우 자속구속형 초전도전류제한기보다 초전도 소자의 소비에너지( $W=V_{sc} \cdot I_{sc} \cdot t$ )가 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 사고발생 동안 초전도 소자에 유기되는 전압크기 변화에서 분석한 그림 8의 결과와 일치되는 것을 볼 수 있다. 또한, 자속구속형 초전도전류제한기의 경우 1, 2차 코일의 권선비가 클수록 소비전력이 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 저항형과 자속구속형 초전도전류제한기의 고장발생 시 고장전류제한 및 부하전압 강하역제특성을 비교하였다. 분석을 위한 모의실험 조건으로 건전선로의 부하저항과 가극결선된 자속구속형 초전도전류제한기의 두 코일의 권선수의 비를 고려하여 이들의 변화에 따른 고장선로의 전류제한 특성과 건전선로의 부하전압 보상특성을 분석하였다.

저항형의 경우 자속구속형에 비해 우수한 전압보상 특성을 나타내고 있고, 자속구속형의 경우는 켄치 시간, 회복시간, 소비전력에서 우수한 특성이 나타내었다. 또한 자속구속형의 권선비를 증가한 경우 전류제한 및 전압특성이 향상되는 것을 실험결과로부터 분석할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 논문은 “2011년도 중원대학교 학술연구비지원” 사업으로 인해 수행된 연구로서 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

- [1] B. W. Lee, J. S. Kang, K. B. Park, and I. S. OH, *Supercond. and Cryogenics*, **5**, 10 (2003).
- [2] H. Shimiwu, Y. Yokomizu, and T. Matsumura, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **14**, 807 (2004).
- [3] T. Matsumura, M. Sugimura, Y. Yokomizu, H. Shimizu, M. Shibuya, M. Ichikawa, and H. Kado, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **15**, 2015 (2005).
- [4] M. Maruyama, D. Iioka, Y. Yokomizu, and T. Matsumura, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 1819 (2007).
- [5] H. Kado and M. Ichikawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **7**, 993 (1997).
- [6] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, U. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, *IEEE Trans. On Power Del.*, **6**, 801 (1991).
- [7] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, *Cryogenics*, **44**, 249 (2004).
- [8] S. H. Lim, *Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 1895 (2007).
- [9] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, *Physica C*, **416**, 34 (2004).
- [10] S. H. Lim, H. G. Kang, H. S. Choi, S. R. Lee, and B. S. Han, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **13**, 2056 (2003).
- [11] H. S. Choi and S. H. Lim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**, 1823 (2007).
- [12] S. H. Lim, J. F. Moon, and J. C. Kim, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **19**, 1900 (2009).
- [13] K. G. Oh, T. H. Han, Y. S. Cho, H. S. Cho, M. H. Choi, Y. H. Han, and T. H. Sung, *J. KIIEE*, **21**, 107 (2007).