

## 두 트리거 전류를 갖는 자속구속형 초전도한류기의 고장전류 크기에 따른 초전도 모듈의 전력부담 분석

한태희<sup>1</sup>, 임성훈<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> 중원대학교 항공재료공학과

<sup>2</sup> 숭실대학교 전기공학부

### Analysis on Power Burden of HTSC Module due to Fault Current's Amplitude of a Flux-Lock Type SFCL with Two Triggering Currents

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

<sup>1</sup> Department of Aero Materials Engineering, Jungwon University, Goesan 28024, Korea

<sup>2</sup> School of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

(Received April 18, 2015 Revised May 20, 2016; Accepted June 7, 2016)

**Abstract:** In this paper, the power burden of High- $T_c$  superconducting (HTSC) module comprising the flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) with two triggering currents during the fault period was analyzed. The short-circuit tests for the simulated power system with the SFCL in the different fault positions, which were expected to affect the amplitude of the fault current, were carried out. Through the comparative analysis on the power burden of the HTSC modules, the proposed flux-lock type SFCL was confirmed to be effective to divide into two power burdens according to the amplitude of the fault currents.

**Keywords:** Flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL), Two triggering currents, Fault positions, Power burden

#### 1. 서 론

국내의 급격한 경제 성장에 따른 전력 수요가 급증하고 있고, 송배전 설비 등 부하에 증설되어 고장 전류는 더욱 증대되었다. 송배전 선로에 단락, 지락, 낙뢰 등 고장이 발생하면 계통 내 차단기 및 보호 기기들의 동작 특성에 심각한 문제를 초래하게 된다. 이러한 문제점들을 해결하려는 방안으로는 고 임피던스 기

기 설치, 한류리액터 설치, 대용량 차단기 교체, 모선 분리가 시행되고 있지만 기기 교체의 비용이나 공급신뢰도 저하 등 기술적인 문제점들이 남아있다.

고장 전류를 보다 효율적으로 제한할 수 있는 초전도 한류기(SFCL)는 평상시 초전도 상태로 임피던스가 제로이므로 전력손실이 없고, 고장 발생 시 신속하게 고장 전류를 제한함으로써 계통의 안정도를 향상할 수 있다. 이와 같은 장점이 있어 국내외 연구기관에서 다양한 형태의 한류기 개발 및 계통 적용연구를 활발하게 진행하고 있다 [1-4].

초전도 한류기(SFCL)는 고장 발생 시 초전도 저항의 발생으로 고장 전류의 감지와 제한 동작이 가능한 장점이 있다 [5-10]. 하지만 초전도 한류기 자체가 고

a. Corresponding author; [superlsh73@ssu.ac.kr](mailto:superlsh73@ssu.ac.kr)

장 전류를 모두 감당해야 하는 부담과 고장 전류 크기에 따른 고장 전류 제한이 쉽지 않은 단점을 가지고 있다. 전력계통에 초전도 한류기(SFCL)를 적용하기 위해서는 고장 위치에 따른 고장 전류의 제한뿐만 아니라 모듈의 전력부담을 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 고장 전류 발생 시 초전도 소자의 전력부담 문제를 해결하기 위해 두 트리거 전류를 갖는 자속구속형 SFCL의 모듈의 전력부담 특성을 전기적인 등가회로와 고장 전류 제한 특성을 분석하였다. 제안한 SFCL을 모의 전력계통에 적용하여 고장위치에 따른 고장 전류 크기에 대한 전류제한 특성과 모듈의 전력부담특성 등을 분석하여 제안한 초전도 한류기의 유용성을 확인하였다.

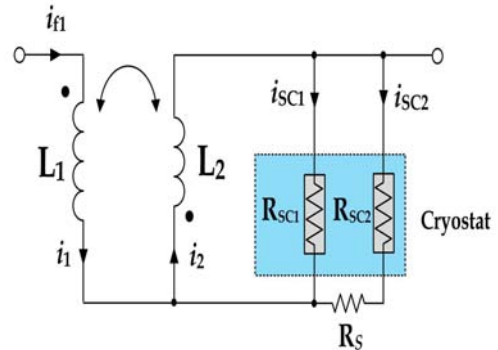
## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 장치 구성 및 실험 방법

트리거 전류 제한기능을 갖는 자속구속형 한류기의 설계 파라미터를 표 1에 나타내었다.

**Table 1.** Design specifications of the flux-lock type SFCL.

Transformer (Tr)	Value	Unit
Rated capacity	5	kVA
Voltage of primary side	400	V
Voltage of secondary side	200	V
Inductance ratio of two coils( $L_2/L_1$ )	0.053	-
Turn ratio between two coils( $N_2/N_1$ )	3	-
Resistance of load	Value	Unit
Load <sub>1</sub>	41.2	$\Omega$
Load <sub>2</sub>	20.6	$\Omega$
Line impedance	Value	Unit
Inductance of line ( $L_1$ )	1.82	mH
Inductance of line ( $L_2$ )	2.74	mH
Resistance of line ( $R_1$ )	0.097	$\Omega$
Resistance of line ( $R_2$ )	0.14	$\Omega$
HTSC elements	Value	Unit
Material	YBCO	-
Critical Temperature	87	K
Critical Current( $I_c$ )	25.7	A
Inserting resistance ( $R_s$ )	0.77	$\Omega$



**Fig. 1.** Schematic configuration of the flux-lock type SFCL with two triggering components.

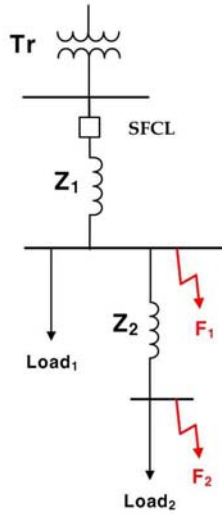
그림 1은 강자성체 철심 코어에 두 코일이 직렬 접속되어 있고, 2차 코일에 초전도 소자(HTSC)가 병렬로 결선 되어있는 자속구속형 초전도 한류기(SFCL)의 배치도이다.

$i_1$ 은 변압기 1차 권선에 흐르는 전류,  $i_2$ 는 변압기 2차 권선에 흐르는 전류이다.  $i_{sc1}$  전류는 트리거 소자 1의 전류,  $i_{sc2}$  전류는 트리거 소자 2의 전류를 나타낸다.  $R_s$ 는 삽입저항을 나타낸다.

### 2.2 동작 원리

동작 원리는 트리거 소자 1의 임계전류( $I_c$ )를 초과하는 고장 전류가 발생하면 초전도 소자 저항( $R_{sc1}$ )이 발생하게 되며, 저항 발생으로 고장 전류의 일부가 트리거 소자 2로 분류되어 흐르게 된다. 이때 트리거 소자 2로 분류되어 흐르는 전류 ( $i_{sc2}$ )의 값이 트리거 소자 2의 임계전류 ( $I_c$ )를 넘지 않으면 트리거 소자 2는 제로저항을 유지하게 되며 전체 고장 전류( $i_{f1}$ )는  $R_{sc1}$ 와  $R_s$ 에 의해 제한된다. 하지만 고장 전류가 크게 발생할 경우, 트리거 소자 2의 임계전류 값( $I_c$ )을 초과하게 되고 저항( $R_{sc2}$ )이 추가로 발생함에 따라  $R_{sc1}$ ,  $R_s$ 를 포함한  $R_{sc2}$ 에 의해 전체 고장 전류를 제한된다.

모의 전력계통은 하나의 주 변압기에 2개의 피더로 구성하였다. 고장을 모의하기 위한 피더에 차단기와 부하 임피던스 사이에 초전도 한류기(SFCL)를 설치하고 부하 2에서 인위적인 고장을 발생시킬 수 있도록 구성하였다. 고장 발생 실험은 정상 동작하던 모의전력 계통선로에 여섯 주기 동안 단락 고장을 발생시킨 다음, 고장 전류를 제거하여 정상 동작 상태로 하였다. 단락

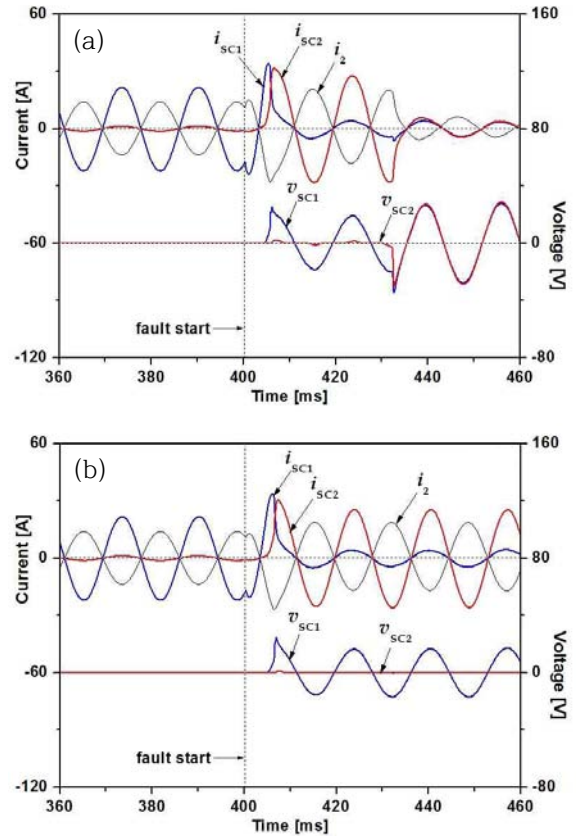


**Fig. 2.** Schematic configuration of a power distribution system including the flux-lock type SFCL where is applied into the outgoing point of the fault feeder.

고장 발생을 위한 실험은 전원 전압 400[V], 고장 각 0도에서 진행하였다. 실험회로에 대한 선저항은 1 Ω, 부하저항은 50 Ω을 갖는 자속구속형 초전도 한류기를 그림 2에 보여준다. 그림 2에서 Tr은 변압기, F<sub>1</sub>은 모선에서의 고장지점, F<sub>2</sub>는 부하 2에서의 고장 지점이다.

### 3. 결과 및 고찰

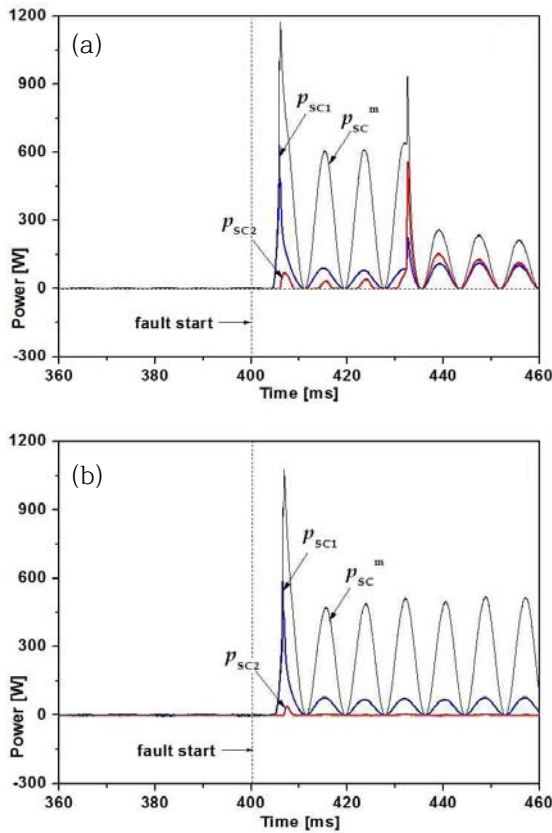
고장위치에 따른 두 트리거 성분을 갖는 초전도 소자의 고장 전류 전압 파형을 그림 3에서 보여준다. 그림 3(a)는 F<sub>1</sub> 지점에서 고장이 발생한 경우이며, 고장 전류 크기가 큰 경우이다. 고장 발생 직후 고장 전류가 급격히 증가하고 있으며 트리거 소자 1의 켄치 발생으로 전압( $V_{SC1}$ )이 나타나고 1/2 주기 이후 고장 전류를 제한하고 있음을 알 수 있다. 트리거 소자 2는 고장 발생 직후 부분 켄치와 회복이 반복되다 2주기 이후 완전 켄치되어 전압 발생으로 고장 전류를 제한하고 있음을 알 수 있다. 그림 3(b)는 F<sub>2</sub> 지점에서 고장이 발생한 경우이며, 고장 전류 크기가 작은 경우이다. 고장 발생 직후 급격하게 전류가 증가하고 있으며 트리거 소자 1의 임계전류( $I_C=25.7$  A)를 초과하게 되어 켄치 발생으로 소자 전압( $V_{SC1}$ )이 나타남을 알 수 있다. 트리거 소자 1의 저항( $R_{SC1}$ )발생으로 고장 전류는



**Fig. 3.** Fault current and voltage waveform of the HTSC elements comprising the two triggering components of the flux-lock type SFCL due to the fault location. (a) In case that the fault occurs at F<sub>1</sub> location, (b) In case that the fault occurs at F<sub>2</sub> location.

트리거 소자 2에 연결된 회로에 분류되어 흐르게 되며, 트리거 소자 2의 임계전류( $I_C$ )를 초과하지 않아 켄치는 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

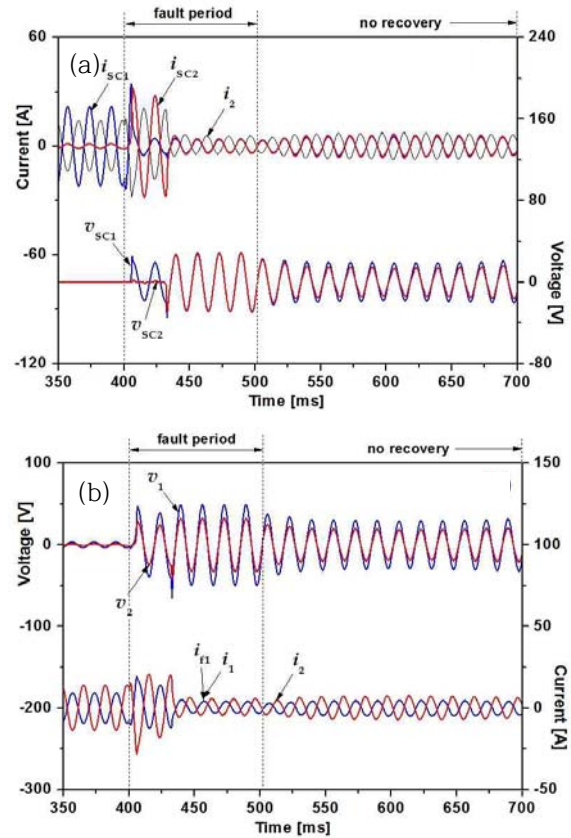
고장위치에 따른 두 트리거 소자와 모듈과의 전력 파형을 그림 4에서 보여준다. F<sub>1</sub> 지점에서 고장이 발생한 그림 4(a)의 경우, 고장 발생 후 두 트리거 소자에서 켄치가 발생한 것을 알 수 있다. 트리거 소자 2에서는 부분 켄치가 이루어지다 2주기 정도 지났을 때 완전 켄치가 발생하고 있음을 보여준다. 고장 발생 기간 동안 초전도 모듈의 전력부담은  $P_{SC1} + P_{SC2} + P_S$ 으로 나타낼 수 있다. F<sub>2</sub> 지점에서 고장이 발생한 그림 4(b)의 경우, 고장 발생 후 두 트리거 소자 중 트리거 소자 1에서 켄치가 발생하여 초전도 모듈의 전력부담은  $P_{SC1} + P_S$ 와 같이 감소하지 않고 지속하고 있음을 확인할 수 있다.



**Fig. 4.** Power waveform of the module and the two triggering components of the flux-lock type SFCL due to the fault location. (a) In case that the fault occurs at  $F_1$  location, (b) in case that the fault occurs at  $F_2$  location.

그림 5는  $F_1$  지점에서 고장이 발생한 경우 고장 전류제한 특성을 나타낸다. 모듈과 트리거 소자의 전류와 전압관계를 그림 5(a)에서 보여준다. 고장 발생 후 트리거 소자의 퀘칭 발생으로 전압이 증가하고 있고 트리거 소자의 전류는 감소하고 있다. 모듈의 전류( $i_2$ )는 2주기 이후 감소하고 있다. 고장 6주기 이후 트리거 소자의 저항은 초전도상태로 바로 회복되지 않고 회복하는 데 시간이 많이 소요되는 것을 알 수 있다. 이것은 직렬연결에 따라 초전도 소자의 내부 에너지가 남아있기 때문으로 생각한다. 그림 5(b)는 코일의 선 전류와 전압관계를 나타낸다. 고장 발생 후 코일 1의 전압이 코일 2의 전압보다 높게 나타나고 있다. 고장 전류( $i_{r1}$ )은 코일 1의 전류와 같이 2주기 이후 감소하고 있다.

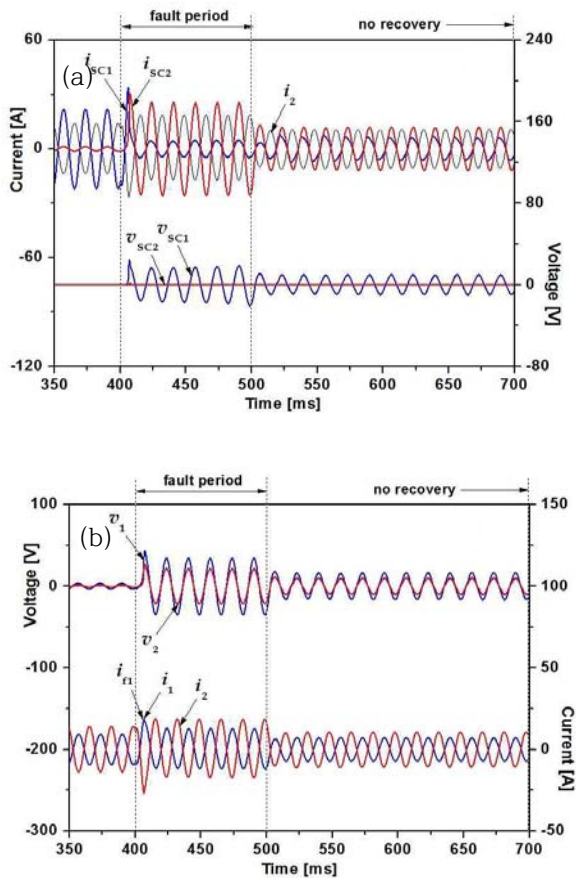
그림 6은  $F_2$  지점에서 고장이 발생한 경우 고장 전류제한 특성을 나타내었다.



**Fig. 5.** Fault current limiting characteristics of the flux-lock type SFCL in case that the fault occurs at  $F_1$  location. (a) current and voltage waveform of modules and superconductor element, (b) current and voltage waveform of coils comprising the SFCL.

모듈과 초전도 소자의 전류와 전압관계를 그림 6(a)에 보여준다. 고장 발생 후 트리거 소자 1에서 퀘칭 발생으로 전압이 증가하고 있고 트리거 소자 2의 전류는 1/2주기 이후 감소하고 있다. 트리거 소자 2에서는 퀘칭이 발생하지 않아 제로 전압을 나타내고 있고 고장 전류는 감소하지 않고 있다. 모듈의 전류는 고장주기 동안 감소하지 않고 있다. 고장 6주기 이후 트리거 소자 1의 저항은 초전도상태로 바로 회복되지 않고 회복하는데 시간이 많이 소요되는 것을 알 수 있다.

그림 6(b)는 코일의 선 전류와 전압관계를 나타낸다. 고장 발생 후 코일 1의 전압이 코일 2의 전압보다 높게 나타나고 있다.



**Fig. 6.** Fault current limiting characteristics of the flux-lock type SFCL in case that the fault occurs at  $F_2$  location. (a) Current and voltage waveform of modules and superconductor element, (b) current and voltage waveform of coils comprising the SFCL.

고장 전류( $i_{f1}$ )는 코일 1의 전류와 같이 고장 6주기 동안 같은 파형을 나타내고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 자속구속형 초전도 한류기(SFCL)를 모의전력 계통에 적용하여 피더의 고장위치에 따른 고장 전류 발생 시 고장 전류제한과 모듈의 전력부담 특성 등을 비교·분석하였다. 고장 위치에 따라 고장 전류가 발생한 경우 고장 전류 크기가 다를 수 있었다. 고장 전류의 크기가 큰 경우 두 트리거 소자가 켜치되어 소자저항을 발생함으로써  $P_{sc1}+P_{sc2}+P_s$ 에 의해

전력부담을 갖는다. 고장 전류의 크기가 작은 경우엔 트리거 소자 1과 삽입저항으로 고장 전류를 제한하고, 전력부담은  $P_{sc1}+P_s$ 에 의해 전력부담을 갖는 것을 알 수 있었다. 분석을 통해 제안한 두 코일의 직렬접속을 통해 자속구속형 SFCL에서의 고장위치에 따른 고장 전류 크기와 모듈의 전력 부담을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2015R1D1A1A01060575)

#### REFERENCES

- [1] L. Salasoo, A. F. Imece, R. W. Delmerico, and R. D. Wyatt, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **5**, 2 (1995). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/77.402739>]
- [2] M. Noe and B. R. Oswald, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **9**, 2 (1999). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/77.783552>]
- [3] L. Ye, L. Z. Lin, and K. P. Juengst, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **12**, 1 (2002). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2002.1018344>]
- [4] L. Ye and A. Campbell, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **16**, 2 (2006). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2006.870526>]
- [5] H. Shimiau, Y. Yokomizu, and T. Matsumura, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **14**, 2 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2004.828450>]
- [6] T. Janowski, S. Kozak, B. K. Kuczewicz, G. Wojtasiewicz, and J. Kozak, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **17**, 2 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2007.898134>]
- [7] T. Janowski, H. D. Stryczewska, S. Kozak, B. K. Kuczewicz, G. Wojtasiewicz, J. Kozak, P. Surdacki, and H. Malinowski, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **14**, 2 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2004.830298>]
- [8] S. H. Lim, *Physica C*, **470**, 1631 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2010.05.177>]
- [9] S. C. Ko, S. H. Lim, and T. H. Han, *Physica C*, **484**, 263 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2012.03.041>]
- [10] J. H. Lee and S. K. Joo, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **23**, 3 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2013.2266401>]