

## 변압기형 초전도 한류기의 고장전류 제한 및 모선전압강하 억제특성 분석

(Analysis on Fault Current Limiting and Bus-Voltage Sag Suppressing Characteristics of a Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter)

박진설\* · 강대승 · 임성훈\*\*

(Jin-Seol Park · Dae-Seung Kang · Sung-Hun Lim)

### Abstract

As one of the countermeasures to solve the increase of the fault current in a power system, the superconducting fault current limiter (SFCL) has been noticed together with the development of a various types of SFCL, which has accelerated the researches to apply a SFCL into a power system. Among the developed SFCLs, the transformer type SFCL is expected to be available for adjusting the voltage and the current ratings of the SFCL.

In this paper, the fault current limiting and the bus line's voltage sag suppressing effect by the transformer type SFCL were investigated and the case without the transformer type SFCL was compared as well. Through the analysis on the results of the short-circuit tests, the fault current limiting and the bus-line voltage suppressing characteristics of the transformer type SFCL could be confirmed to be effectively performed.

Key Words : Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter(SFCL),  
Fault Current Limiting Characteristics, Voltage-Sag Suppressing Characteristics

### 1. 서 론

지속적인 전력수요 증가는 고장 발생에 따른 고장전류 증가를 야기시키고 있으며, 고장전류의 증가는 전력설비에 기계적, 열적, 전기적 스트레스를 주고, 차단

기의 차단내력을 초과하는 등의 경우가 발생하여 전력설비 교체가 불가피할 경우 비용증가를 초래하게 된다. 뿐만 아니라 배전선로에 단락이 발생하면 모선 전압 강하를 야기하여 전력계통의 안정도 저하를 야기시키게 된다. 이와 같은 단락발생에 따른 고장전류 증가로 인한 문제를 보다 효과적으로 해결하기 위한 방안으로 초전도체의 특성을 이용한 다양한 형태의 초전도 한류기가 제안되어 왔다[1-7].

변압기형 초전도 한류기는 초전도 소자와 기존의 변압기로 구성되며, 고장발생시 초전도 소자에서 발생된

\* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 석사  
\*\* 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수  
Tel : 02-828-7268, Fax : 02-817-7961  
E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr  
접수일자 : 2010년 11월 12일  
1차심사 : 2010년 11월 16일  
심사완료 : 2010년 12월 3일

저항에 의해 차단기의 차단내력 이하로 고장전류 제한이 가능할 뿐 아니라, 변압기를 이용하기 때문에 초전도 소자로 직접적인 고장전류 도통을 피할 수 있어, 고장 제거된 후 빠르게 초전도 상태로 회복되는 특성을 가지고 있다. 뿐만 아니라, 동작전류와 제한 임피던스를 변압비 조절을 통해 설정할 수 있는 장점을 갖는다[8-9]. 그 밖에도 전력계통에 변압기형 초전도 한류기를 설치할 경우 고장전류 제한 뿐 아니라 모션전압강하를 억제하는 동작도 가능하다.

본 논문에서는 변압기형 초전도 한류기와 모의 전력계통을 구성하여 모의 전력계통에 변압기형 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우에 대하여 모의 단락실험을 실시하였으며, 고장전류 제한 및 모션전압 억제특성에 대하여 비교·분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 변압기형 초전도 한류기

변압기형 초전도 한류기는 변압기 2차 권선에 초전도 소자를 연결하고, 1차 권선은 계통선로와 연결되며, 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서  $N_1$ 은 변압기 1차 권선수,  $N_2$ 는 변압기 2차 권선수,  $I_{f1}$ 은 선로 1, 즉, 변압기형 초전도 한류기에 흐르는 전류,  $I_2$ 는 변압기 2차 권선에 흐르는 전류,  $V_1$ 은 변압기 1차 전압,  $V_2$ 는 변압기 2차 전압,  $R_{sc}$ 는 초전도 소자 저항을 나타낸다.

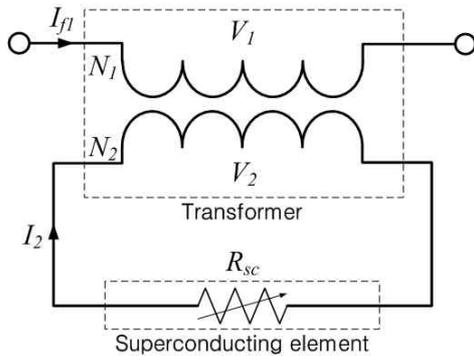


그림 1. 변압기형 초전도 한류기의 구조  
Fig. 1. Structure of a transformer type SFCL

변압기형 초전도 한류기를 구성하는 초전도 소자는 평상시 초전도 상태로 존재하기 때문에 저항이 매우 작아 변압기 2차 권선은 단락회로로 동작하게 된다. 따라서, 변압기형 초전도 한류기는 평상시 전력 손실 없이 부하전류가 변압기 1차 권선을 통해 흐른다. 그러나, 고장이 발생하면 초전도 소자에서 쿼치에 의한 저항이 발생되어, 선로에 흐르는 고장 전류가 제한된다. 이때, 변압기형 초전도 한류기의 임피던스는 권선비를  $a$ 라 할때  $a^2 R_{sc}$ 와 같다.

### 2.2 모의 계통 구성 및 단락실험

그림 2는 변압기형 초전도 한류기의 고장전류 제한 및 모션전압 보상 특성 실험을 위한 모의 계통 구성도를 보여준다. 모의 계통은 하나의 주 변압기에 2개의 피더로 구성하였으며, 각 피더는 해당되는 선로와 부하로 구성하였다. 이때 고장을 모의하기 위한 피더 1의 부하 1 앞에 변압기형 초전도 한류기를 설치하였으며, 부하 1과 변압기형 초전도 한류기 사이에서 인위적인 고장을 발생시킬 수 있도록 구성하였다.

고장 발생 실험은 정상 동작하던 모의 계통의 선로 1에 인위적으로 다섯주기 동안 고장을 발생시킨 후 고장을 제거하여 정상 동작 상태로 회복되도록 하였다.

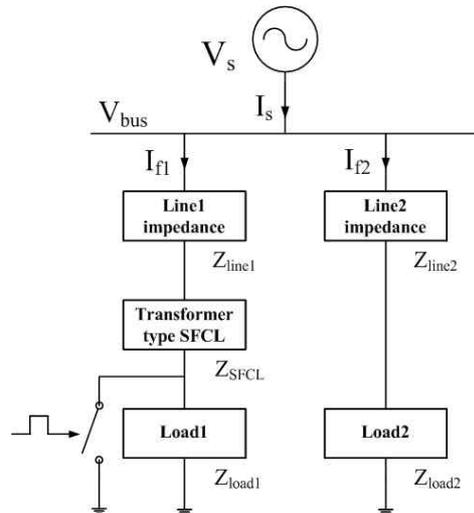


그림 2. 모의 배전계통 구성도  
Fig. 2. Configuration of experimental power system

고장 발생을 위한 모든 실험은 전원전압 120[V], 고장 각 0도에서 진행하였다.

그림 2에서  $V_s$ 는 전원전압,  $V_{bus}$ 는 모선전압,  $I_s$ 는 전체전류,  $I_{f1}$ 은 선로 1 전류,  $I_{f2}$ 는 선로 2 전류,  $Z_{SFCL}$ 은 초전도 한류기 임피던스,  $Z_{line1}$ 은 선로 1 임피던스,  $Z_{line2}$ 는 선로 2 임피던스,  $Z_{load1}$ 은 부하 1 임피던스,  $Z_{load2}$ 는 부하 2 임피던스를 나타내며, 각각의 설계값은 표 1에 나열하였다.

표 1. 변압기형 초전도한류기를 포함한 모의 계통 구성요소 사양

Table 1. Specification of components comprising a simulated power system with a transformer type SFCL

구성요소	파라미터	값	단위
선로	Zline1	0.10 + j0.70	$\Omega$
	Zline2	0.14 + j1.03	$\Omega$
부하	Zload1	41.2 + j1.9	$\Omega$
	Zload2	10.3 + j1.9	$\Omega$
변압기형 초전도 한류기	N1/N2 (권선비)	3	
	IC (초전도소자임계전류)	19	A

그림 2의 모의 계통에 고장을 발생시키면 부하 1은 단락 상태가 되어, 피더 1의 임피던스는 선로 1의 임피던스와 초전도 한류기의 임피던스 합으로 나타나며, 모의 계통의 전체 임피던스는 피더 1과 피더 2의 등가 임피던스로 나타난다. 따라서 단락발생시 증가되는 단락전류는 초전도 한류기의 임피던스에 의해 제한될 수 있으며, 단락발생시 강하되는 모선전압 또한, 초전도 한류기의 임피던스에 의해 억제되어 평상시 전압을 유지할 수 있게 된다.

### 2.3 결과 및 고찰

그림 3은 변압기형 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우와 변압기형 초전도 한류기를 적용한 경우 고장 발생시 선로 1과 2에 흐르는 전류파형을 보여준다. 변압기형 초전도 한류기가 적용되지 않은 경우 고장이 발생하면 부하 임피던스가 없어서 피더 1의 임피던스

는 매우 작아지게 되므로 고장전류는 그림 3 (a)와 같이 크게 증가하게 된다. 그러나 변압기형 초전도 한류기를 적용하면 초전도 소자에서 발생된 저항에 의해 피더 1의 임피던스가 감소되지 않게 되어 그림 3 (b)와 같이 고장전류가 제한된다. 또한 고장이 발생할 경우 피더 1의 임피던스가 변화되기 때문에 고장 전과 고장 후 피더 1과 피더 2의 임피던스 비는 달라진다. 따라서 임피던스 비 변화에 의해 선로 1, 2에 흐르는 전류의 크기 또한 변하게 된다. 변압기형 초전도 한류기가 없는 경우에는 고장발생에 의해 피더 1의 임피던스가 매우 작아져 임피던스 비에 의해 보다 큰 전류가 선로 1로 흐르고, 선로 2는 고장이 발생하기 전보다 작은 크기의 전류가 흐르는 것을 그림 3 (a)에서 분석할 수 있다. 그러나 변압기형 초전도 한류기를 선로 1에 설치할 경우 초전도 소자에서 발생하는 저항에 의해 피더 1의 임피던스가 감소되지 않게 되어 임피던스 비 변화가 고장전과 차이가 작아져 선로 1, 2에 흐르는 전류 또한 변화가 작은 것을 그림 3 (b)로부터 확인할 수 있다.

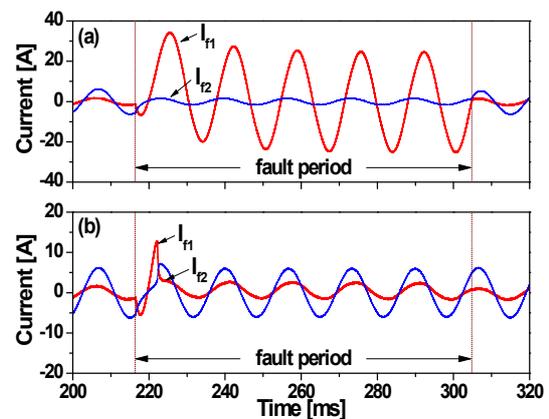


그림 3. 고장 발생시 선로 1, 2에 흐르는 전류파형 (a) 변압기형 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우 (b) 변압기형 초전도 한류기를 적용한 경우

Fig. 3. Current waveforms of feeders 1 and 2 in case of a fault occurrence (a) Without a transformer type SFCL (b) With a transformer type SFCL

그림 4는 변압기형 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우와 변압기형 초전도 한류기를 적용한 경우 단락 발생시 모선 전압파형을 보여준다. 변압기형 초전도

한류기가 적용되지 않은 경우, 전체 임피던스가 매우 작기 때문에 큰 고장 전류가 흘러 모션전압이 감소하게 된다. 그러나 변압기형 초전도 한류기를 적용한 경우 초전도 소자에서 발생된 저항에 의해 피더 1의 임피던스 감소가 억제되어 고장전과 유사한 크기의 모션전압이 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 3 (b)에서 분석한 바와 같이 고장발생시 감소된 피더 1의 임피던스가 변압기형 초전도 한류기에 의해 다시 증가되어 선로 1과 선로 2에 흐르는 전류의 변화가 감소되어 큰 모션전압 감소가 나타나지 않음을 비교분석할 수 있다.

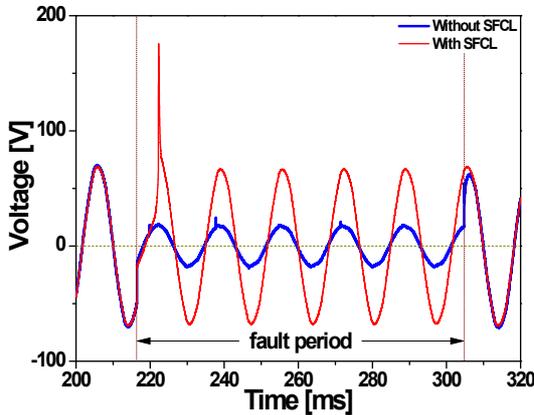


그림 4. 고장 발생시 모션 전압  
Fig. 4. Bus voltage waveforms in case of a fault occurrence

그림 5는 고장주기에 따른 모션 전압의 피크값의 변화를 보여준다. 변압기형 초전도 한류기를 적용한 경우 고장 발생후 첫주기에서 모션전압의 크기가 고장 전보다 크게 상승하는 것을 볼 수 있으며, 이는 그림 4에서 보는 바와 같이 고장발생 직후 변압기형 초전도 한류기의 임피던스 투입에 의해 야기된 서지전압에 의한 것으로 분석할 수 있다. 평상시 모션전압은 약 69[V]로 변압기형 초전도 한류기를 적용하지 않으면 18[V]로 감소하나, 변압기형 초전도 한류기를 적용하면 모션 전압은 약 66[V]로 강하가 억제되는 것을 확인할 수 있다.

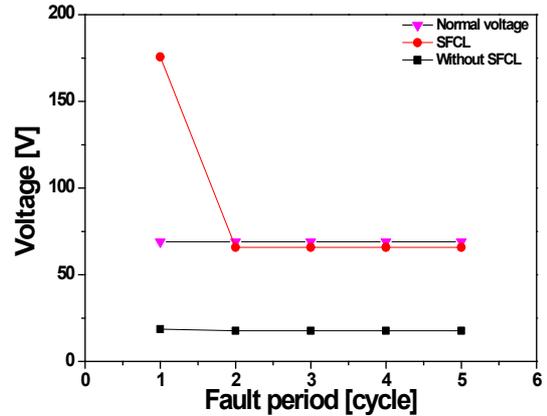


그림 5. 고장 주기에 따른 모션 전압의 피크값 변화  
Fig. 5. Variance of peak value of bus voltage during the fault period

위에서 분석한 바와 같이, 변압기형 초전도 한류기를 피더에 적용한 경우 모션전압에서 고장발생초기에 과도상태는 가장 크게 발생하지만 과도상태가 사라진 후 고장전의 모션전압 크기로 유지되는 것을 분석할 수 있으며, 구성한 모의계통에 실시한 모의단락실험에 대한 분석을 통해 고장전류 제한 뿐 아니라 모션전압 강하 억제도 가능함을 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 변압기형 초전도 한류기의 고장전류 제한 특성 및 모션전압 억제 특성을 모의단락실험을 통해 분석하였다. 변압기형 초전도 한류기가 적용되지 않은 경우 큰 고장전류가 발생되고, 고장전류의 대부분이 선로 1로 흘러 선로 2는 고장전보다 작은 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해 고장발생시 모션전압이 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 반면에 변압기형 초전도 한류기를 적용할 경우 초전도 소자에서 발생된 저항에 의해 고장 전류가 제한되고 선로 1과 선로 2의 전류는 큰 변화가 나타나지 않고 고장전과 비슷한 크기로 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 모션전압의 감소가 억제되어 고장전 전압과 비슷한 크기로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과를 바탕으로 변압기형 초전도 한류기를 계통에 적용했을 때 고장 발생에 따른 고장전류를

제한하여 차단기의 차단내력 이하로 감소가 가능하고, 전력기기에 가해지는 스트레스를 감소시킬 수 있으며, 모션전압 강하억제에 따른 계통의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단할 수 있었다.

향후 단락발생직후 변압기형 초전도한류기로 인한 모션전압의 순간적인 서지발생을 억제하기 위한 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

**감사의 글**

본 논문은 2009년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(과제번호 : 2009-0075355)로서 이에 감사드립니다.

**References**

- [1] 김준환, 이강완, “전력계통 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, pp.19-31, April 1998.
- [2] 이강완, “전력계통 고장전류 문제와 초전도 한류기”, 초전도와 저온공학, pp.8-12, January 2001.
- [3] “유도형 고온 초전도 한류기의 개발 현황”, 초전도와 저온공학, pp.18-22, January 2003.
- [4] 이방욱, 강종성, 박권배, 오일성, “전력계통 고장전류 저감을 위한 한류기술 및 초전도 저항형 한류기 개발 동향 분석”, 초전도와 저온공학, pp.10-17, January 2003.
- [5] T. Hara, T. Okuma, T. Yamamoto, D. Ito K. Tasaki, and K. Tsurunaga, “Development of a new 6.6kV/1500A class superconducting fault current limiter for electric power system,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 182-192, January 1993.
- [6] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Krämer, P. Kum-meth, and H.-W. Neumüller, “Resistive current limiters with YBCO films,” IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 7, no. 2, pp. 828-831, June 1997.
- [7] W. Paul, Th. Baumann, J. Rhyner, and F. Platter, “Test of 100 kW high-Tc superconducting fault current limiter,” IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 5, no. 1, pp. 1059-1062, June 1995.
- [8] H. Yamaguchi, T. Kataoka, K. Yaguchi, S. Fujita, K. Yoshikawa, K. Kaiho, “Characteristics Analysis of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter”, IEEE. Trans. Appl. Superconduct., pp.815-818, June 2004.
- [9] H. Yamaguchi, T. Kataoka, “Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault current Limiter with Shunt Impedance”, IEEE. Trans. Appl. Superconduct., pp.1919-1922. June 2007.

◇ **저자소개** ◇



**박진설** (朴辰高)

1981년 2월 13일생. 2006년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 2008년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).



**강대승** (姜大昇)

1966년 9월 16일생. 1988년 서울대학교 물리학과 졸업. 1991년 서울대학교 대학원 물리학과 졸업(석사). 1987년 USA, Case Western Reserve University 물리학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.



**임성훈** (林成勳)

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.