

모의배전계통에 두 트리거 전류레벨을 이용한 초전도한류기의 전류제한 특성 분석

고석철¹, 한태희^{2,a}

¹ 공주대학교 산학협력단

² 중원대학교 에너지자원공학부

Current Limiting Characteristics of a SFCL with Two Triggered Current Limiting Levels in a Simulated Power Distribution System

Seok-Cheol Ko¹ and Tae-Hee Han^{2,a}

¹ Industry-University Cooperation Foundation, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea

² Department of Energy Resources Engineering, Jungwon University, Goesan 367-805, Korea

(Received November 6, 2012; Revised December 7, 2012; Accepted January 11, 2013)

Abstract: When the accident occurred in power distribution system, it needs to control efficiently the fault current according to the fault angle and location. The flux-lock type superconducting fault current limiters (SFCL) can quickly limit when the short circuit accidents occurred and be made the resistance after the fault current. The flux-lock type SFCL has a single triggering element, detects and limits the fault current at the same time regardless of the size of the fault current. However, it has a disadvantage that broken the superconductor element. If the flux-lock type SFCL has separated structure of the triggering element and the limiting element, when large fault current occurs, it can reduce the burden of power and control fault current to adjust impedance. In this paper, this system is composed by triggering element and limiting element to analyze operation of limiting current. When the fault current occurs, we analyzed the limiting and operating current characteristics of the two triggering current level, and the compensation characteristics of bus-voltage sag according to the fault angle and location.

Keywords: Superconducting fault current limiter (SFCL), Current limiting function, Fault angle, Fault location, Fault current limiting operation

1. 서 론

산업발전에 따른 지속적인 전력수요의 증가는 고장 전류의 증가를 야기시키고 있으며, 고장전류의 증가

는 기존 차단기의 차단용량을 초과하거나 보호 기기의 동작 특성의 오작동 및 부동작 등 계통보호에 문제를 일으킬 수 있는 요인이 된다. 고장전류의 증가 문제를 해결하고 계통의 안정적 운영을 위해 효과적으로 해결할 수 있는 대안으로 초전도한류기(SFCL)가 대두되고 있고, 전력 계통에 적용하려고 시도하고 있다 [1-5]. 초전도한류기는 정상시에 초전도 상태로 저항을 갖지 않으므로 전력손실이 없고, 고장 발생 시 초전도 소자의 임계전류를 초과할 때 저항을

a. Corresponding author; hantaehee@jwu.ac.kr

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

발생한다. 이를 통해 고장전류를 빠르게 감지 및 제한하여 전력계통 내 기기들을 안전하게 보호할 수 있다 [6-8]. 일반적으로 초전도한류기는 트리거 부분과 리미트 부분이 같은 구조의 단일 트리거 방식으로 되어있으며, 고장전류의 크기에 관계없이 고장전류를 탐지하고 제한하는 기능을 동시에 수행하고 있다. 따라서 트리거 부분과 리미트 부분이 분리된 구조를 가지고 있다면 고장전류 크기의 변화에 따라 사고전류를 효과적으로 제한하지 못하는 점과 큰 고장전류 발생 시 초전도 소자가 모두 감당해야 되는 부담과 임피던스 비의 조절을 보완할 수 있다.

본 논문에서는 단일 트리거 방식의 초전도한류기보다 구성요소가 하나 더 추가된 다소 복잡한 구조를 가지고 있지만, 고장전류 발생 시 초전도 소자의 부담과 임피던스 조절을 용이하게 하기 위하여 두 트리거 전류 레벨을 이용하여 피크전류제한 특성을 분석하였다. 또한 제안한 자속구속형 초전도 한류기의 모의단락 실험을 통해 고장 위치와 고장각에 따른 고장전류를 초전도 소자의 켄치에 따른 제한기 임피던스와 동작전류를 분석하였으며 제안한 자속구속형 초전도한류기의 유용성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 동작원리 및 동작전류

초전도한류기는 초전도 소자의 임계전류(I_c)를 넘는 경우 켄치에 의한 저항 발생에 의해 고장전류를 제한하는 원리이다. 트리거 소자로만 구성된 초전도한류기는 큰 고장전류 발생 시 트리거 소자가 고장전류를 모두 감당해야 되므로 심한 경우 소자파손의 부담을 갖고 있다. 이를 보완하기 위해 트리거 소자와 리미트 소자를 병렬로 구성하여 켄치발생 시 임피던스를 조절하여 고장전류를 제한할 수 있다.

그림 1은 트리거 소자와 리미트 소자로 구성된 초전도한류기의 등가회로를 보여준다. 그림 1에서 R_T와 R_L은 HTSC_T와 HTSC_L의 켄치 시 발생하는 초전도 저항을 나타내며, R_X는 삼입저항을 나타낸다. 기본동작 원리는 초전도 소자의 임계전류(I_c)를 초과하는 고장전류(i_{SFCL})가 발생하면 트리거 소자는 저항을 발생하게 되며, 저항발생으로 전체 고장전류의 일부가 리미트 소자로 분류되어 흐르게 된다. 이때, 리미트 소자로 분류되어 흐르는 전류(i_L)의 값이 리미트 소자를 구성하는

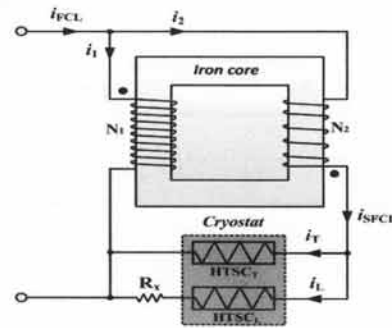


Fig. 1. Schematic configuration of SFCL with peak current limiting function.

초전도 소자의 임계전류를 넘지 않을 경우 리미트 소자는 영저항을 유지하게 되며 초전도체의 고장전류(i_{SFCL})는 R_T와 R_X에 의해 제한된다. 하지만, 고장발생 직후 초기 고장전류가 크게 발생할 경우 리미트 소자의 도통전류(i_L)가 리미트 소자의 임계전류 값을 초과하게 되며, 리미트 소자의 저항(R_L)이 추가로 발생함에 따라 R_X, R_T를 포함한 R_L에 의해 전체고장전류가 제한된다. 그림 1의 초전도한류기 등가 회로로부터 한류기 임피던스는 식 (1)과 같이 유도할 수 있으며, 고장전류의 초기피크 크기가 큰 경우 피크전류 제한동작이 이루어지는 동작전류는 식 (2)와 같이 유도할 수 있다.

$$Z_{SFCL} = (R_X + R_L) \times R_T / (R_L + R_T + R_X) \quad (1)$$

$$I_P = (R_T + R_X) / R_T \times I_C \quad (2)$$

2.2 실험장치 구성 및 방법

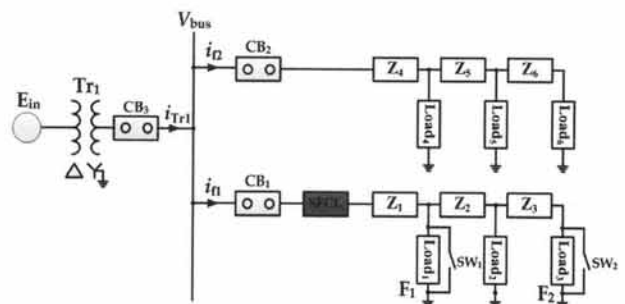


Fig. 2. Schematic configuration of a power distribution system including the SFCL using two triggered current limiting levels.

Table 1. Design specifications of a power distribution experimental circuit with a SFCL.

Parameters	Value	Unit
Transformer(Tr1)		
Rated capacity	5	kVA
Voltage of primary side	400	V
Voltage of secondary side	200	V
Line impedance		
Inductance of line (L_1, L_4)	1.82	mH
Resistance of line (R_1, R_4)	0.097	Ω
Inductance of line (L_2, L_5)	2.74	mH
Resistance of line (R_2, R_5)	0.14	Ω
Inductance of line (L_3, L_6)	2.5	mH
Resistance of line (R_3, R_6)	0	Ω
Resistance of load		
Load ₁ , Load ₄	41.2	Ω
Load ₂ , Load ₅	20.6	Ω
Load ₃ , Load ₆	15.6	Ω

고장 위치에 따른 선로전류와 전압보상 특성을 측정하기 위해 모의실험 장치를 그림 2와 같이 구현하였다. 주 변압기 하나에 2개의 피더와 각 피더에는 선로와 부하 임피던스들로 구성하였다. 고장을 모의하기 위한 피더 1에 차단기와 초전도한류기를 설치하였으며 부하 1과 부하 3에서 고장을 발생시킬 수 있도록 구성하였다. 400 [V_{rms}] 전원전압(E_{in})을 인가한 후, 고장각 0°와 90°서 단락고장을 6주기 동안 발생시켰다. T_{r1}은 변압기 전류, i_{l1}은 선로 1의 전류, i_{l2}는 선로 2의 전류이다. F₁은 부하 1에서의 고장 지점이며, F₂는 부하 2에서의 고장지점이다. 실험 장치의 구성요소 별 파라미터를 표 1에 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

모의 전력계통 내 고장발생 시 초전도한류기의 설치 유·무에 따른 선로전류와 모션전압 파형을 그림 3에서 보여주고 있다.

그림 3(a)는 고장각 0°에서의 피더 1의 부하에 단락사고가 발생한 경우이다. 초전도한류기를 적용하지 않는 경우 고장발생 동안 고장전류는 제한되지 않음을 알 수 있다. 계통 내 고장전류가 발생하면 부하 임피던스가 매우 작아지게 되므로 선로전류(i_{l1})가 증가함을 알 수 있다. 반면, 초전도한류기를 적용한 경우 고

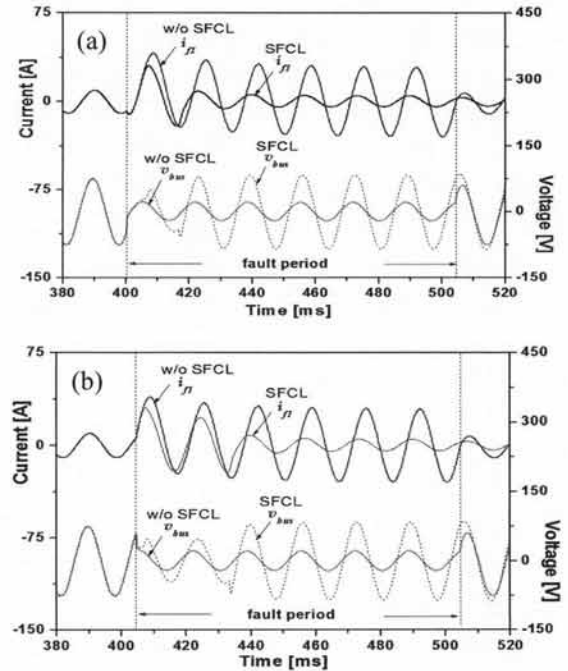


Fig. 3. Fault current limiting characteristics of the SFCL according to the fault angles. (a) at the fault angle 0°, (b) at the fault angle 90°.

장전류가 초전도 소자의 임계전류(I_c)를 초과하면 초전도 소자는 켄치에 따른 저항을 발생하여 선로 임피던스를 증가하여 전류를 제한하게 된다. 고장전류가 발생하면 전체 임피던스가 감소하므로, 초전도한류기가 없는 경우 모션전압은 고장전 74.6 [V]에서 고장발생 후 21.9 [V]로 감소되는 것을 알 수 있다. 초전도한류기를 적용한 경우 고장발생 시 초전도 소자에서 저항을 발생하여 전체 임피던스 감소를 억제하게 되어 고장 전 전압 74.6 [V]으로 전압을 보상하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 고장각 90°에서의 고장을 발생한 경우이며 피더 1의 선로전류와 모션전압의 파형을 보여준다. 초전도 한류기를 적용하지 않는 경우 고장전류는 제한되지 않고 있다. 초전도한류기를 적용한 경우에 2주기 이후에 고장전류 제한이 이루어지는 것을 알 수 있다.

그림 4는 고장각 0°에서 고장발생 시 고장 지점에 따른 트리거 소자와 리미트 소자의 전류와 전압파형을 보여준다. 그림 4(a)는 선로 1의 F₁ 지점에서 고장전류가 발생한 경우이다. 고장발생 후 트리거 소자는 1/2주기, 리미트 소자는 1주기에서 켄치가 발생하는

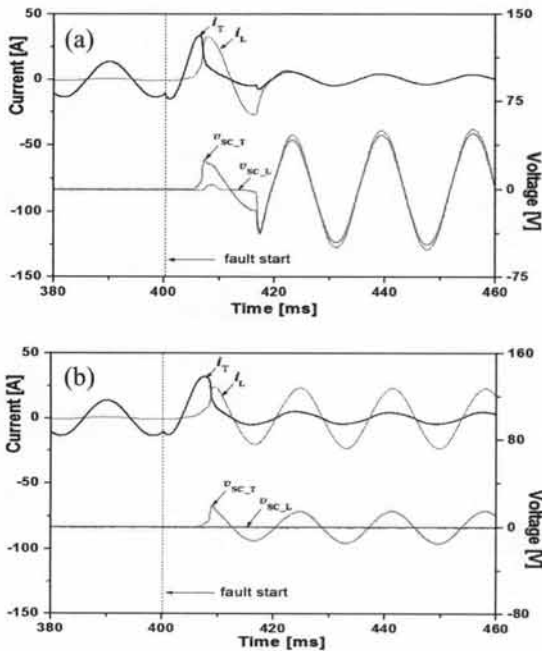


Fig. 4. Fault current limiting characteristics of the SFCL at the fault angle 0° . (a) In case that the fault place at F_1 location, (b) in case that the fault place at F_2 location.

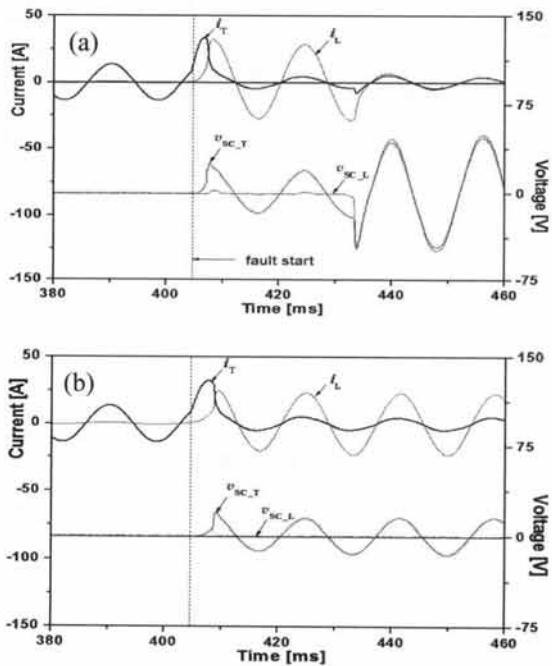


Fig. 5. Fault current limiting characteristics of the SFCL at the fault angle 90° . (a) In case that the fault place at F_1 location, (b) in case that the fault place at F_2 location.

것을 확인할 수 있다. 이것은 트리거 소자에서 켄치에 의한 저항발생으로 고장전류를 제한하고 고장전류 일부가 리미트 소자로 흘러 리미트 소자를 켄치하여 고장전류를 제한하는 것을 알 수 있다. 그림 4(b)는 선로 1의 F_2 지점에서 고장이 발생한 경우이다. 고장 발생 직후 트리거 소자는 1/2주기에서 켄치가 발생하지만 리미트 소자는 켄치를 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

그림 5는 고장각 90° 에서 고장발생 시 고장지점에 따른 트리거 소자와 리미트 소자의 전류와 전압파형을 보여준다. 그림 5(a)는 선로 1의 F_1 지점에서 고장전류가 발생한 경우이다. 고장각이 90° 로 증가함에 따라 트리거 소자는 1/2주기에서 켄치가 발생하지만 리미트 소자는 2주기에서 켄치가 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 고장발생 직후 트리거 소자의 임계전류를 초과하는 전류가 도통하여 켄치를 발생하였고, 리미트 소자는 부분적인 켄치가 발생하여 회복과 켄치를 반복하다가 축적된 열로 인해 2주기는 시점에서 완전한 켄치가 발생하였다. 켄치발생 후 리미트 소자 전압은 트리거 소자의 전압과 유사한 크기의 전압이 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 선로 1의 F_2 지점에서 고장전류가 발생한 경우이다. 그림 5(b)와 같이 트리거 소자만 켄치가 발생이 되고 리미트 소자는 켄치가 발생되지 않음을 알 수 있다. 이는 고장전류 크기가 작은 경우이며, 트리거 소자의 켄치발생에 의한 임피던스에 의해 고장전류가 제한되는 것을 알 수 있다.

그림 6은 고장각 0° 에서 고장발생 시 고장지점에 따른 트리거 소자와 리미트 소자의 전압과 저항곡선을 보여준다. 그림 6(a)는 선로 1의 F_1 지점에서 고장전류가 발생한 경우이다. 트리거 소자에서 켄치발생에 따른 저항이 발생된 후 리미트 소자에서 저항을 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 고장발생과 동시에 트리거 소자에서 켄치를 발생하고 고장전류 일부가 리미트 소자로 유입된 후 리미트 소자에서 저항을 발생하여 고장전류를 제한하고 있음을 확인할 수 있다. 고장이 제거된 후 트리거 소자와 리미트 소자의 회복시간은 150.14 [ms], 148.19 [ms]를 나타내고 있다. 회복시간이 늦은 이유는 초전도 소자의 상전이에 의해 발생된 열에너지가 높기 때문이다. 그림 6(b)는 선로 1의 F_2 지점에서 고장전류가 발생한 경우이다. 트리거 소자에서 켄치를 발생하여 저항을 나타나고 있으며, 리미트 소자에서는 켄치가 발생되지 않음을 알 수 있다.

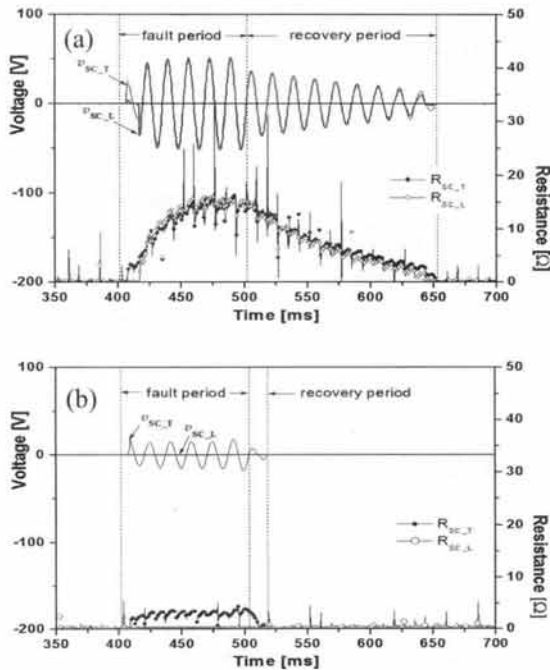


Fig. 6. Fault current limiting and recovery characteristics of the SFCL at the fault angle 0° . (a) In case that the fault place at F_1 location, (b) in case that the fault place at F_2 location.

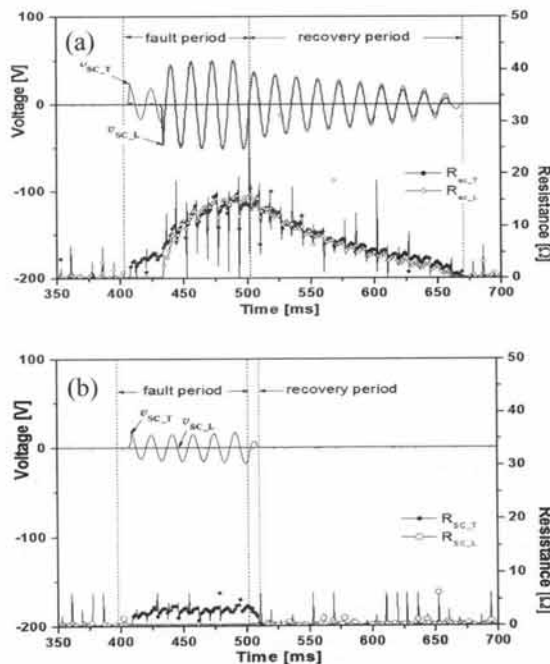


Fig. 7. Fault current limiting and recovery characteristics of the SFCL at the fault angle 90° . (a) In case that the fault place at F_1 location, (b) in case that the fault place at F_2 location.

그림 7은 고장각 90° 에서 고장발생 시 고장지점에 따른 트리거 소자와 리미트 소자의 전압과 저항곡선을 보여준다. 그림 7(a)는 선로 1의 F_1 지점에서 고장 전류가 발생한 경우이다. 고장기간 동안 트리거 소자와 리미트 소자의 켄치에 의한 저항이 발생되는 것을 알 수 있으며 고장각이 90° 로 증가하게 되면 리미트 소자의 2주기에서 켄치가 발생하는 것을 알 수 있다. 고장이 제거된 후 트리거 소자와 리미트 소자의 회복 시간은 166.48 [ms], 158.44 [ms]를 나타내고 있어 고장각이 증가될수록 회복시간은 늦음을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 선로 1의 F_2 지점에서 고장전류가 발생한 경우이다. 트리거 소자에서 켄치가 발생되고 리미트 소자에서는 켄치가 발생되지 않았다. 이는 고장 전류의 크기에 따라 초전도 소자 모듈을 이용하여 고장전류를 제한할 수 있음을 분석할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 고장발생 초기 고장전류의 크기에 따라 두 트리거 전류 레벨을 이용한 초전도한류기의 임피던스와 전류제한 동작을 분석하였고, 고장각과 고장 위치에 따라 모의단락 실험을 통해 전류제한 동작을 확인하였다. F_1 지점에서 고장전류가 발생한 경우 고장전류가 크게 발생하였으며 $R_{SC,T}$, $R_{SC,L}$, R_X 에 의해 고장전류를 제한하였고, F_2 지점에서 고장전류가 발생한 경우, $R_{SC,T}$, R_X 에 의해 고장전류를 제한하였다. 고장각이 0° 에서 90° 로 증가할수록 초기 고장전류의 크기가 감소하게 되고, 부분적인 켄치가 발생하여 회복과 켄치를 반복하면서 축적된 열에너지로 인해 완전한 켄치가 늦어짐을 확인하였다. 향후 다양한 설계 조건에서 모의단락 실험을 통해 제한한 초전도한류기의 전류제한동작 특성을 분석하고자 한다.

REFERENCES

- [1] H. Kado and M. Ichikawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 7, 993 (1997).
- [2] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, U. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, *IEEE Trans. On Power Del.*, 6, 801 (1991).
- [3] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 16, 723 (2006).
- [4] T. H. Han, H. S. Choi, S. H. Lim, and N. Y. Lee,

- Physica*, C463, 1209 (2007).
- [5] S. H. Lim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 17, 1895 (2007).
- [6] S. H. Lim, I. K. You, and J. C. Kim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 21, 2209 (2011).
- [7] J. F. Kim, S. H. Lim, J. C. Kim, and S. Y. Yun, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 21, 2161 (2011).
- [8] I. K. You, S. H. Lim, and O. B. Hyun, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 20, 1168 (2010).