

전압증가 시 재폐로 동작에 따른 변압기형 초전도 한류기의 특성 분석

논 문
59P-4-24

Characteristics on the Transformer-Type SFCL According to Reclosing Operation the Voltage Increase

최수근* · 최효상†
(Soo-Geun Choi · Hyo-Sang Choi)

Abstract - Fault current in power system is expected to increase by demand of power capacity. Therefore, when the fault occurred, fault current was increased in the power system. Many studies have been progressed to limit the fault current. Superconducting fault current limiter (SFCL) is one of them which has been studied in worldwide. In this paper, we will analyze characteristics of a transformer-type SFCL by reclosing operation when the voltage increases. Twice opening times in the reclosing of circuit breaker were set as the 0.5 and 15 seconds, respectively. Turn's number of primary and secondary coils set 4:2 and we increased voltages from 120V to 280V for each experiment. By the current waveform, maximum fault current in second and third cycles was lowered when the voltage was increased. In the recovery waveform, recovery time was increased as the voltage was increased. The reason was that power burden of the SFCL increased when consumption power was increased, so the time to get back to SFCL took longer. We compared the characteristics of a resistive-type and transformer-type SFCL. As a result, we found that the fault current of a transformer-type was lower than resistive-type and recovery time of the SFCL was shorter. Consequently, transformer-type SFCL was more profitable for limitation of fault current and recovery time under the same condition for reclosing operation.

Key Words : Reclosing Operation, Transformer-Type SFCL, Recovery, Fault Current, Resistive-Type SFCL

1. 서 론

오늘날 전력계통은 산업 발전과 급증한 인구로 인하여 전력 사용량이 증가하였고, 이에 따라 전력설비가 지속적으로 증설되고 있다. 이로 인해 지락 및 단락 사고 시 사고전류가 급격히 증가하게 되어, 이러한 사고전류 때문에 안정적이고 신뢰성 있는 전력 공급의 중요성이 높아지게 된다. 이런 사고전류 문제를 해결하기 위한 방안으로는 차단기와 같은 보호기기들의 전면적인 교체나 보수가 있지만 기술적, 경제적으로 부담을 주는 단점이 있다[1-2]. 그래서 사고전류 문제점을 해결하기 위해 세계적으로 초전도 한류기가 많이 연구되어지고 있다. 초전도 한류기에 대한 연구는 국내뿐만 아니라 세계적으로 진행 중이며, 그 종류 또한 다양하다. 이러한 초전도체는 냉각을 위하여 부가적인 장치가 필요하지만 손실이 없다는 장점을 가지고 있고, 사고전류를 안정적으로 차단한다는 장점이 있다[3]. 그러므로 차단기 교체와 달리 경제적으로나 기술적으로 부담을 덜어줄 수 있다. 본 논문에서는 변압기형 초전도한류기를 이용하여 전압 증가 시 재폐로 동작에 따른 특성을 분석하고자 한다. 재폐로 동작 방식은 배전계통에서 가장 중요한 보호방식 중에 하나이다. 특히 계통의 대부분에 사고가 일시적 사고인 점을 고려해

보면 효과적인 방식이라고 할 수 있다. 그리고 변압기형 초전도 한류기는 전력계통과 초전도 소자 사이를 변압기로 연결하기 때문에 초전도 소자에 직접적인 부담을 줄여주고, 사고전류 제한범위 또한 조절할 수 있는 장점이 있다[4]. 또한 본 논문은 변압기형 초전도 한류기의 보다 나은 특성을 확인하기 위해서 저항형 초전도 한류기와 비교·분석하였다.

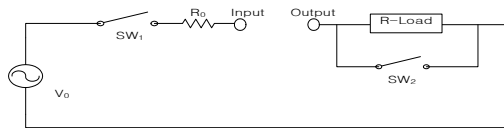
2. 본 론

2.1 구조 및 원리

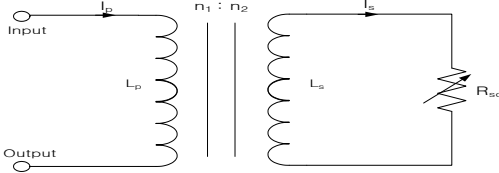
그림 1(a)는 초전도 한류기의 사고전류제한 특성과 회복 특성을 실험하기 위한 실험회로도이다. V_o 는 전원전압이며, 두 개의 한류기의 비교를 위해 120V에서 280V까지 전압을 인가하였다. SW_1 , SW_2 는 각각 전원인가를 위한 스위치와 전력계통에서 부하저항을 단락시켜 사고를 발생시키기 위한 스위치이다. R_o 와 Load는 각각 표준저항과 부하저항으로 1 [Ω]과 50 [Ω]으로 설정하였고, Input와 Output은 변압기형 초전도 한류기를 연결하기 위한 단자이다. 그림1(b)은 변압기형 초전도 한류기의 등가회로도이다. I_p , I_s 는 1, 2차측에 흐르는 전류이며, L_p 와 L_s 는 1, 2차 인덕턴스를 나타내고 있다. 그리고 R_{sc} 는 초전도체이며 표 1을 보면 사양을 나타내고 있다. 또한 n_1 과 n_2 는 1, 2차 권선의 턴수비로 4:2로 설정하였다. 이처럼 실험에 사용된 변압기형 사양은 표 2와 같다.

그림 2는 변압기형 초전도 한류기와 비교하기 위한 저항형 초전도 한류기의 등가회로도이다. 변압기형 초전도 한류기와 마찬가지로 R_{sc} 는 초전도체이며, I_p 와 I_s 는 초전도체에 흐르는

* 준 회원 : 조선대학교 전기공학과 석사과정
† 교신저자, 중신회원 : 조선대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail: hyosang@chosun.ak.kr
접수일자 : 2010년 10월 28일
최종완료 : 2010년 11월 19일



(a) 실험회로도



(b) 등가회로도

그림 1 변압기형 초전도 한류기의 실험회로도 및 등가회로도
Fig. 1 The experimental circuit and equivalent circuit of a transformer-type SFCL

표 1 초전도소자 사양

Table 1 Parameter of superconducting unit

Parameter	Value	Unit
소자직경	2	Inch
스트립폭	2	mm
전체길이	540	mm
YBCO층 두께	0.3	um
금박막 두께	0.1-0.2	um
임계전류	19.3	A
임계온도	87	K

표 2 변압기 사양

Table 2 Parameter of a transformer

철심코어(규소강판)	크기	단위
외측 수평길이	331	mm
외측 수직길이	415	mm
내측 수평길이	191	mm
내측 수직길이	274	mm
두께	130.1	mm
코일 1, 2	값	단위
코일 1의 자기인덕턴스 [턴수비]	73.3[3]	mH
코일 2의 자기인덕턴스 [턴수비]	8.172[1]	mH

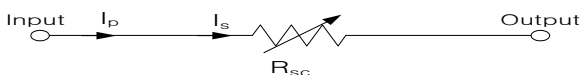


그림 2 저항형 초전도 한류기의 등가회로도
Fig. 2 The equivalent circuit of a resistive-Type SFCL

1차와 2차 전류이다.

변압기형 초전도 한류기의 동작특성을 설명하는 방정식을 식 (1)-(3)에 나타냈다. 변압기형 초전도 한류기에서 1, 2차측의 결합계수 k가 1이라고 가정하였을 때 M_{ps} 는 1, 2차측의 상호인덕턴스로서 M_{ps} 라고 할 수 있다. 이러한 가정을

통하여 다음과 같은 방정식을 구할 수 있다. 식 (1)과 (2)는 변압기형 초전도 한류기의 2차권선에 흐르는 전류와 전체 임피던스를 나타낸 것으로서 초전도체에서 발생하는 저항과 변압기 권선의 인덕턴스에 따라 결정된다는 것을 확인할 수 있다. 변압기형 초전도 한류기는 사고발생시 1차 권선에 흐르는 전력 시스템의 사고전류를 1·2차 권선의 비에 의해 2차 권선에 유도시키고, 이 전류를 초전도 소자가 제한하게 된다. 식 (3)은 사고발생 초기 초전도소자가 켜치되기 이전인 $R_{sc}=0$ 의 조건하에서 변압기의 1차 권선에 흐르는 전류를 나타낸 것으로서, 이 전류는 변압기의 1·2차 권선의 인덕턴스에 의해 결정된다는 것을 확인할 수 있다[5].

$$I_s = \frac{j\omega M_{ps}}{R_{sc} + j\omega L_s} \times I_p \quad (1)$$

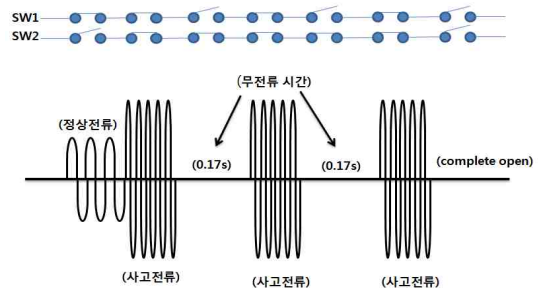
$$Z_o = \frac{j\omega L_p R_{sc}}{R_{sc} + j\omega L_s} \quad (2)$$

$$I_{lim} = \frac{L_s}{M_{ps}} \times I_s \quad (3)$$

2.2 실험 방법 및 결과

전력계통에서는 순간사고와 지속사고를 구분하기 위하여 제페로 동작을 수행하는 전력용 차단기를 사용하고 있다. 전력용 차단기의 대표적인 제페로 동작은 CO - 0.5s - CO - 3min - CO를 사용한다. 이에 본 실험에서는 저용량 초전도 한류기의 제페로 동작 실험을 위해 그림 3과 같이 CO - 0.17s - CO - 0,17s - CO로 설정하였다. 재투입 시간 0.17s는 회복 주기를 10cycle로 했을 때의 시간을 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 사고 발생 장치는 cycle 단위로 설정이 가능하기 때문에 저항형 초전도 한류기와 변압기형 초전도 한류기의 회복특성을 고려하여 비교가 가능한 10cycle을 선택하였다.

그림 4는 턴수비를 4:2로 하였을 때 차단기 제페로 동작에 따른 변압기형 초전도 한류기의 사고전류 제한곡선이다. 세 번의 사고가 발생하였을 때, $V_o=120[V]$ 인 경우 사고전류는 각각 19.3, 16.1, 17.2[A]로 제한하였다. $V_o=200[V]$ 인 경우 제한된 사고전류는 20.7, 14.7, 16.07[A]이었다. 그러나 $V_o=280[V]$ 인 경우 제한된 사고전류가 20.8, 3.2, 3.2[A]이었다. 이러한 이유는 첫 번째 사고 주기에서는 초전도 소자가 켜치 되어 사고



Cycle	-	5	10	5	10	5	-
-------	---	---	----	---	----	---	---

그림 3 제페로 동작 시스템
Fig. 3 Reclosing system

전류를 제한하였다. 초전도 소자가 켄치 된다는 것은 초전도 소자가 저항값을 가지게 되어 전류값을 낮추는 것이다. 하지만 유입된 사고전류가 증가하여 초전도 소자가 받은 전력부담이 크므로 차단기가 open 되었을 때 회복하지 못하고 상전도 상태에서 다시 차단기가 close되기 때문이다.

그림 5는 저항형 초전도 한류기의 사고전류 제한곡선을 나타낸 것이다. $V_0 = 120[V]$ 인 경우 재폐로 동작에 따라 세 번의 사고에 의해 제한된 사고전류는 38.7, 23.2, 29.9[A]이었다. V_0 가 200[V], 280[V]인 경우는 각각 사고전류가 40.8, 5.1, 4.5[A]와 41.75, 5.7, 4.8[A]로 제한하였다. 변압기형 초전도 한류기의 280[V]와 마찬가지로 재폐로 동작에 의해 차단기가 open 되었을 때 켄치된 초전도 소자가 사고전류 제한 동작에서 받은 전력부담이 커서 회복이 되지 않았기 때문이다. 이러한 결과로 알 수 있듯이 같은 전압이라도 변압기형 초전도 한류기가 저항형 초전도 한류기보다 사고전류를 낮게 제한하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 6은 변압기형 초전도 한류기의 회복곡선이다. $V_0 = 120[V]$ 인 경우 회복시간은 31.49, 35.65, 25.96[msec]으로 차단기 open 주기 이내에 회복되는 것을 확인 할 수 있었다. 200[V]인 경우 회복시간은 114.98, 88.56, 87.36[msec]에 회복

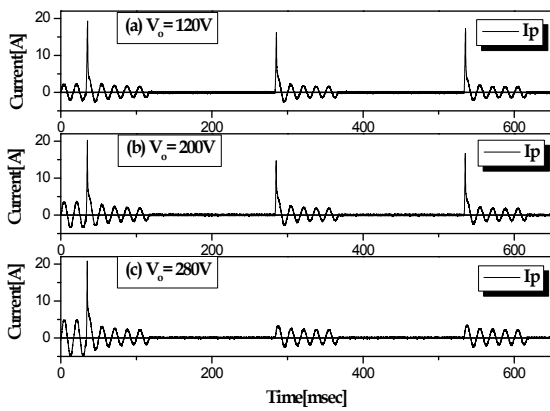


그림 4 변압기형 초전도 한류기의 사고전류제한 곡선
Fig. 4 Limiting fault current waveforms of a transformer-type SFCL according to the increase of applied voltage

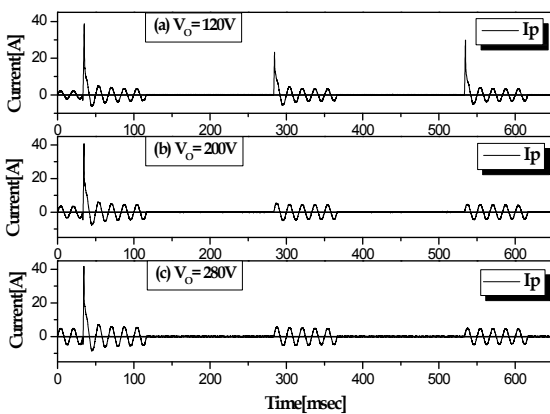


그림 5 저항형 초전도 한류기의 사고전류제한 곡선
Fig. 5 Limiting fault current waveforms of a resistive-type SFCL according to the increase of applied voltage

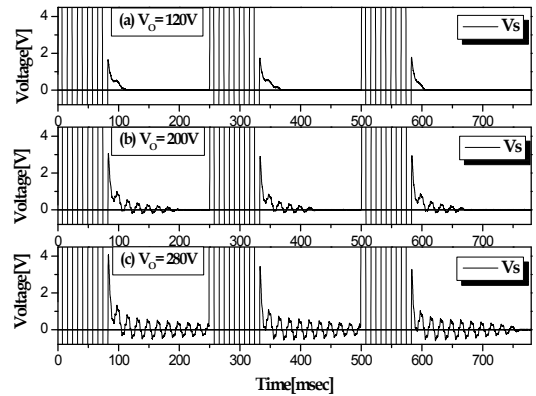


그림 6 변압기형 초전도 한류기의 회복곡선
Fig. 6 Recovery waveforms of a superconducting unit in the transformer-type SFCL according to the increase of applied voltage

되었다. 하지만 $V_0 = 280[V]$ 인 경우는 초전도 소자가 회복되지 못했다. 이것은 초전도 소자가 받은 전력부담이 크기 때문이다.

그림 7은 저항형 초전도 한류기의 회복곡선을 나타내고 있다. $V_0 = 120[V]$ 인 경우 회복시간은 148.89, 112.81, 110.58 [msec]에 초전도 소자가 회복되었다. 그러나 V_0 가 200[V], 280[V]인 경우는 회복되지 못했다. 이것은 변압기형 초전도 한류기의 280[V]와 마찬가지로 open 주기 내에서 초전도 소자가 받은 전력부담이 크기 때문이다. 이러한 실험 결과로 알 수 있듯이 변압기형 초전도 한류기가 저항형 초전도 한류기 보다 빠르게 상전도체에서 초전도체로 회복되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 8은 변압기형 초전도 한류기에 전압을 120V에서 280V까지 인가한 전력파형이다. 그리고 그림 9는 저항형 초전도 한류기의 전력파형이다. 이러한 초전도 소자의 소비전력 곡선에서도 확인 할 수 있듯이 초전도 한류기가 사고전류 제한 동작을 수행하는 동안 초전도 소자가 받은 전력부담이 많을 수록 회복시간이 길어지는 것이다. 변압기형 초전도 한류기에서는 2차 권선을 조절할 수 있기 때문에 초전도 소자의 전력부담을 줄일 수 있다. 또한 초전도 소자가 받은 전력부담은

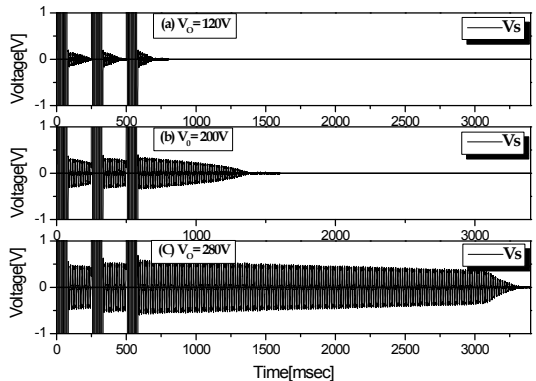


그림 7 저항형 초전도 한류기의 회복곡선
Fig. 7 Recovery waveforms of a superconducting unit in the resistive-type SFCL according to the increase of applied voltage

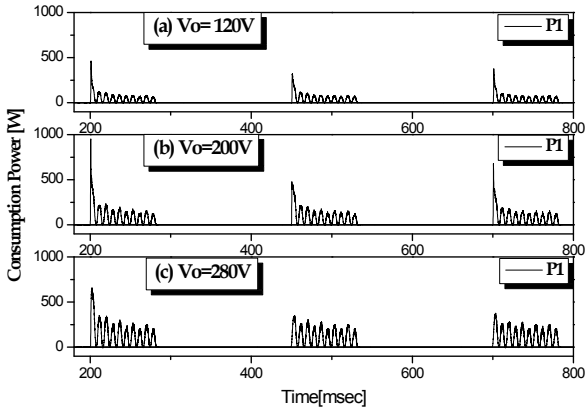


그림 8 변압기형 초전도한류기의 소비전력파형
Fig. 8 Consumption power waveform of a resistive-type SFCL

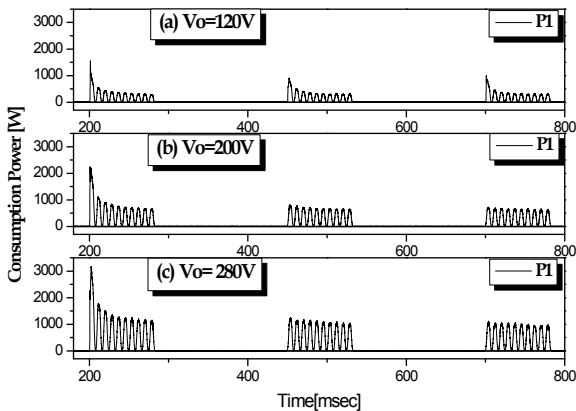


그림 9 저항형 초전도 한류기의 소비전력파형
Fig. 9 Consumption power waveform of a resistive-type SFCL

회복특성과 연관되기 때문에 변압기형 초전도 한류기를 전력계통의 재폐로 동작책무에 따라 동작특성의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 보인다.

3. 결 론

본 논문에서는 전압 증가 시 재폐로 동작에 따른 변압기형 초전도 한류기의 특성을 분석하고, 저항형 초전도 한류기와 비교분석 함으로써 사고전류 제한 특성과 회복특성을 고찰하였다. 전압 증가 시 재폐로 동작에 따른 변압기형 초전도 한류기는 세 번의 사고 주기에서 사고전류 최대값이 낮아지는 것을 확인 할 수 있었고, 초전도체의 회복시간이 길어지는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 저항형 초전도 한류기와 비교하여 변압기형이 사고전류 제한율이 높아지는 것과 회복시간이 짧아지는 차이를 볼 수 있었다. 그리고 초전도체의 소비되는 전력량도 변압기형이 현저하게 적음을 할 수 있다. 이는 인가되는 전압은 같으나 변압기형 초전도 한류기의 제한되는 사고전류 제한율이 저항형 초전도 한류기보다 높기 때문이다. 이처럼 전압 증가 시 재폐로 동작에 따른 변압기형 초전도 한류기는 저항형 초전도 한류기보다 초전도체를 빠르게 회복시키므로 초전도 한류기가 안정적으로 작동하여 사고전류를 낮게 제한할 수 있다.

감사의 글

이 논문 또는 저서는 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-131-D00274)

참 고 문 헌

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통, 고정전류 증대와 대응방안," 전기저널, 1권, 1호, pp. 19, 1998.
- [2] R. K. Smith, P. G. Slade, M. Sarkozi, E. J. Stacey, J. J. Bonk, and M. Mehta, "Solid state distribution current limiter and circuit breaker : application requirements and contral strategies," IEEE Trans. Power Deli, Vol. 8, No. 3, p.1155, 1993.
- [3] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, "차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및특성시물레이션," 전기학회논문지, 48권, 3호, pp. 173,1999.
- [4] Y. S. Cho, H. S. Choi, H. M, Park, S. B. Chung, "Characteristics of Transformer-Type SFCL according to the Connecting Methods of Secondary Coils," KIEE, Vol. 56 No 12,pp. 2078, 2007.
- [5] B. H. Choi, B. S. Han, "3차 권선에 저항을 사용한 변압기형 전류제한기의 동작 특성," Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 21, No. 12, pp. 1111, 2008.

저 자 소 개



최수근 (崔洙根)

1983년 6월 27일생. 2010년 조선대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-Mail : objjang@hanmail.net



최효상 (崔孝祥)

1966년 2월 21일생. 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995~2003년 한전 전력연구원 선임연구원. 2003~현재 조선대학교 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr