

논문 23-2-14

## 변압기형 초전도전류제한기의 히스테리시스 특성 분석

### Analysis on Hysteresis Characteristics of a Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter

임성훈<sup>1,a</sup>  
(Sung-Hun Lim<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

The transformer is expected to be an essential component of a superconducting fault current limiter (SFCL) for both the increase of its voltage ratings and the simultaneous quench due to different critical current between high- $T_C$  superconducting (HTSC) elements comprising the SFCL. However, in order to perform the effective current limiting operation of the SFCL, the design for the SFCL considering the hysteresis characteristics of the iron core is required. In this paper, the influence of the hysteresis characteristics of the iron core comprising the transformer type SFCL on its current limiting characteristics was investigated. Through the comparative analysis on the hysteresis curves due to the ratio of the turn number between the 1st and the 2nd windings of the transformer, the proper design condition for the ratio of the turn number to achieve the effective current limiting operation of the transformer type SFCL could be obtained.

**Key Words** : Superconducting fault current limiter (SFCL), Current limiting operation, Hysteresis characteristics, Transformer type SFCL

#### 1. 서론

지속적으로 증가되고 있는 전력요구와 전력공급으로 인한 전력계통의 용량증가로 기존의 차단기의 용량증가와 성능향상을 위해 발생하는 비용부담을 비롯한 기술적인 한계를 극복하기 위한 방안으로 초전도 전류제한기가 갖는 장점을 활용, 실제 적용을 위한 노력이 진행되고 있다[1-5].

현재까지 다양한 형태의 초전도전류제한기가 개발되었으며, 구조적인 측면, 용량증대 측면에서 각각의 장단점이 있다. 그 중에서 저항형은 구조 및 원리가 간단하고 소형화에 유리하며 특히, 박막을 이용할 경우 용량증대 시 적층구조를 통한 밀집화

로 소형화가 가능하다는 장점을 가지고 있으나, 한류용량 증대를 위한 소자들의 직병렬 연결 시 소자들의 상이한 임계전류로 인해 동시퀀치 유도방안이 해결되어야 할 기술로 남아 있다[6-8]. 이를 해결하기 위한 방안으로, 하나의 철심코어를 매개로 다수의 2차측에 초전도소자를 연결하여 2차코일에 유기되는 공유자속에 의해 동시퀀치를 유도하는 방안이 제안된 바 있다[8,9]. 제안된 방법은 개별소자에 연결된 1, 2차 권선의 권선비를 조절함으로써 고장 시 발생하는 초전도소자의 저항크기뿐 아니라 개별소자의 전력부담을 조절할 수 있는 장점이 있는 반면에, 고장발생시 철심의 포화가 발생할 경우 고장전류제한 효과가 감소되는 현상이 발생하게 되어 이에 대한 분석과 철심포화저감을 위한 설계가 요구되고 있다.

본 논문에서는 변압기를 이용한 초전도 전류제한기의 고장시 철심의 히스테리시스 특성을 분석함으로써 변압기형 초전도 전류제한기를 이용하여 고장전류를 저감할 경우 전류제한 동작이 철심코어의

1. 숭실대학교 전기공학부

(서울시 동작구 상도5동 1-1)

a. Corresponding Author : superish73@ssu.ac.kr

접수일자 : 2009. 11. 25

1차 심사 : 2010. 1. 5

심사완료 : 2010. 1. 22

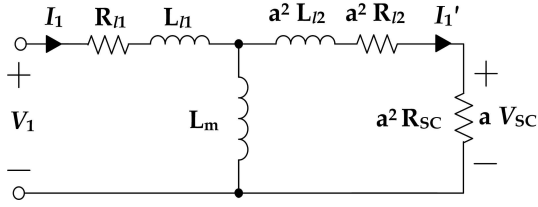


그림 1. 변압기형 초전도전류제한기의 등가회로.  
Fig. 1. Equivalent circuit of a transformer type SFCL.

비포화영역에서 동작되도록 설계하기 위한 조건을 분석하였으며, 이를 위해 변압기의 2차측에 연결된 초전도 소자의 1, 2차 권선비에 따른 고장발생 시 발생하는 소자의 저항크기와 전력손실을 비교하였다.

## 2. 구조 및 동작원리

변압기형 초전도전류제한기의 구조와 동작원리는 차폐유도형 초전도전류제한기와 유사하며, 본 논문에서는 1차, 2차 권선은 일반구리권선으로 구성하였으며 2차 권선에는 초전도소자를 연결하여 단락회로로 구성하였다. 변압기형 초전도전류제한기의 동작원리는 고장전과 고장후로 나누어 기술할 수 있다. 먼저, 고장발생전에는 1차권선에서 발생한 자속이 2차권선에서 발생한 자속에 의해 상쇄된다. 따라서, 철심내부에는 자속이 존재하지 않게 되어 1, 2차 권선은 단락된 회로로 나타나게 된다. 만약, 고장이 발생하게 되어 2차 권선에 흐르는 전류가 초전도소자의 임계전류를 넘게 되면 쿨리지발생에 의한 저항발생으로 철심내부의 자속은 상쇄되지 않게 되고 이로 인해 1, 2차 권선에 전압이 유기됨으로써 고장전류가 제한되게 된다.

변압기형 초전도전류제한기의 등가회로는 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 그림에서  $R_1, R_2$ 는 1, 2차 권선의 동선저항을,  $L_m, L_1, L_2$ 은 자화인덕턴스 및 각 코일의 누설인덕턴스를 나타낸다.

등가회로에서 볼 수 있는 것처럼 고장발생 시 초전도소자로 흐르던 전류가 고장발생과 함께 초전도소자의 저항발생으로 고장전류 크기가 감소할 경우 고장전류의 일부가 자화인덕턴스로 흐르게 되며, 보다 큰 전류가 유입될 경우 철심의 포화를 야기시킬 수 있게 된다. 따라서, 변압기설계가 적절하지 못할 경우 효과적인 고장전류제한이 이루어지지 않게 될 것을 예상할 수 있다. 이를 고찰하기

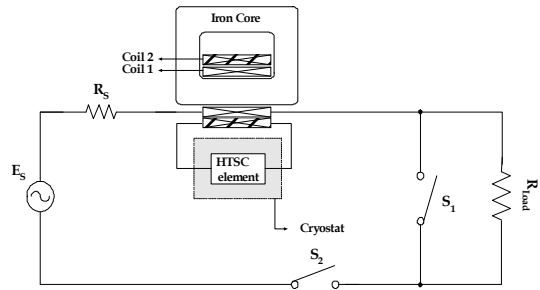


그림 2. 변압기형 초전도전류제한기의 실험회로도.  
Fig. 2. Experimental circuit of a transformer type SFCL.

표 1. 변압기형 초전도전류제한기의 구성요소 사양.

Table 1. Specification of components comprising a transformer type SFCL.

구성요소	파라미터	값	단위
전원	전원저항	$R_s$	1 $\Omega$
부하	부하저항	$R_{Load}$	10.3 $\Omega$
변압기형 초전도 전류제한기	1, 2차 코일의 권선비	a	0.67
		a	1
	초전도소자임계전류	$I_c$	18 A

위해 고장시 1, 2차 권선의 턴수에 따른 초전도 소자에서 유기되는 저항발생과 고장전류제한을 포함한 철심의 히스테리시스 특성을 분석하였다.

## 3. 실험장치 구성 및 실험방법

변압기형 초전도전류제한기의 고장발생 시 히스테리시스특성을 분석하기 위한 실험회로구성을 그림 2에 나타내었으며, 구성요소들의 대략적인 사양을 표 1에 나타내었다. 단락사고를 모의하기 위해  $S_2$ 을 투입한 후  $S_1$ 을 주어진 고장주기동안 투입하여 단락을 모의하였으며, 고장시 1, 2차 권선에 흐르는 전압과 유기전류, 초전도 소자에 흐르는 전류와 전압을 CT, PT를 통해 측정하여 분석하였다.

## 4. 결과 및 고찰

그림 3은 고장발생직후 1차 권선과 2차 권선의 권선비가 1인 경우, 1, 2차 권선 및 자화가지에 흐르는

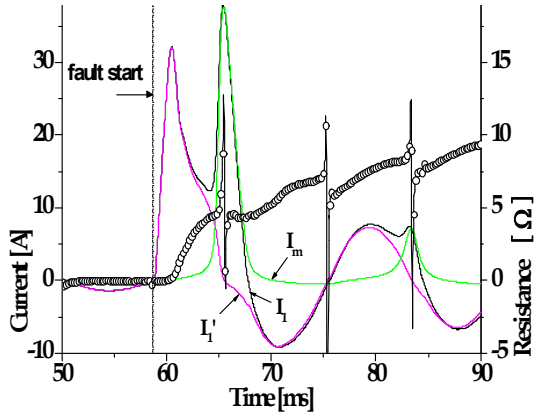


그림 3. 변압기형 초전도 전류제한기의 1, 2차 권선 및 자화까지 전류파형.

Fig. 3. Waveforms of 1st, 2nd side winding and magnetization currents of a transformer type SFCL.

전류파형을 보여준다. 고장직후 1, 2차 권선에 흐르는 전류크기가 동일한 크기로 급격히 증가되지만 초전도 소자의 저항발생에 의해 2차 권선에 흐르는 전류는 감소된다. 그러나, 2차 권선에 흐르던 전류가 감소된 만큼 자화까지에 흐르는 전류는 증가하게 되며 이로 인해 1차 권선에 흐르는 전류는 다시 자화전류 크기만큼 증가하게 되는 것을 확인할 수 있다. 이후 고장이 지속됨에 따라 초전도 소자의 저항증가에 의해 고장전류 크기가 보다 감소되어 1, 2차 권선의 전류와 자화전류가 점차 감소되는 것을 관찰할 수 있다.

1, 2차 권선비에 따른 고장발생시 초전도 소자의 저항변화와 고장전류제한 제한효과를 분석하였으며, 그림 4에 권선비를 0.67과 1.5로 설정하여 얻은 결과파형을 도시하였다. 그림 4에서 관찰할 수 있는 바와 같이, 고장시 초전도 소자의 저항크기와 자화인덕턴스에 흐르는 전류의 크기는 권선비가 증가함에 따라 감소되는 것을 비교할 수 있다. 권선비가 작은 0.67인 경우에는 초전도소자의 저항은 크게 증가하지만 고장이 진행됨에 따라 자화전류의 증가가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 1, 2차 권선비의 감소에 따라 변압기형 전류제한기의 제한 임피던스 또한 감소하게 되어 고장전류의 제한이 충분히 이루어지지 않게 된 것에 기인된 것으로 분석할 수 있다.

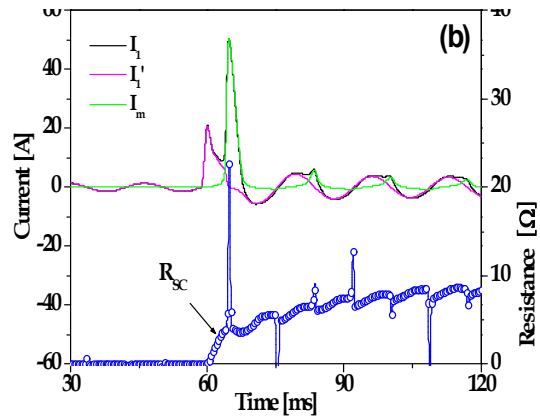
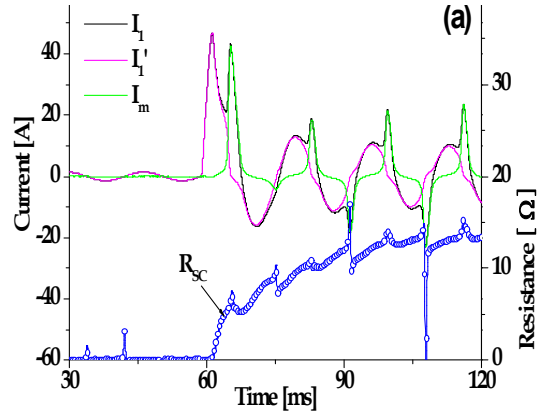


그림 4. 변압기형 초전도 전류제한기의 1, 2차권선 및 자화까지 전류파형. (a) a = 0.67. (b) a = 1.5.

Fig. 4. Waveforms of 1st, 2nd side winding and magnetization currents of a transformer type SFCL. (a) a = 0.67. (b) a = 1.5.

권선비에 따른 소자에서 발생하는 전력손실을 비교한 그림 5에서는 권선비가 증가할수록 소자에서 발생하는 전력손실이 더욱 감소되는 것을 볼 수 있으며 그림 4에서 본 바와 같이 권선비 증가에 따라 초전도소자에서 발생하는 저항이 감소됨과 동시에 제한기임피던스가 증가되어 1, 2차 권선에 흐르는 전류가 감소된 것에 기인한 것으로 분석할 수 있다. 위 결과부터 변압기형 초전도전류제한기를 설계시 효과적인 권선비는 고장전류제한 효과와 초전도소자에서 발생하는 전력손실측면에서 2차 권선수를 작게 설계하는 것이 바람직함을 실험결과분석을 통해 확인할 수 있다.

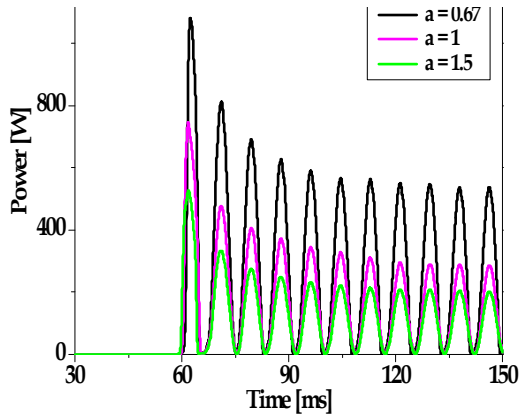


그림 5. 변압기형 초전도 전류제한기의 1, 2차 권선의 권선비에 따른 초전도 소자의 전력 손실.

Fig. 5. Powerloss of HTSC element due to the ratio of the turns number of 1st and 2nd windings in a transformer type SFCL.

그림 6은 권선비가 0.67, 1.5인 경우 변압기형 초전도 전류제한기를 구성하는 철심의 히스테리시스 곡선을 보여준다. 권선비가 작은 경우(그림 6(a))에는 고장기간동안 히스테리시스 영역이 포화영역에서 동작하게 되지만 권선비가 큰 경우(그림 6(b))에는 고장직후에 포화영역으로 이동했던 히스테리시스 곡선이 비포화영역으로 동작영역이 이동하는 것을 비교할 수 있다. 위의 결과로부터 변압기형 초전도 전류제한기의 권선비를 크게 설계할수록 고장전류 제한효과뿐 아니라 철심의 포화억제에도 효과적인 것을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 변압기형 초전도전류제한기의 고장발생시 1, 2차 권선의 권선비에 따른 초전도 소자의 저항크기와 전력손실을 비교분석하였다. 또한, 철심의 히스테리시스 특성을 분석함으로써 변압기형 초전도전류제한기의 고장전류 제한동작이 철심의 비포화영역에서 동작되기 위한 권선비조건을 분석할 수 있었다. 분석을 통해 변압기형 초전도 전류제한기의 권선비를 크게 설계할수록 고장전류 제한효과뿐 아니라 철심의 포화억제에 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

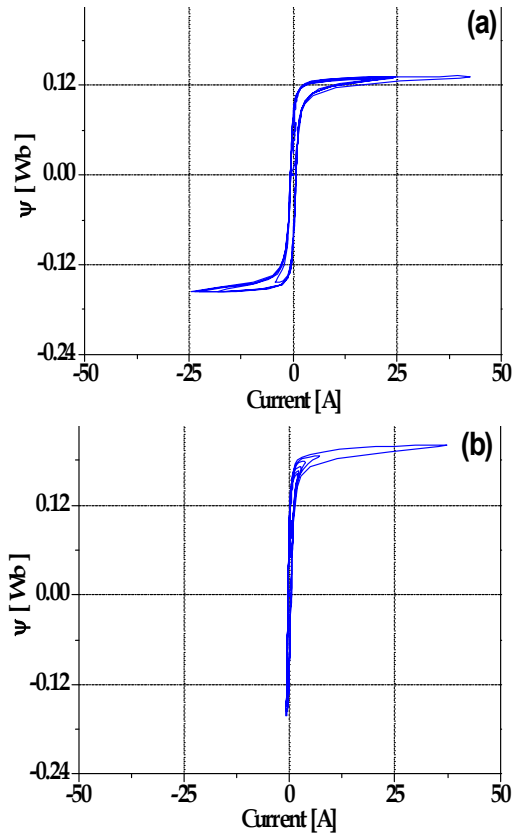


그림 6. 변압기형 초전도 전류제한기의 1, 2차 권선의 권선비에 따른 히스테리시스곡선.

Fig. 6. Hysteresis curve due to the ratio of the turns number of 1st and 2nd windings in a transformer type SFCL.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

[1] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, T. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, "Toward the superconducting fault current limiter", IEEE Trans. On Power Del., Vol. 6, No. 2, p. 801, 1991.

- [2] W. Paul and M. Chen, "Superconducting control for surge currents", IEEE Spectrum, Vol. 35, p. 49, 1998.
- [3] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Krämer, P. Kummeth, and H.-W. Neumüller, "Resistive current limiters with YBCO films", IEEE Trans. Appl. Superconduct., Vol. 7, p. 828, 1997.
- [4] B. W. Lee, K. B. Park, J. Sim, I. S. Oh, H. G. Lee, H. R. Kim, and O. B. Hyun, "Design and experiments of novel hybrid type superconducting fault current limiters", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18, p. 624, 2008.
- [5] O. B. Hyun, K. B. Park, J. Sim, H. R. Kim, S. W. Yim, and I. S. Oh, "Introduction of a hybrid SFCL in KEPCO grid and local points at issue", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, p. 1946, 2009.
- [6] O.-B. Hyun, S.-D. Cha, H.-R. Kim, H.-S. Choi, and S.-D. Hwang, "Shunt-assisted simultaneous quenches in series-connected resistive SFCL components", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, p. 2060, 2003.
- [7] K.-B. Park, J.-S. Kang, B.-W. Lee, I.-S. Oh, H.-S. Choi, H.-R. Kim, and O.-B. Hyun, "Quench behavior of YBaCuO films for fault current limiters under magnetic field", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, p. 2092, 2003.
- [8] S.-H. Lim, Y.-S. Cho, H.-S. Choi, and B.-S. Han, "Improvement of current limiting capability of HTSC elements in hybrid type SFCL", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, p. 1807, 2007.
- [9] S. H. Lim, "Comparative study of current limiting characteristics for hybrid type and flux-lock type SFCLs", Trans. Electr. Electron. Mater., Vol. 8, No. 5, p. 222, 2007.