

3차 권선을 이용한 자속구속형 사고전류제한기의 특성

조용선*, 박형민*, 박충렬**, 임성훈***, 최효상*

조선대학교 전기공학과*, 전북대학교 전자전보공학과**, 전북대학교 공업기술연구소***

Characteristics of Flux-Lock Type Superconducting Fault Current Limiter Using Third Winding

Yong-Sun Cho*, Hyoung-Min Park*, Chung-Ryul Park**, Sung-Hun Lim***, Hyo-Sang Choi*
Chosun Uni*, Chonbuk Uni**, Research Center of Industrial Technology Engineering Research Institute***

Abstract - In this paper, we analyzed that characteristics of flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) using the third winding to fault current limiting. The flux-lock type SFCL using the third winding consists of the first and second windings which are wound in parallel each other a iron core. Also it connected inductively the third winding connected resistance of series. Because of the hysteresis according to the increased voltage, the distortion of current in the flux-lock type SFCL occurs. It is a disadvantage to increase the capacity of SFCL.

We conformed that the third winding of the flux-lock type SFCL prevented the distortion of current. Also, the third winding did not affect the initial fault current of the flux-lock type SFCL.

1. 서 론

현재 국내의 전력계통은 부하용량의 지속적인 증가로 인해 계통의 사고 발생시 고장 전류가 급격히 증가하고 있는 실정이다[1]. 이러한 고장전류는 기존의 보호 장치로는 제어하기가 어렵다. 이러한 문제점에 대한 대응책으로 현재 국내에서는 전력망의 모선분리, 차단기 교체, 고 임피던스기기 설치, 직렬 리액터 설치, 파워 퓨즈 사용 등 다양한 방안을 사용하고 있으나, 그 방법에 따라 경제적, 계통의 안정도 등 또 다른 문제점이 발생하고 있다. 이러한 전력계통의 또 다른 대응 방안으로 국내·외에서는 초전도 현상을 이용한 사고 전류 제한기에 초점을 두고 있다. 초전도 특성은 0저항 효과, 마이스너 효과, 조셉슨 효과가 있는데 우리가 연구 중인 자속구속형 사고 전류제한기는 그 특성 중 0저항 효과를 이용하였다. 0저항 효과란, 초전도 상태에 있는 물질은 그 상태에서 임피던스가 0을 나타내다가 어떠한 이유로 초전도 상태가 깨져 상전도 상태로 상전이를 발생하게 되면 임피던스가 급격히 증가하게 되는 현상이다. 이러한 특성을 사고 전류제한기에 이용하여 평상시에는 계통에 아무런 영향을 주지 않다가, 사고 발생시 큰 임피던스를 발생시켜 사고 전류를 크게 제한해 주는 역할을 하게 된다[2-4].

자속구속형 사고전류제한기는 강자성 철심을 이용한 형태이다. 그에 따라 전압의 증가시 전류 파형에 왜곡이 발생을 한다. 이러한 왜곡은 용량 증대시 큰 문제점으로 지적되기에 이에 따른 대응 방안을 모색하게 되었다. 그 방안으로 본 논문에서는 3차 권선을 이용하여 권선수의 증가시 전류 파형에 어떠한 영향을 주는지를 비교·분석하였다[5,6].

2. 본 론

2.1 자속구속형 전류제한기의 동작 특성

2.1.1 구조 및 동작원리

그림 1은 3차 권선을 이용한 자속구속형 사고전류제한기의 구조를 나타낸다. 강자성체 철심을 이용하여 1차 권선과 2차 권선을 병렬로 연결하였고, 2차 권선에 직렬로 초전도 소자를 연결하였다. 그리고 3차 권선은 철심을 이용하여 유도적으로 연결하였다.

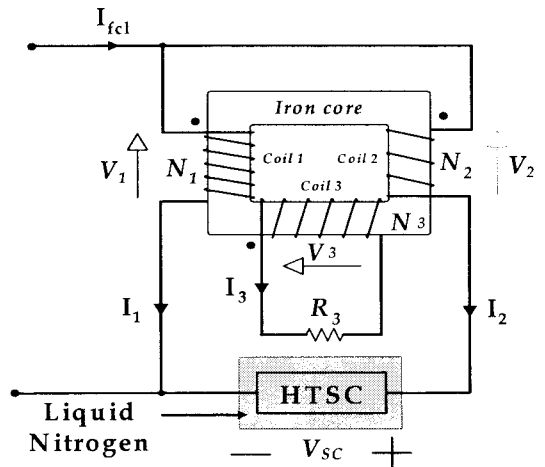


그림 1. 3차 권선을 이용한 자속구속형 사고전류 제한기의 구조

초전도 소자는 특성상 초전도 상태를 유지해야 하므로 77K의 액체질소 안에 저온장치를 이용하여 담겨두었다. 자속구속형은 2차 권선의 자속 방향에 따라 감극결선과 가극결선으로 분류할 수 있다. 3차 권선을 이용한 이번 실험에서는 감극 결선의 경우만을 분석하였다. 코일 1, 코일 2에서 발생하는 전압은 다음의 식 (1), (2)과 같다.

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \tag{1}$$

$$V_2 = \pm N_2 \frac{d\phi}{dt} \tag{2}$$

$$(N_1 \pm N_2) \frac{d\phi}{dt} = 0 \tag{3}$$

사고 발생 전 고온 초전도 소자의 양단전압은 0이므로 코일 1의 전압과 코일 2의 양단전압은 같게 되어 다음 식과 같이 된다.

식 (3)에서 $N_1 \pm N_2 \neq 0$ 이 아니기 때문에 $d\phi/dt=0$ 이 성립하게 된다. 이 식으로 인해 사고 전에는 쇠교 자속에 시간적인 변화가 없어 자속이 구속되어 있는 것처럼 보여 자속구속형이라 한다. 이렇게 자속의 시간적인 변화가 없어 코일 1과 코일 2의 양단에는 전압이 유기되지 않고, 또한 코일 3에도 전압이 유기되지 않는다. 사고가 발생하여 초전도 소자에 임계 전류값을 넘는 전류가 흐르게 되면 더 이상 초전도 상태를 유지하지 못하고 상전도 상태로 상전이를 하게 된다. 이때 초전도 소자의 0저항 특성이 깨져 급격한 저항이 발생하게 된다. 그러므로 쇠교 자속에 시간적인 변화가 생겨 코일 1,2의 양단에는 전압이 발생하게 되고 초전도 소자의 급격히 발생한 저항에 의해 사고 전류는 어느 값 이하로 제한되게 된다. 또한 코일 3에도 전압이 발생하게 된다. 자속 구속형 사고 전류 제한기에서는 정격 전압의 증가 시 전류의 왜곡이 발생하게 된다. 이것은 철심의 자속이 포화되기 때문이다. 이렇게 포화된 자속을 코일 3에 직렬로 연결된 R_3 에 의해 소비되어 사고 발생 시 생기는 철심 포화 현상을 완화시킬 수 있었다.

2.1.2 실험 방법 및 구성

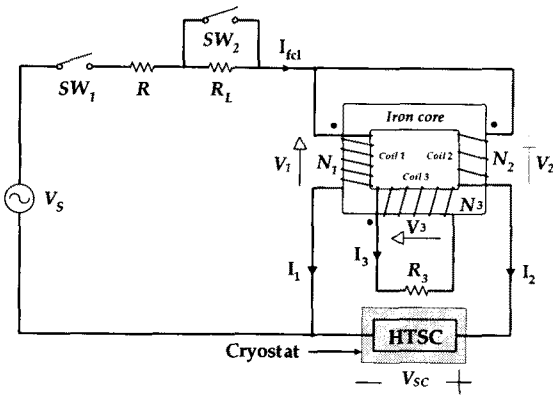


그림 2. 실험 회로도

3차 권선을 이용한 자속구속형 사고전류제한기의 실험 구조는 그림 2와 같은 실험 회로도를 구성하여 실험하였다. 결선 방향은 1,2,3차 권선을 감극결선으로 결선하였고, 선로 전류와 소자 전압의 식은 다음과 같다.

$$I_{fcl} = I_1 + I_{sc} \quad (4)$$

$$V_1 = V_{sc} - V_2 \quad (5)$$

V_0 는 인가전압으로서 $80 V_{rms}$ 를 인가하였다. R_0 는 선로의 전류를 측정하기 위한 표준저항으로서 1Ω 으로 하였고, R_L 은 50Ω 의 부하저항이다. SW_1 과 SW_2 는 각각 전원을 인가하기 위한 스위치와 임의로 단락사고를 발생시키기 위한 스위치이다. R_3 는 3차 권선에 직렬로 연결된 10Ω 의 무유도 저항이다. N_1 과 N_2 는 각각 63번과 21번으로 감았고, N_3 는 21번, 42번, 63번으로 나누어 각각의 사고 전류제한 특성을 비교 분석하였다. 초전도 소자로는 박막형의 $YBa_2Cu_3O_7$ 를 사용하였다. 표 1은 초전도 소자의 재원을 나타낸다.

표 1. 초전도 소자(YBCO)의 재원

임계 전류	18 A
임계 온도	87 K
스트립 길이	420 mm
직 경	2 inch

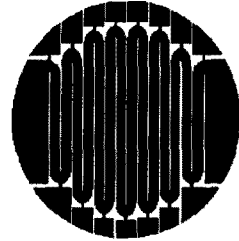


그림 3. meander-line type의 초전도 소자

2.2 실험 결과 및 분석

그림 3은 인가전압을 $80 V_{rms}$ 로 하고 1차 권선과 2차 권선을 각각 63번과 21번을 감은 후의 사고전류 제한 특성을 분석한 것이다.

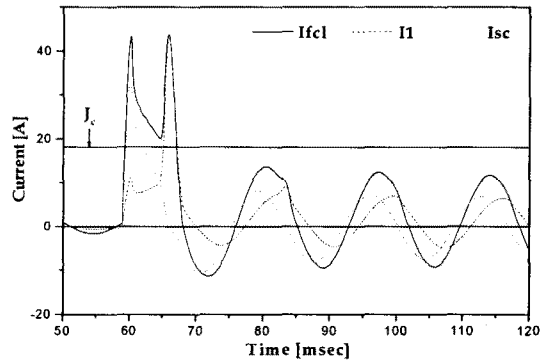


그림 4. 2차권선 사용시 전원 전압 $80 V_{rms}$ 에서의 사고 전류제한 특성

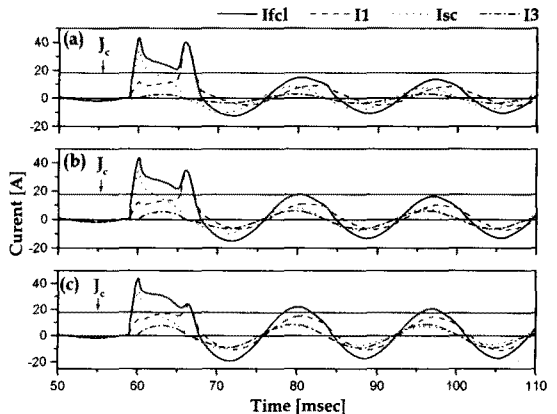


그림 5. 전원 전압 $80 V_{rms}$ 시 3차 권선의 권선수에 따른 사고 전류제한 특성
(a) 21번 (b) 42번 (c) 63번

이 그래프를 보면 사고초기에 선로 전류가 왜곡되는 것을 볼 수 있으며, 그 크기는 43 A로 제한된 사고전류의 크기와 같은 것을 볼 수가 있다. 초전도 한류기의 용량 증대시 왜곡 전류의 크기는 더욱 커질 것으로 예상된다.

그림 4는 인가전압을 80 V_{rms}로 하고 3차 권선을 21, 42, 63턴 감아 실험을 한 결과파형이다. 3차 권선의 턴수 증대 시 제한되는 선로전류의 크기에는 변화가 없으나, 그 이후에 왜곡되는 전류의 크기는 점점 감소하는 것을 볼 수가 있다. 3차 권선이 21턴 일때는 40.42 A, 42턴 일때는 35 A, 63턴 일때는 24.6 A로 크게 감소하였다. 사고 발생 후 3차 권선의 수가 증가하면서 I₁과 I₃가 증가하는 것을 볼 수가 있다. 선로전류 I_{fd}의 왜곡현상은 I₁의 전류에 의한 것인데, 그것은 철심의 자속이 포화되어 발생하는 것이다. 그러므로 왜곡현상을 줄이기 위해서는 3차 권선을 이용하여 철심의 자속을 감소시켜야 한다. I₃의 증가로 I₁이 증가하여 전류의 왜곡현상이 줄어드는 것을 그림 4와 식 (4)를 통하여 확인할 수 있었다.

그림 4에서 사고 전류가 제한된 이후의 사고전류를 비교해 보면 21턴과 42턴은 임계전류(J_c- 18 A)값 이하로 제한이 되지만, 63턴의 경우는 22 A로 J_c보다 더 큰 값을 나타내었다. 이것은 초전도 소자가 켜지되어 상전도 상태로 전이된 후 다시 초전도 상태로 전이되어야 하는데, 이러한 전이가 발생하지 않고 계속 상전도 상태가 지속된다는 것을 보여준다. 이러한 현상은 선로전류가 3차 권선의 권선수의 영향을 받아 제한기의 임피던스가 줄어들므로 증가되는 현상이라고 해석할 수가 있다.

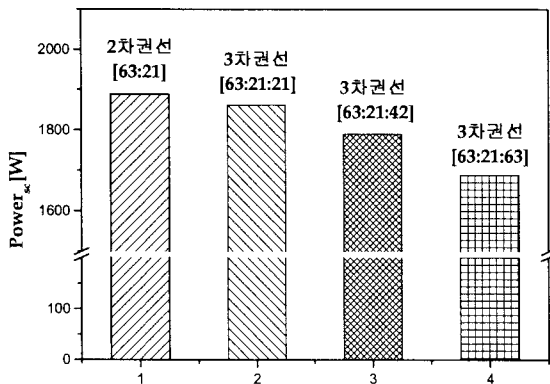


그림 6. 2차 권선과 3차 권선의 소비 전력 비교

그림 5는 초전도 소자에서 발생하는 소비전력을 비교한 그래프이다. 그림을 통하여 알 수 있듯이 2차 권선보다 3차 권선의 초전도 소자에서 발생하는 소비전력이 더 적고, 또한 3차 권선은 권선수가 증가할수록 더 적어진다는 것을 확인할 수 있었다. 초전도 소자에서 발생하는 소비전력이 줄어든다는 것은 초전도 소자의 보호측면과 용량 증대 측면에서 중요한 요소라 할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 3차 권선을 이용하여 자속구속형 초전도 사고전류 제한기의 특성을 분석하였다. 사고 전류의 왜곡 현상을 2차 권선과 비교하였을 때 왜곡현상이 줄어드는 것을 확인하였고, 또한 3차 권선의 권선수를 증가시켰을 때 왜곡 현상이 현저히 줄어드는 것을 증명하였다. 전류의 왜곡 현상은 철심의 포화현상이 주 요인인데, 3차 권선이 철심의 포화를 완화시켜 줌으로서 사고 전

류의 왜곡현상을 줄여주는 것을 확인하였다. 그리고 초전도 소자에서 발생하는 소비전력을 2차 권선과 3차 권선에 따라 비교하였는데 소비 전력이 점차 줄어드는 것을 확인하였다. 그에반해 3차 권선수의 증가로 인해 사고 전류제한기의 임피던스 감소로 선로전류가 임계전류값 이하로 제한되지 않는 현상을 보았다. 이러한 문제점으로 3차 권선 설계시 제한기의 전체 임피던스를 고려하여 제작해야 할 것이다.

초전도 사고전류 제한기는 용량 증대면에 큰 어려움을 겪고 있는데 이 문제의 해결 방안으로 3차 권선의 사용은 하나의 해결 방안으로 모색될 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김준환, 이강완, " 전력계통, 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, p. 19-31, 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 control strategies", IEEE Trans. on Power Del., Vol. 8, No. 3, PP. 1155-1164, July, 1993.
- [3] Willi Paul and Makan Chen, "superconducting control for surge currents", IEEE Spectrum, Vol. 35, No. 5, pp.49-54, May, 1998
- [4] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, "차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션", 전기학회논문지, Vol. 48C, No. 3, pp.173-178, 1999
- [5] Sung-Ihun Lim, Hyo-Sang Choi, Byoung-Sung Han, "The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high-Tc superconducting fault current limiter using series resonance", Cryogenics, Vol. 44, pp. 249-254, Nov., 2004.
- [6] T. Matsumura, T. Uchii, Y. Yokomizu, "Development of flux-lock type fault current limiter with high-Tc superconducting element", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, No. 2, PP. 1001-1004, Jun. 1997.