

자속구속형 초전도 전류제한기의 용량증대를 위한 동작특성

남궁현, 최효상, 박형민, 조용선, 이나영, 한태희  
 조선대학교 전기공학과

Operating Characteristics of Capacity Increase in a Flux-Lock Type Superconducting Fault Current Limiter

Gueng-Hyun Nam, Hyo-Sang Choi, Hyoung-Min Park, Yong-Sun Cho, Na-Young Lee, Tae-Hee Han  
 Chosun Uni.

**Abstract** - We investigated the operating characteristics of a flux-lock type superconducting fault current limiters according to the number of the serial connection each the superconducting element at the additive polarity winding of a transformer. This SFCL consists of two coils wound in parallel on the same iron core, and the secondary coil is connected to the elements in series. Operating characteristics can be controlled by adjusting the inductances and the winding directions of the coils. It turns ratio between the primary and the secondary coils is 63:21. The analysis of voltage, current, and resistance in serial connection each element was performed to increase the applied voltage of flux-lock type SFCL. When the applied voltage was  $200/\sqrt{3}$  [V<sub>rms</sub>] with three elements connected in series, the peak value of the line current increased up to 26,24[A]. On the other hands, resistive SFCL increased up to 36.35[A], under the same conditions. This enabled the flux-lock type SFCL to be easy to increase the capacity of power system.

1. 서 론

전력계통내에서 초전도 전류제한기는 퀀치(초전도체에 임계전류이상의 전류가 흘러 상전도체로 전이되는 현상)에 의해 발생하는 전류제한소자의 임피던스를 이용하여 전체 선로전류를 감소시키는 역할을 담당한다. 이는 계통내에 단락사고와 같은 예상치 못한 사고를 수 msec이내에 감지하여 선로로 흐르는 고장전류를 신속하게 억제하여 고가의 전력설비들을 보호하며, 사고 종료 후에도 별도의 장치없이 자동복귀동작이 가능하다[1].

기존의 고장전류 저감대책은 인접계통에 과부하 및 안정성 저하와 같은 부작용을 유발시키나, 초전도를 이용한 전류제한기는 정상동작시 초전도체 고유의 영저항특성에 의해 전력손실이 없으며, 선로에 미치는 영향력이 적어 고품질 전력전송이 가능함으로써 타 방안에 비하여 효율성 및 안정적인 측면에서 우수한 특성을 가지고 있다[2]-[4].

고온 초전도 한류기에 대한 연구는 저항형과 유도형, 브리지형 등으로 분류할 수 있다. 이중 저항형은 한류작용이 저항에 의해서 이루어지며, 위상차에 의한 파형변화가 없으므로 선로에 영향력이 적다. 저항형 중 박막형을 이용한 단위 한류소자는 제조공정상 불균일한 특성으로 각각의 퀀치특성에서 균일하지 못하다. 박막형 한류소자는 허용 전압과 전류가 한정되어 있어 전력계통내에 적용하기 위해서는 다수개의 한류소자를 연결하여 사용

해야 한다. 하지만, 자속구속형 전류제한기는 결선방향과 인덕턴스 조절 등의 구조적인 장점으로 인해 한류소자의 부담이 적어짐에 따라, 기존의 저항형 전류제한기보다 사고시 동작특성이 보다 용이하였다. 또한 사고 후 초기 선로전류를 제한하는 동작특성이 가극결선을 한 경우가 감극결선에 비하여 작게 나타나기 때문에 용량증대측면에서 실험조건을 가극결선으로 하였다.

본 논문에서는 자속구속형 전류제한기의 한류소자증대를 분석하기 위해 저항형 전류제한기를 비교·실험하여, 용량증대를 위한 동작특성을 파악하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 구성

실험에 사용된 한류소자는 meander-line 형태로 식각된, 2인치 YBCO박막이며, 용량증대 실험을 위해 소자수를 3개로 직렬연결하여 분석하였다. 그림 1은 모의실험을 위해 구성한 실험회로도이다. 여기서  $V_0$ 는 전원전압인  $200/\sqrt{3}$  [V]/60 [Hz], 전체전류 측정용을 위한 표준저항  $R_0$ 은 1 [Ω], 부하저항  $R_L$ 은 50 [Ω]을 각각 나타낸다. SW<sub>1</sub>을 닫아 전원전압을 회로에 인가하고 SW<sub>2</sub>를 닫아 단락사고를 모의하여 실험을 수행하였다. 용량증대를 위한 한류소자의 임계전류는 중요하므로, 개별 임계전류를 표 1에 나타내었다[5]-[6].

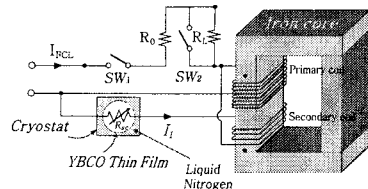


그림 1. 자속구속형 한류기의 실험회로도 구조.

표 1. 개별 한류소자의 임계전류.

Parameter	SFCL A	SFCL B	SFCL C
Critical current values	22.5	24.4	24.6

2.2 구조 및 동작원리

초전도 한류기를 개발하는데 있어서 한류기의 용량증대에 관한 연구는 적용전압 확대방안을 위해 필수적이다.

따라서 자속구속형 한류기와 저항형 한류기의 한류소자를 3개를 직렬연결하여 비교 분석하였다.

본 논문에서는 자속구속형 한류기를 1차측과 2차측의 결선방향을 가극으로 결선하여 실험하였다. 가극결선시의 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_1 = V_2 + V_{SC} \quad (1)$$

$$I_{FCL} = -I_1 + I_{SC} \quad (2)$$

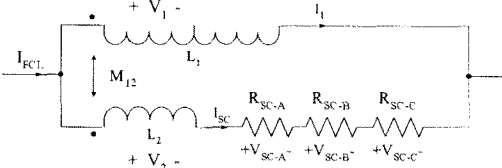


그림 2. 자속구속형 한류기의 등가회로도.

그림 2는 용량증대를 위해 한류소자를 직렬연결한 등가회로도 나타낸다.  $I_{fel}$ 은 사고전류이며,  $I_1$ 은 변압기의 1차측 권선에 흐르는 전류,  $I_{sc}$ 은 2차측 권선에 직렬로 연결된 한류소자에 흐르는 전류이다.  $L_1$ 과  $L_2$ 는 리액터의 1,2차측 권선의 인덕턴스를 나타낸다.  $M_{12}$ 는 1,2차측의 상호 인덕턴스로서,  $M_{12} = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$ 을 나타낸다. 변압기 1, 2차측의 권선에서 누설인덕턴스는 무시되며, 상호 인덕턴스만이 존재하며 초전도 소자에서 발생하는 각각의 저항을  $R_s$ 로 표현하기로 가정하여, 그림 2의 등가회로도로부터 직렬 연결한 한류소자 3개에 관한 자속구속형 한류기의 관계식을 유도하였다.

$$V_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{12} I_{SC} \quad (3)$$

$$V_2 = j\omega M_{12} I_1 + (j\omega L_2 + 3R_{SC}) \cdot I_{SC} \quad (4)$$

식 (3),(4)로부터 자속구속형 한류기의 임피던스와 전류에 관한 식을 전개할 수 있다.

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_1 (3R_s)}{j\omega L^2 + 3R_s} \quad (5)$$

$$\frac{I_{SC}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega (L_1 + \sqrt{L_1 L_2})}{j\omega L^2 + 3R_s} \quad (6)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega \sqrt{L_1 L_2} + j\omega L_2 + 3R_s}{j\omega L^2 + 3R_s} \quad (7)$$

위의 식에서  $L$ 은  $\sqrt{L_1} - \sqrt{L_2}$ 를 나타낸다. 위의 식으로부터 2차측 권선에 연결된 초전도 한류소자의 임피던스  $Z_{fel}$ 가 증가함으로써, 전체 선로전류인  $I_{fel}$ 가 감소된다. 전체 선로전류가 식(2)에서 나타나는 바와 같이, 자속구속형 한류기의 구조적인 영향으로 1차측 전류인  $I_1$ 가 음의 방향으로 되기 때문에 저항형 한류기에 비하여 선로전류를 감소시킬 수 있으므로, 전압등급을 높이는데 있어서 보다 유리함을 식을 통해서도 알 수 있었다.

그림 3은 적용전압 확대를 위해 시편을 3개를 직렬로 연결한 저항형 한류기의 파형을 나타낸다. 임계전류의 차이가 크게 나지 않는 YBCO 박막을 한류소자로 사용했음에도 불구하고, 임계전류밀도가 제일 작은 SFCL A에서 켄치가 발생되지 않음에 따라, 상대적으로 다른 두 시편의 발생전압이 89.73[V], 59.36[V]로 크게 나타남을 알 수 있었다.

그리고 실험을 통해서 얻어진 전류와 전압에서 산출된 한류소자의 발생저항은 사고초기 반주기인 67.65[ms]에서 0[Ω], 6.90[Ω], 9.62[Ω]를 나타냄에 따라, 선로에 유입되는 전류에 의해 각 한류소자의 켄치가 전부 발생되지 않음을 알 수 있었다.

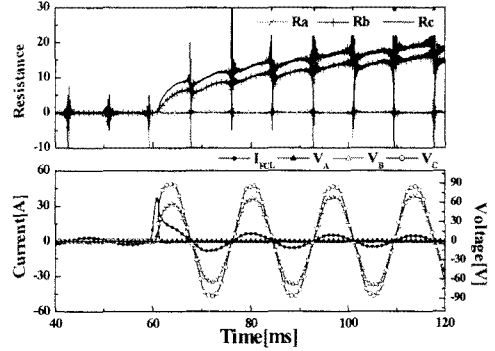


그림 3. 저항형 한류기의 저항과 전류-전압파형

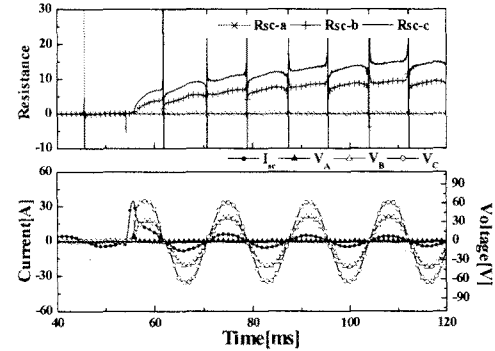


그림 4. 소자 3개를 직렬연결한 자속구속형 한류기  
a) 소자 a, b, c의 저항파형  
b) 선로전류-소자전압파형

그림 4는 가극결선시 소자를 직렬연결 했을 때 사고 후 켄치되는 소자의 저항과 전압파형을 나타낸다. 전원전압은  $200/\sqrt{3}$  [V]이며, 1차측과 2차측에 결선된 코일의 턴수비는 63:21턴으로 하여 실험하였다. 소자를 3개를 직렬 연결시 소자A는 켄치되지 않았으며, 소자 B는 35[V], 소자 C는 66[V]로 전압분배가 되는 것을 알 수 있었다. 저항형 한류기와 마찬가지로 자속구속형 한류기에서도 임계전류값이 작은 소자 C에서 켄치가 발생되지 않았으나, 사고가 발생한 후 초기반주기에 발생하는 소자저항은 0 [Ω], 3.98[Ω], 6.94[Ω]로 저항형 한류기에 비해 작은 값을 나타내었다. 이는 소자로 흐르는 통전전류가 리액터구조에 의해 작아지는 것과 가극결선의 사고 후 자속발생의 구조상 저항형 한류기보다 한류소자에 인가전압의 크기가 작아져 그림 3과 4의 저항발생물에 따른 곡선파형에서 나타나는 바와 같이 동일소자의 저항값이 설계조건 차이로 발생저항의 크기차를 나타냄을 확인할 수 있었다.

저항형 한류기의 한류소자로 통전되는 전류인 선로전류  $I_{fa}$ 가 36.35[A]까지 상승하는 것에 비해 자속구속형 한류기의 통전전류인  $I_{sc}$ 는 34.95[A]임에 따라 구조적인 영향으로 소자로 흐르는 전류가 줄어들었음을 재차 확인할 수 있었다. 또한 자속구속형 한류기의 선로전류인  $I_{fel}$ 가

사고초기 반주기안에 26.24[A]까지 신속하게 제한됨에 따라 선로보호측면에서도 저항형 한류기보다 유리함을 확인할 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 YBCO박막을 한류소자로 사용한 저항형 한류기와 자속구속형 한류기를 설계·제작하여 동일조건 하에서 실험하였다. 초전도 한류기를 실계통에 적용하기 위해서는 전압용량을 증대하기 위해서, 한류소자의 직렬 연결은 필수적이다. 직렬연결을 할 경우 개별 한류소자인 YBCO박막의 제조상의 특성으로 인해 켄치시점의 불균일문제가 발생한다. 이에 대한 동작특성을 파악하기 위하여 저항형 한류기의 한류소자 3개의 직렬연결 한 것과 자속구속형 한류기에서 1차측과 2차측 결선방향을 각각으로 병렬결선하여 2차측 코일에 한류소자 3개를 직렬 연결하여 전류제한특성을 비교 및 분석하였다. 정상작동 시에는 자속구속형 한류기는 강자성체 철심을 사용하지만 철손에 의한 손실이 없으므로, 저항형 한류기와 마찬가지로 사고전 선로에 영향력이 적다.

자속구속형 한류기와 저항형 한류기 모두 발생하는 켄치전압의 크기가 일정하지 않았으나, 초기과도응답에 따른 운전특성이 자속구속형 한류기의 구조특성에 의해 초기반주기동안의 피크선로전류의 제한되는 폭이 저항형 한류기보다 커짐에 따라 동작특성이 보다 유리하였다. 또한 3개의 한류소자에 발생하는 저항도 두 설계구조 모두 켄치가 발생되지 않았으나, 자속구속형 한류기의 한류소자의 발생저항의 크기가 적게 발생됨에 따라 한류소자의 부담이 적어짐을 알 수 있었다.

이는 소자로 흐르는 통전전류가 리액터구조에 의해 작아지는 것과 가극결선의 사고 후 자속발생의 구조상 저항형 한류기보다 한류소자에 인가전압의 크기가 작아져 자속구속형 한류기의 저항발생률에 따른 곡선파형에서 나타나는 바와 같이 동일소자의 저항값이 설계조건의 차이로 발생저항의 크기차를 나타냄을 확인할 수 있었다. 따라서, 자속구속형 한류기가 용량증대측면에서 보다 유리한 구조임을 입증하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통, 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, p. 19-31, 1998
- [2] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준, "저항형 초전도 한류기에서의 켄치 전파", 한국전기전자재료학회 논문지 제 13권, 4호, p. 337-342, 2000
- [3] 박권배, 이방욱, 김호민, 강종성, 오일성, 심정욱, 김혜림, 현옥배, "초전도 저항형 한류기의 용량 증대에 대한 case studies", 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문지, p. 312-315, 2004
- [4] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준, 문승현, 한병성, "YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작특성", 전기학회논문지, 48B권, 10호, p. 537-543, 1999
- [5] 차상도, 김혜림, 심정욱, 한용희, 현옥배, "동일 병렬 저항을 이용한 초전도 저항형 한류소자 직렬연결방안 및 전압용량 증대", 대한전기학회 전기학회 논문지, 52권, 7호, p. 327-334, 2003
- [6] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, "15kVA급 박막형 초전도 전류제한기 한류특성", 전기전자재료학회 논문지, Vol. 13, No. 12, p. 1058-1062, 2000