

## 1선 지락사고에 대한 초전도한류기의 불평형 특성

### Unbalanced Characteristics of the Superconducting Fault Current Limiters with a Single Line-to-ground Fault

최효상<sup>1</sup>, 이나영<sup>1</sup>, 이상일<sup>1,a</sup>  
(Hyo-Sang Choi<sup>1</sup>, Na-Young Lee<sup>1</sup>, and Sang-Il Lee<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

We investigated the unbalanced characteristics of the superconducting fault current limiters (SFCLs) based on YBCO thin films with a single line-to-ground fault. When a single line-to-ground fault occurred, the short circuit current of a fault phase increased about 6 times of transport currents after the fault onset but was effectively limited to the designed current level within 2 ms by the resistance development of the SFCL. The fault currents of the sound phases almost did not change because of their direct grounding system. The unbalanced rates of a fault phase were distributed from 6.4 to 1.4. It was found that the unbalanced rates of currents were noticeably improved within one cycle after the fault onset. We calculated the zero phase currents for a single line-to-ground fault using the balanced component analysis. The positive sequence resistance was reduced remarkably right after the fault onset but eventually approached the balanced positive resistance component prior to the system fault. This means that the system reaches almost the three-phase balanced state in about 60 ms after the fault onset at the three-phase system.

**Key Words** : Superconducting fault current limiter, Unbalanced characteristics, Power system

#### 1. 서론

전력계통에서 사고가 발생한 경우 정상상태의 전류에 비해 대략 10~20배 정도의 단락전류가 흐른다. 따라서 기술적·경제적인 측면에서 단락전류를 억제시키기 위한 전력기기의 설계는 필수적이다. 단락전류를 저감하기 위한 일반적인 억제 대책은 모선분리를 하거나 고임피던스 기기, 직렬리액터와 같은 부가 장치를 설치하는 것이다. 그러나 이러한 대책들은 정상 작동시 인접계통에 과부하 및 전력계통의 안정성 저하 등과 같은 부작용을 유발시킨다. 이외에도 전력퓨즈를 사용하고 있

나, 사고 발생 후에는 수동 교체를 해야만 한다. 초전도한류기의 설치는 이러한 문제의 해결책으로써 전력계통내에서 정상 작동시 전력손실이 없이 전류가 흐르지만, 사고 발생시 급격한 저항발생으로 신속하며 효율적으로 고장전류를 억제시킨다.

현재 국내외적으로 초전도 한류기에 대한 관련 분야의 기술개발 및 연구가 활발하게 진행 중에 있다[1-9]. 고온초전도 한류기는 저항형, 유도형, hybrid형 등으로 나눌 수가 있다. 이 중에서도 저항형은 구조 및 원리가 간단하며, 특히 소재로 박막을 이용할 경우 용량 증대시 적층구조를 통한 밀집화로 소형화가 가능하다는 장점이 있다.

고온 초전도 한류기를 실계통에 적용하기 위해서는 3상에 대한 사고 분석이 필수적이다. 3상 전력계통에서 유발되는 사고로는 각 상이 평형된 3상 단락 고장과 각 상이 불평형 되는 1선 지락 및 2선 지락, 완전지락, 그리고 선간단락과 같은 고장

1. 조선대학교 전기공학과  
(광주시 동구 서석동 375)  
a. Corresponding Author : siblee@chosun.ac.kr  
접수일자 : 2005. 4. 27  
1차 심사 : 2005. 7. 13  
심사완료 : 2005. 7. 21

이다. 이중에서도 사고의 약 70 % 이상이 1선 지락 사고이다. 본 논문에서는 박막을 이용한 저항형 초전도 한류기에 대한 실험결과를 토대로 1선 지락 사고로 인한 불평형 사고를 산출하여 한류특성효과를 비교·분석하였다.

## 2. 실험

초전도 한류소자로는 직경 2 inch의  $Al_2O_3$  기판 위에 성장된 두께 300 nm의  $YBa_2Cu_3O_7$  박막을 토대로 제작하였으며, 구체적인 제원은 참고문헌[8]에 상세히 나타내었다.

그림 1은 3상 전력계통의 1선 지락사고를 실험하기 위해 구성된 실험회로도이다. 이러한 1선 지락사고의 모의사고를 수행하기 위해서, 초기 정상 상태에서는 스위치 SW1a, SW1b, 그리고 SW1c는 모두 닫혀 있으며, 스위치 SW2a, SW2b, 그리고 SW2c는 모두 열려 있다. a상에 1선 지락사고를

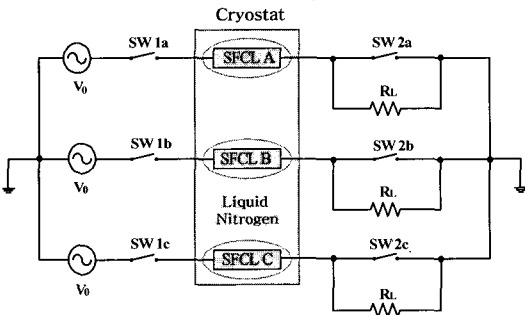


그림 1. 3상 시스템에서 1선 지락사고를 위한 실험회로도.

Fig. 1. Scheme of a test circuit for a single line-to-ground fault in a three-phase system.

표 1. 각 초전도 한류소자의 임계전류값.

Table 1. The critical current values ( $I_c$ ) of three SFCL units.

Parameter	SFCL A	SFCL B	SFCL C
Critical current values ( $I_c$ , A)	15.55	15.58	15.60

발생시키기 위해서는 스위치 SW2a가 닫히고 70 ms가 지난 뒤 열어둠으로써 a상의 사고를 모의할 수 있다. 이때 양단에 인가된 상전압  $V_0$ 은 60 Hz에서  $150/\sqrt{3} V_{rms}$ 이며, SFCL A, SFCL B, SFCL C는 실험회로도 각상에 연결된 초전도 제한소자이다. 그리고 30  $\Omega$ 의 부하저항  $R_L$ 은 각각의 SW2a, SW2b, SW2c와 병렬로 연결하였다.

3상계통의 사고를 테스트하기 위해 3개의 초전도 한류소자를 이용하였으며, 개별 임계전류값들은 표 1에서 제시하였다. 여기서 사용된 소자들의 임계전류는  $\pm 5\%$  이내로 거의 동일한 특성을 나타내었다. 이러한 균일한 특성을 가지는 소자의 채택은 초전도 한류소자의 초기동작전류가 전체 시스템의 보호협조 면에서 동일해야 하므로 중요하다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2에서는 3상에서 a상 접지임피던스가 0인 경우에 발생하는 초전도한류기의 전류제한특성을 나타낸다. a상 선로에 연결된 스위치 SW2a를 닫아 전류의 흐름을 저항이 없는 선로로 우회시켜 지락사고를 유발시켰다. 사고각이  $0^\circ$  일때 a상의 고장전류곡선은 최고 32  $A_{rms}$ 까지 상승하였다가 초전도한류기의 동작으로 사고가 발생한지 1~2 msec 이내에 신속하고 효율적으로 고장전류제한이 수행되었다. 이때 초전도 한류기가 동작되지 않을 경우 지락사고로 인한 고장전류는 매우 상승될 것이다.

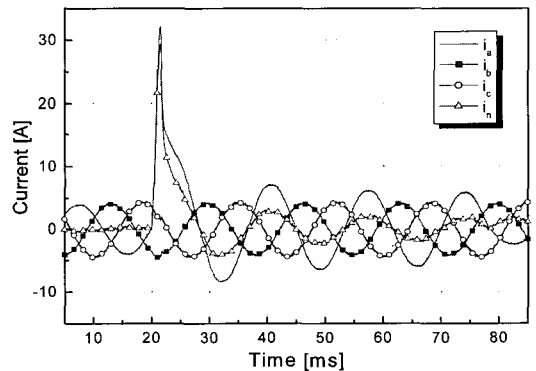


그림 2. 3상 시스템의 1선 지락사고시 전류곡선.

Fig. 2. A single line-to-ground fault in a three phase system.

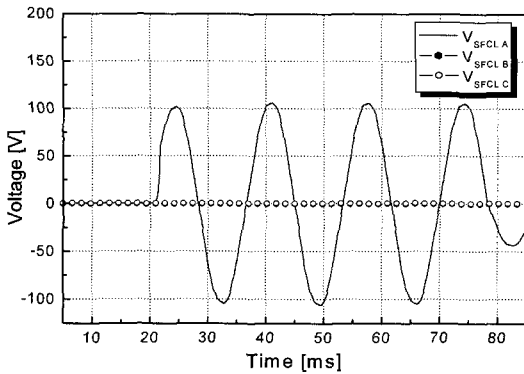


그림 3. 1선 지락사고시 초전도 한류소자의 전압 곡선.

Fig. 3. The voltage characteristics of the SFCL units in a single line-to-ground fault.

그림 3은 각각의 초전도 한류소자의 양단에 걸리는 전압을 측정하여 전압곡선으로 나타내었다. 1선 지락사고의 모의에 따라 초전도소자인 SFCL B와 SFCL C의 양단전압은 0이므로, 사고에 따른 현상은 사고가 발생한 a상인 SFCL A에서만 발생한다. 이때 초전도 소자는 a상의 1선 지락사고를 제한할 수 있는 저항으로 작용하였다. 즉, 소자 양단의 전압곡선은 SFCL A에 대한 전압곡선만이 나타났다. 이러한 사고상의 불평형률은 초기에는 6.4였으나 3주기 이후에는 1.4로 감소하였다. 사고가 발생한지 1주기 이내에 전류의 불평형률이 뚜렷하게 개선되었음을 그림 2의 전류파형에서도 확인할 수 있었다.

1선 지락사고의 특성을 정확하게 비교·분석하기 위한 해석법으로써 대칭 좌표법을 사용하여 전압과 전류를 해석하였다. 대칭좌표법을 통하여 당초의 불평형 3상 전류  $I_a, I_b, I_c$ 는 각각 평형된 3개의 성분  $I_0$ (영상분),  $I_1$ (정상분),  $I_2$ (역상분)의 합으로 구성되었다. 즉, 1선 지락고장과 같은 불평형 고장의 전류를 각 대칭분으로 분해하여 산출하였다.

이러한 해석법으로 산출된 선로전류  $I_a$ 와 각각의 상전류에 따른 파형을 그림 4에서 나타내었다. 가장 높은 파형인 a상 전류  $I_a$ 곡선은 정상전류  $I_1$ 와 파형이 거의 동일한데, 상회전 방향이 전원과 동일하므로 전동기와 같은 기기에 회전토크를 준다. 반면에 영상전류  $I_0$ 와 역상전류  $I_2$ 는 상대적으로 낮은 곡선파형을 보이는데, 이는 초전도 한류기가 신속하게 작동되어 고장전류를 제한하였기 때문이다.

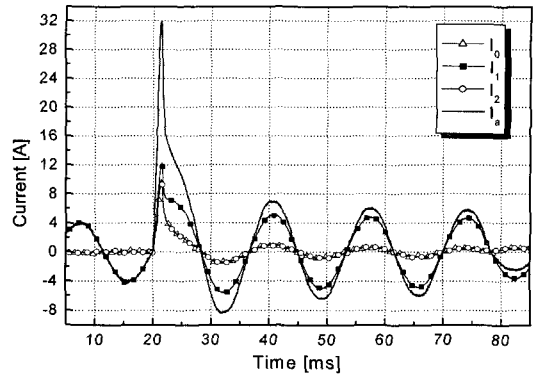


그림 4. 사고시 각각의 평형분 전류곡선.

Fig. 4. The balanced currents calculated from measured fault currents.

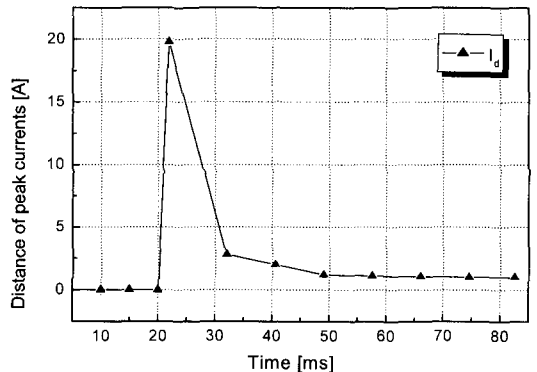


그림 5. a상 사고시 사고상의 피크전류와 정상전류와의 간격.

Fig. 5. The distance between peak currents of fault phase a and positive sequence phase.

평형 단상 전류인 영상 전류는 지락 고장시 접지 개전기를 동작시키는 전류이지만, 통신선에 대해서는 전자 유도 장애를 야기시킨다. 또한 역상 전류는 전원과 상회전이 반대이므로 전류가 전동기에 흐르면 제동 작용을 하여 그만큼 전동기의 출력을 감소시킨다. 따라서 평형 상태에서 영상 및 역상전류는 거의 영에 가깝다. 3상 시스템에서 1선 지락 고장 발생시 상전류는 정상분 전류  $I_1$ 만이 존재하기 때문에 정상분 전류  $I_1$ 와 a상의 전류  $I_a$ 는 사고 후에 그림 4와 같은 유사한 곡선이 나타난다. 이는

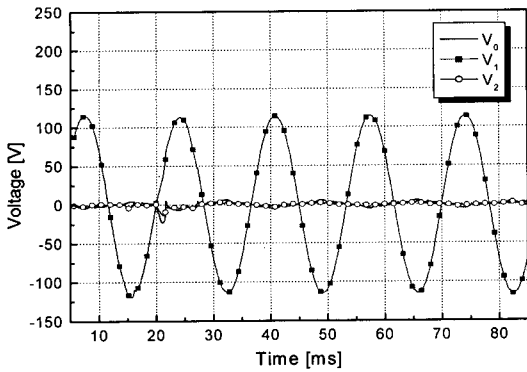


그림 6. 사고시 각각에 대해, 산출된 평형분 전압 곡선.

Fig. 6. The balanced voltages calculated from measured fault voltages.

대칭 좌표법으로 산출된 식  $\hat{I}_a = \hat{I}_0 + \hat{I}_1 + \hat{I}_2$ 을 통해 사고 초에는 각상의 전류가 합산되어 a상 전류  $I_a$ 의 파형은 매우 상승되지만 영상전류  $I_0$ 와 역상전류  $I_2$ 가 초전도 한류기에 의해 제한되므로 결과적으로  $I_a \approx I_1$ 가 되기 때문에 이러한 파형곡선을 보인다.

그림 5의 곡선은 정상전류  $I_1$ 와 a상 전류  $I_a$  사이의 피크전류간격을 표현한 것이다. 사고가 발생한 후에는 피크전류차가 급격히 상승하여 19.8 A까지 증가하였으나, 3사이클 동안에 점차적으로 피크전류간격이 1 A로 감소되어 고장전류가 안정되었음을 확인할 수 있다. 이러한 곡선을 통해서 초기 사고 발생시 매우 불안정한 상태였으나, 초전도 한류기의 작동으로 평형된 상태에 근접해지는데 알 수 있었다. 사고 후에 초전도 한류소자가 선형적으로 빠르게 저항으로 변함으로써 사고상의 피크전류와 정상전류 간격이 줄어든 것으로 사료된다.

그림 6과 그림 7에서 평형전압과 정상분 저항곡선을 통하여 초전도 한류기의 동작효과를 확인하였다. 그림 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 a상에 사고가 발생한 후 정상분 전압  $V_1$ 이 나타났다. 반면에 영상분 전압  $V_0$ 과 역상분 전압  $V_2$ 은 사고 직후 미세한 변화가 있었으나, 그 후에는 거의 나타나지 않았다. 그림 7은 사고가 발생한 a상에서 산출된 정상전류와 전압에 의한 저항  $Z_1$ 의 변이곡선을 나타내었다. 그림 4와 그림 6을 비교하여 분석해보면, 사고가 발생한 직후 일시적으로 전류가 급격히 상승함으로써 저항의 수치는 급격한 감소세

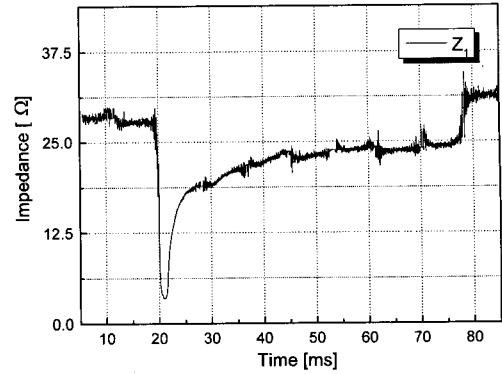


그림 7. 사고시 정상전압과 정상전류로부터 산출된 정상분 저항곡선.

Fig. 7. The balanced resistance calculated from balanced voltages and currents.

를 나타냄을 알 수 있었다. 그러나 초전도 한류기의 동작으로 고장전류가 제한이 되므로, 저항  $Z_1$ 의 수치는 사고전의 수준으로 다시 상승하였다. 즉, 정상분 저항파형이 사고 직후에는 뚜렷한 감소세를 보이나, 초전도 한류기의 동작으로 시스템이 사고 이전의 평형분 정상저항 파형으로 회복되었음을 확인할 수 있었다. 3상 시스템에서 1선 지락사고가 발생했을 때, 초전도 한류기가 작동되지 않을 경우 정상분 저항의 파형은 지속적으로 낮은 곡선을 유지할 것으로 사료된다. 그리고 그림 5와 그림 7에 대한 분석으로부터 3상 시스템에 사고가 발생한지 대략 60 ms 이내에 평형분 상태로 거의 회복되는 것을 제차 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

YBCO박막을 이용한 저항형 초전도한류기에 대한 실험결과를 토대로 3상 전력계통에서 유발되는 불평형 사고를 산출하여, 1선 지락사고를 분석하였다. 3상 전력계통에 저항형 초전도한류기를 설치했을 때, 계통사고가 발생할 경우 a상의 고장전류는 최고 32 A까지 상승하였다가, 사고가 발생한지 1~2 msec 이내에 신속하고 효율적으로 고장전류가 제한되었다. 게다가 고장이 발생한 상의 불평형률은 사고 직후에는 6.4였으나, 3주기 이후는 1.4까지 감소하였다. 이러한 전류의 불평형률은 사고가 발생한지 1주기 이내에 뚜렷하게 개선되었음을 알

수 있었다. 고장 계산법인 대칭 좌표법로 1선 지락 고장을 해석하여 전력계통의 불평형 3상분을 각각의 대칭분으로 산출하여 분석하였다. 정상분 저항이 사고 직후에도 뚜렷한 감소세를 보였으나, 초전도 한류기의 동작으로 시스템이 사고 이전의 상태에 근접하게 회복되는 것을 알 수 있었다. 이는 고장이 발생한지 대략 60 ms 이내에 3상 평형상태에 거의 도달했음을 의미한다. 1선 지락고장시 불평형분 전류가 모두 접지선으로 흘렀으나, 영상전류인  $3I_0$ 은 사고후 2 ms 이내에 급격하게 감소하였고, 3상 시스템에 설치된 초전도 한류기의 억제동작에 따라 그 후에 점차적으로 감소하였다.

3상 전력계통에 초전도 한류기를 적용하기 위해서는 평형분의 부작용을 최소화하는 범위내에서 초전도 한류기의 최적 조건을 찾는 것이 필수적이다. 전력계통내에 1선 지락고장이 발생했을 경우 필연적으로 각 상간 불평형률이 높아진다. 이때, 초전도 한류기로 적용하면 한류소자의 임피던스 값에 따라 불평형률은 개선되기 때문에 대칭좌표법을 통한 평형분의 분석은 최적화 조건을 결정하기 위한 유용한 해석법이 될 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2004년도 조선대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

[1] A. Usoskin, H. C. Freyhardt, A. Issaev, J. Knoke, J. Dzick, M. Collet, P. Kirchesch, and J. Lehtonen, "Superpoli fault-current limiters based on YBCO-coated stainless steel tapes", *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, Vol. 13, No. 2, p. 1972, 2003.

[2] M. Noe, K.-P. Juengst, F. N. Werfel, S.

Elschner, J. Bock, F. Breuer, and R. Krecutz, "Testing bulk HTS modules for resistive superconducting fault current limiters", *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, Vol. 13, No. 2, p. 1976, 2003.

[3] T. Hoshino, K. M. Salim, A. Kawasaki, and I. Muta, Member. IEEE, T. Nakamura, and M. Yamada, "Design of 6.6 kV, 100 A saturated DC reactor type superconducting fault current limiter", *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, Vol. 13, No. 2, p. 2012, 2003.

[4] M. Ichikawa, H. Kado, M. Shibuya, and T. Matsumura, "Inductive type fault current limiter with Bi-2223 thick film on a MgO cylinder", *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, Vol. 13, No. 2, p. 2004, 2003.

[5] T. Matsumura, A. Kimura, H. Shimizu, Y. Yokomizu, and M. Goto, "Fundamental performance of flux-lock type fault current limiter with two air-core coils", *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, Vol. 13, No. 2, p. 2024, 2003.

[6] H.-S. Choi, H.-R. Kim, and O.-B. Hyan, "Quench characteristics of resistive superconducting fault current limiters based on  $YBa_2Cu_3O_7$  films", *Physica C*, Vol. 351, p. 415, 2001.

[7] 박충렬, 임성훈, 박형민, 최효상, 한병성, "자속 구속형 전류제한기의 초기사고전류 제한 시점 변화", *전기전자재료학회논문지*, 18권, 3호, p. 269, 2005.

[8] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성, "자속 구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교", *전기전자재료학회논문지*, 18권, 4호, p. 363, 2005.

[9] 류경우, 마용호, "코일형 한류소자의 교류손실 특성", *전기전자재료학회논문지*, 18권, 4호, p. 370, 2005.