

## 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기와 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 전류제한 특성 비교

### Comparison of Fault Current Limiting Characteristics between the separated Three-phase Flux-lock Type SFCL and the Integrated Three-phase Flux-lock Type SFCL

두승규<sup>1</sup>, 두호익<sup>1,a</sup>, 김민주<sup>1</sup>, 박충렬<sup>2</sup>, 김용진<sup>1</sup>, 이동혁<sup>1</sup>, 한병성<sup>1</sup>  
(Seung-Gyu Doo<sup>1</sup>, Ho-Ik Du<sup>1,a</sup>, Min-Ju Kim<sup>1</sup>, Chung-Ryul Park<sup>2</sup>, Yong-Jin Kim<sup>1</sup>, Dong-Hyeok Lee<sup>1</sup>,  
and Byoung-Sung Han<sup>1</sup>)

#### Abstract

We investigate the comparison of fault current characteristics between the separated three-phase flux-lock type superconducting fault current limiter(SFCL) and integrated three-phase flux-lock type superconducting fault current limiter(SFCL). The single-phase flux-lock type SFCL consists of two coils. The primary coil is wound in parallel to the secondary coil on an iron core and superconducting elements are connected to secondary coil in series. Superconducting elements are used by the YBCO coated conductor. The separated three-phase flux-lock type SFCL consists of single-phase flux-phase type SFCL in each phase. But the integrated three-phase flux-lock type SFCL consists of three-phase flux-reactors wound on an iron core. Flux-reactor consists of the same turn's ratio between coil 1 and coil 2 for each single phase. To compare the current limiting characteristics of the separated three-phase flux-lock type SFCL and integrated three-phase flux-lock type SFCL, the short circuit experiments are carried out fault condition such as the single line-to-ground fault. The experimental result shows that fault current limiting characteristic of the separated three-phase flux-lock type SFCL was better than integrated three-phase flux-lock type SFCL. And the integrated three-phase flux-lock type SFCL has an effect on sound phase.

**Key Words** : Integrated three-phase flux-lock type SFCL, Separated three-phase flux-lock type SFCL, Single line-to-ground fault, YBCO coated conductor

#### 1. 서론

해마다 급증하는 전력수요에 따른 전원설비의 증가는 단락사고시 사고전류의 증가를 야기한다. 이러한 사고전류를 해결하기 위한 방안으로 새로

운 변전소의 건설, 모선분리, 직렬리액터의 설치, 고 임피던스 기기 및 복합차단기 설치 등 여러 가지 해결방안이 모색되고 있다. 하지만, 이러한 방안들은 또 다른 문제점을 수반하여 전력계통의 신뢰성 및 안정성에 대한 문제를 야기 시키고 있으며, 이러한 문제점을 효과적으로 해결하기 위한 대안으로서 다양한 형태의 고온초전도 전류제한기가 제안되고 있다[1-6].

기 연구된 고온초전도 전류제한기들 중 높은 봉전전류 및 한류임피던스 특성을 가지고 있는 자속구속형 고온초전도 전류제한기를 삼상 전력 계통

1. 전북대학교 전기공학과  
(전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14)  
2. 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소  
a. Corresponding Author : dudoc@chonbuk.ac.kr  
접수일자 : 2009. 6. 16  
1차 심사 : 2009. 7. 11  
심사완료 : 2009. 7. 23

에 적용하기 위해 각 상에 단상 자속구속형 고온초전도 전류제한기를 연결하여 제작한 분리된 삼상 자속구속형 고온초전도 전류제한기와 세 상의 자속구속 리액터를 하나의 철심에 설치하여 제작한 일체화된 삼상 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 전류제한 특성을 비교 분석하였다[4].

## 2. 실험

그림 1은 분리된 삼상 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조도를 나타낸다. 각 R, S, T상에 철심을 매개로 하여 코일 1, 2가 병렬로 연결되어 있으며, 초전도 소자로 쓰인 Y-Ba-Cu-O(YBCO) coated conductor가 코일 2에 직렬로 연결되어 있다.

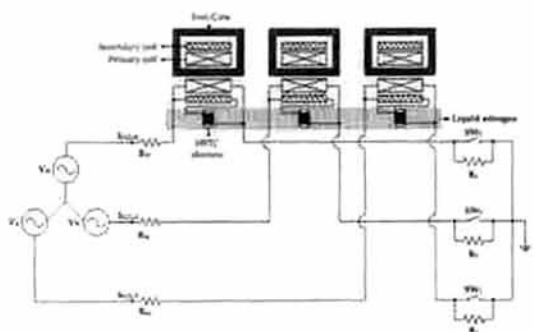


그림 1. 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기의 구조도.

Fig. 1. Schematic of the separated three-phase flux-lock type SFCL.

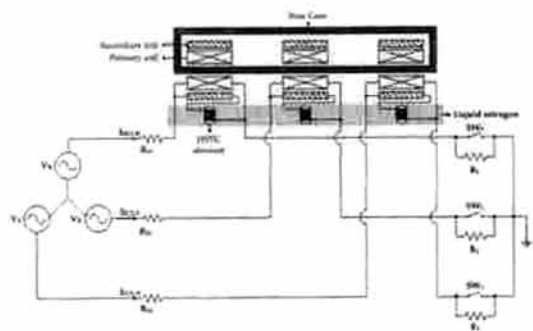


그림 2. 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 구조도.

Fig. 2. Schematic of the integrated three-phase flux-lock type SFCL.

그림 2는 일체화된 삼상 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조를 나타낸다. 분리된 삼상 자속구속형 고온초전도 전류제한기와는 다르게 하나의 철심에 각 R, S, T상의 코일 1, 2가 연결되어있는 구조를 가진다.

그림 1과 2에서 사고 전류를 측정하기 위해 0.5 Ω의 무유도 저항을 선로에 연결하였으며, 부하저항은 40 Ω을 연결하였다. 삼상 전원 전압의 크기는 360 V<sub>rms</sub>이고, 사고각은 R상 기준 90°에서 실험하였다. 실험에서 사용된 자속구속리액터의 코일 1, 2의 턴수는 각 R, S, T상 모두 63, 21턴으로 고정하여 실험에 임하였다. YBCO coated conductor는 소자의 크기를 줄이기 위하여 권선형 포머에 감아 사용하였고, 권선시 선재의 유도성분을 제거하기 위하여 2 m씩 서로 다른 방향으로 권선하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 3은 고온초전도 전류제한기의 감극 결선한 경우 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기와 일체화된 삼상 전류제한기의 전류파형을 비교하여 나타낸 그림이다. 그림 3(a)에서 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기의 제한된 전류는 332.18 A<sub>peak</sub>로 사고전류의 43.49%까지 제한되었고, 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 제한된 전류는 340.72 A<sub>peak</sub>로 사고전류의 42.04%까지 제한되었다. 또한 사고후 5주기 동안의 사고전류도 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기가 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 따라서 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기의 전류제한 특성이 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 전류제한특성과 비교하여 보다 우수한 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 감극 결선한 경우 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기와 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 초전도 소자에서 발생하는 전압을 나타낸다. 초전도 소자의 발생전압은 분리된 삼상 자속구속형에서 더 많이 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 그림 5의 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기의 초전도 소자 발생 저항이 크기 때문이다. 따라서 초전도 소자의 발생 저항이 크므로 분리된 자속 구속형 전류제한기의 전체 임피던스는 증가하고, 증가된 임피던스에 의해서 전류 제한이 되는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 삼상 고온초전도 전류제한기의 가극 결선한 경우 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기와 일체화된 삼상 전류제한기의 전류파형을 비교하

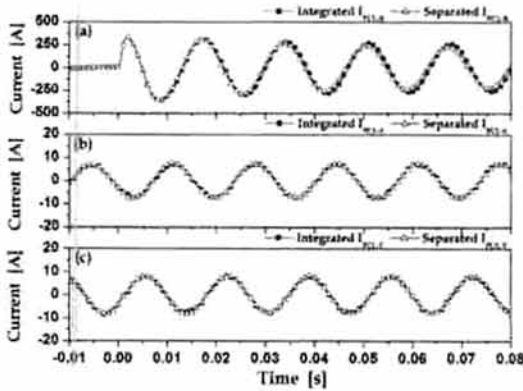


그림 3. 감극 결선시 전류 파형 (a) R상 (b) S상 (c) T상.

Fig. 3. Current waveform in subtractive polarity winding (a) R phase (b) S phase (c) T phase.

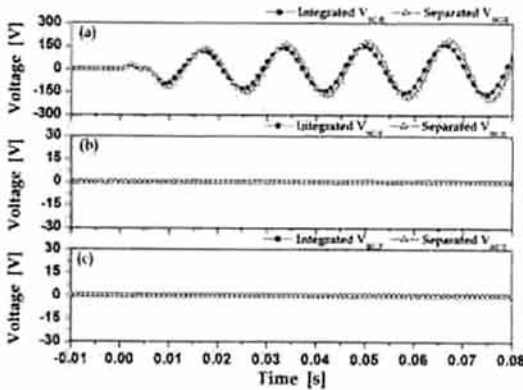


그림 4. 감극 결선시 전압 파형 (a) R상 (b) S상 (c) T상.

Fig. 4. Voltage waveform in subtractive polarity winding (a) R phase (b) S phase (c) T phase.

여 나타낸 그림이다. 그림 6(a)에서 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기의 제한된 전류는 211.43 A<sub>peak</sub>로 사고전류의 64.04 %까지 제한되었고, 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 제한된 전류는 240.11 A<sub>peak</sub>로 사고전류의 59.16 %까지 제한되었다. 또한 감극 결선한 경우와 마찬가지로 사고 후 5주기 동안의 사고전류도 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기가 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 따라서 삼상 자속구속형 전류제한기를 가극 결선

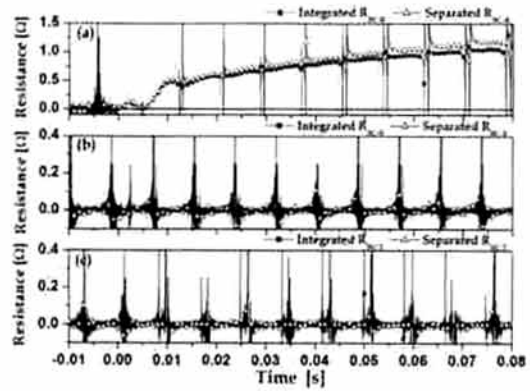


그림 5. 감극 결선시 저항 파형 (a) R상 (b) S상 (c) T상.

Fig. 5. Resistance waveform in subtractive polarity winding (a) R phase (b) S phase (c) T phase.

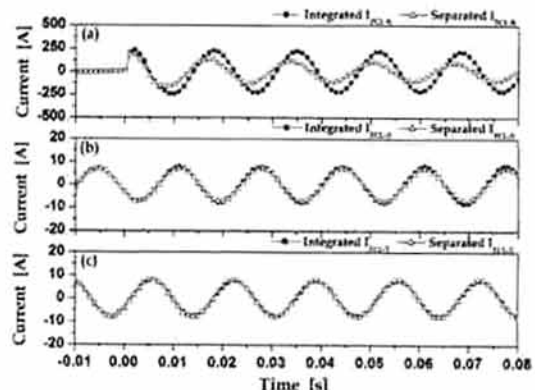


그림 6. 가극 결선시 전류 파형 (a) R상 (b) S상 (c) T상.

Fig. 6. Current waveform in additive polarity winding (a) R phase (b) S phase (c) T phase.

한 경우 감극 결선한 경우보다 더 큰 차이를 보이며 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기의 전류제한 특성이 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 전류제한특성 보다 우수한 것을 알 수 있다. 그림에서 사고상의 전류제한이 일어난 후 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기와 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 선로전류의 위상이 차이가 나는 것을 확인할 수 있는데 이는 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기는 철심 하나에 세 상의 자속

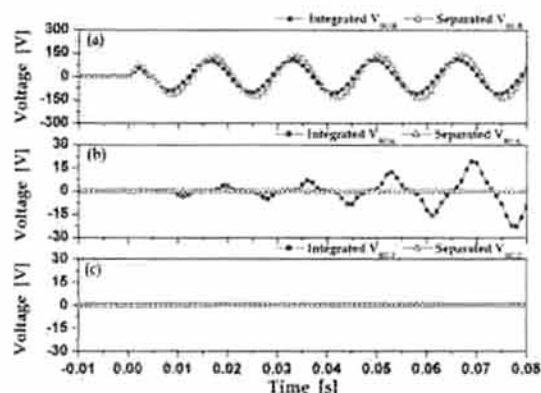


그림 7. 가극 결선시 전압 파형 (a) R상 (b) S상 (c) T상.

Fig. 7. Voltage waveform in additive polarity winding (a) R phase (b) S phase (c) T phase.

구속리액터가 연결되어 있으므로 발생하는 인덕턴스 성분은 의해 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기에 비해 선로전류의 위상이 늦어지는 것으로 사료된다.

그림 7은 가극 결선한 경우 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기와 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 초전도 소자에서 발생하는 전압을 나타낸다. 감극 결선한 경우와 마찬가지로 소자의 발생전압은 분리된 삼상 자속구속형에서 더 많이 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 그림 8의 분리된 삼상 자속구속형전류제한기의 초전도 소자 발생 저항이 크기 때문이다. 따라서 초전도 소자의 발생 저항이 크므로 분리된 자속 구속형 전류제한기의 전체 임피던스는 증가하고, 증가된 임피던스에 의해서 전류제한이 되는데, 가극 결선의 경우 감극 결선보다 초전도 소자의 저항 발생량은 적으나 2차측 코일로 흐르는 전류의 양이 크므로 더 많은 전류제한이 된다. 또한 그림 7(b)에서 건정상 이 S상에서 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 초전도 소자에서 전압이 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 그림 8(b)의 초전도 소자 발생 저항에서도 확인이 가능하다. 건정상에서 초전도 소자의 저항 발생 이유는 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 구조에서 기인하는데, 하나의 철심에 세 상의 리액터가 연결되어 있으므로 사고상의 사고전류에 의해 발생된 자속이 건정상 리액터에 의해 전류가 흐르고, 이 전류의 크기가 초전도 소자의 임계전류보다 크기 때문에 건전상의 초전도 소자에서도 저항이 발생하는 것으로 사료된다.

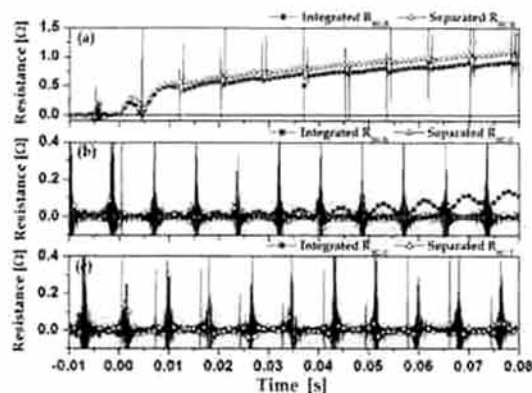


그림 8. 가극 결선시 저항 파형 (a) R상 (b) S상 (c) T상.

Fig. 8. Resistance waveform in additive polarity winding (a) R phase (b) S phase (c) T phase.

#### 4. 결론

본 논문에서는 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기와 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기의 1선 지락 사고시 전류제한 특성에 대해 분석하였다. 전류제한특성은 감극 결선한 경우와 가극 결선한 경우 모두 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기가 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기보다 우수한 것을 확인할 수 있었다. 또한 일체화된 삼상 자속구속형 전류제한기는 하나의 철심에 세 상의 자속구속터 리액터가 연결되어 있으므로 건전상의 초전도 소자의 저항 발생을 유도하며, 분리된 삼상 자속구속형 전류제한기의 선로전류보다 위상이 늦어지는 것을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2007년도 교육과학기술부의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2007-521-D00177)의 지원 받아 수행된 연구임.

#### 참고 문헌

[1] 김준환, 이강환, "고장전류 증대와 대응 방안", 전기저널, 통권 257호, p. 24, 1998.  
 [2] Y. S. Cho and H. S. Choi, "The current limiting effects of a matrix-type SFCL"

- according to the variations of designed parameters in the trigger and current-limiting parts", *Physica C*, Vol. 468, p. 2054, 2008.
- [3] 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 currents limiters", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 6, No 2, p. 62, 1996.
- [4] 박충렬, 임성훈, 박형민, 최효상, 한병성, "자속 구속형 고온초전도 전류제한기의 동작전류와 각 코일의 전류분류 분석", *전기전자재료학회 논문지*, 18권, 8호, p. 753, 2005.
- [5] S.-H. Lim, "Operational characteristics of flux-lock type SFCL with series connection of two coils", *IEEE Trans. on App. Supercon.*, Vol. 17, No. 2, p. 1895, 2007.
- [6] K. Kajikawa, K. Kaiho, and N. Tamada, "Design and current-limiting simulation of magnetic-shield type superconducting fault current limiter high  $T_c$  superconductors", *IEEE Trans. on Magnetic.*, Vol. 32, p. 2667, 1996.