

3상 일체화된 자속구속형 전류제한기의 동작특성

(Operational Characteristics in integrated Three-Phase a Flux-Lock type SFCL according to Fault Conditions)

이나영* · 최효상* · 정수복* · 이상일* · 남궁현* · 임성훈**

(조선대학교* , 숭실대학교**)

(Na-Young Lee* · Hyo-Sang Choi* · Soo-Bok Jeong* · Sang-Il Lee* · Gueng-Hyun Nam* · Sung-Hun Lim**)
(Chosun Uni*, Sungsil Uni**)

Abstract

Superconducting fault current(SFCLs) are expected to improve not only reliability but also stability of real power systems. The analysis on the single line-to-ground fault current of the integrated three phase flux-lock type SFCL, which consists of three flux-lock reactor wound on an iron core in each single phase and three YBCO thin films, was investigated in current limiting operating characteristics. We compared additive polarity winding with the subtractive one in the flux lock reactor. Its turns ratio each phase between the primary and the secondary coils is 63:42. When a single line-to-ground fault occurred in any phase, the peak value of line current in the fault phase of the additive polarity winding increased up to 31.44[A] during first-half cycle. On the other hand, the peak value in the subtractive polarity winding increased up to 81.77[A] under the same conditions. This is because the current flow between the primary and the secondary windings becomes to be additive or subtractive in each winding direction. We confirmed that the current limiting behavior in the additive polarity winding was more effective for a single-line-to-ground fault.

1. 서론

초전도 전류제한기에 대한 국내 관련연구는 손실을 최소화하기 위해 경제성과 신뢰성을 고려한 고품질전력 공급을 위한 국가차원의 신기술정책의 일환으로써 대부분 진행되고 있다. 초전도 전류제한기의 상업성이 부각되는 요소는 정상작동에는 안정적인 전력전송에 미치는 영향력이 없으며, 사고발생시에는 부가적인 제어장치 없이도 기존의 보호장치에 비하여 신속하게 사고전류를 제한하기 때문에 신뢰성이 높다[1].

이러한 특성을 지닌 초전도 전류제한기 중에서도 저항형 전류제한기의 전류제한특성과 리액터를 활용한 자속구속형 전류제한기는 실제통내에 적용했을 때, 설치조건이 요구하는 사양에 적절하게 대응할 수 있는 탄력적인 운용이 가능한 설계구조이다. 따라서, 기존의 저항형 전류제한기가 갖는 수동적인 운전특성을 탈피함에 따라 활용도측면에서 보다 효율적인 초전도 전류제한기이다[2-4].

이러한 전류제한기를 실제통내에 적용하기 위해

서는 3상 시스템에서 사고조건에 따른 분석은 필수적이다. 3상계통내에서 유발되는 사고의 약 70% 이상이 1선 지락사고에 의한 불평등사고이므로, 이에 대한 초전도 전류제한기의 3상에 대한 동작특성에 대한 사고분석은 중요하다. 자속구속형 전류제한기는 강자심체 철심을 자속매개체로 사용하는 다른 초전도 전류제한기와 달리 설계구조학적인 요소로 평상시에는 철손손실이 적어서, 선로에 영향력이 거의 없으나, 사고조건에만 작동되어 사고전류를 제한하도록 하는 구조이다. 이러한 특성을 토대로 3상 일체화된 자속구속형 전류제한기의 동작특성을 분석하였다. 실험파라미터 조건을 각상에 리액터코일인 1차측과 2차측의 극성방향을 감극결선과 가극결선으로 달리하여, 그에 따른 1선 지락사고에 대한 전류제한특성을 비교·분석하였다.

2. 본론

2.1. 실험장치 및 방법

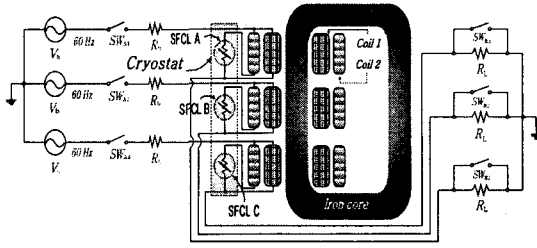


그림 1. 3상 일체화된 자속구속형 SFCL의 구조도
Fig.1. Scheme in integrated three-phase flux-lock type SFCL.

그림 1은 전력계통내의 1선 지락사고를 실험하기 위해 구성한 실험회로도이다. 사고모의를 위해 스위치 (SW_{A1}, SW_{A2}, SW_{A3})를 닫힌 조건하에서 일정시간 후 스위치 SW_{2a}를 열어둠으로써 a상의 1선 지락사고를 모의하였다. 이때 인가되는 전원전압은 160 [V_{rms}/60Hz]이며, 표준 저항인 R₀는 1[Ω], 상에 연결된 부하저항은 50[Ω]으로 각각의 스위치와 병렬연결 하였다.

결선된 각 상에 1차측 코일 턴수는 63턴이며, 2차측 코일은 42턴이 되도록 결선 하였다. 한류소자는 2차측 코일에 직렬로 연결하였으며, cryostat 내부에 존재한다.

3상에 연결된 각상의 개별코일들은 하나의 강자성체 철심에 가극과 감극방향으로 결선되어 일체형 구조로써 작동된다. 이러한 설계조건에 의해 정상작동에는 철심에 교류자속이 발생되지 않으나 선로에 과도전류가 흐를 경우 한류소자에 저항이 발생하면서 각 상의 코일에 전압이 유기되어 사고전류를 제한하게 된다.

3상 계통내의 사고를 테스트하기 위하여 3개의 초전도 한류소자를 이용하였으며, 개별 임계전류값들은 표 1에서 제시하였다.

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 value (I _c , A)	22.63	24.13	23.41

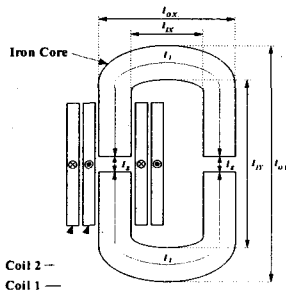


그림 2. 자속리액터의 구조
Fig.2. Scheme of flux-lock reactor

표 2. 자속리액터의 설계파라미터
Table 2. Design parameters of flux-lock reactor

Iron core(Laminated Si)	value	unit
Outer horizontal length (L _{OX})	235	mm
Outer vertical length (L _{OY})	250	mm
Inner horizontal length (L _{IX})	137	mm
Inner vertical length (L _{IY})	155	mm
Thickness (d)	66	mm

자속매개체를 일체형인 철심을 사용함으로써, 사고발생시 자속의 영향을 사고발생한 상뿐만 아니라, 건전상인 다른 상의 한류소자에도 쿨치발생을 유도시켜 사고전류를 효율적으로 작동되도록 설계되었다. 표 2는 자속구속형 리액터의 구성요소인 철심과 1차측, 2차측 코일의 설계사양을 나타내었으며, 그림 2는 제작한 자속구속형리액터 외형을 도시하였다.

2.2. 3상 구조 및 동작원리

그림 3에서는 3상 일체화된 자속구속형 SFCL의 감극결선 했을 때의 등가회로도이다. 그림에서 i_{rc1}^a, i_{rc1}^b, i_{rc1}^c는 각 상으로 흐르는 사고전류이며, i₁^a, i₁^b, i₁^c와 i₂^a, i₂^b, i₂^c 변압기의 각상의 1차측과 2차측 권선에 흐르는 전류이다. L₁^a와 L₂^a, L₁^b와 L₂^b, L₁^c와 L₂^c도 변압기 각상의 1, 2차측 권선의 인덕턴스를 나타내었다.

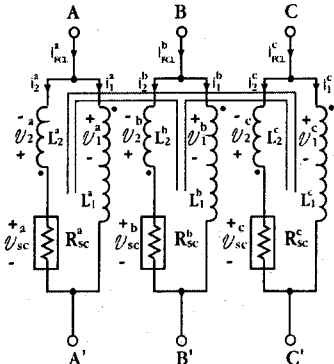


그림 3. 3상 일체화된 자속구속형 SFCL의 등가회로도
Fig.3. Equivalent circuit in integrated three-phase flux-lock type SFCL

$$\begin{bmatrix} V_1^a \\ V_2^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (j\omega L_1^a) & (-j\omega M_{12}^a) \\ (-j\omega M_{12}^a) & (j\omega L_2^a + R_{SC}^a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^a \\ I_2^a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (j\omega M_{11}^b) & (j\omega M_{12}^b) \\ (j\omega M_{11}^b) & (j\omega M_{22}^b + R_{SC}^b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^b \\ I_2^b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (j\omega M_{11}^c) & (j\omega M_{12}^c) \\ (j\omega M_{11}^c) & (j\omega M_{22}^c + R_{SC}^c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^c \\ I_2^c \end{bmatrix} \quad (1)$$

변압기 1, 2차측 권선에서의 누설인덕턴스는 무시되며, 상호인덕턴스만이 존재하며, 그림 3의 3상 일체화된

자속구속형 전류제한기의 등가회로도로부터 A상에서의 관계식 (1)을 유도하였다.

3상변압기는 3개의 1차측과 2차측 코일로 직층결선된 3개의 리액터가 하나의 철심에 연결되어 구성된다. 따라서 계통의 3상이 완벽히 평형을 이룬다면 정상동작에서 작동원리는 독립된 철심을 사용하는 단상 자속구속형 전류제한기 세 개를 각 상에 설치한 것처럼 상호간의 영향력이 거의 없다.

하지만, 3상 계통내에서 한상에서라도 사고가 발생되면 증가한 선로전류에 의해 초전도 한류소자에서 퀘치가 발생하면서, 쇄교자속의 시간적인 변화로 인해 동일한 자속경로에 있는 다른 상의 리액터에 영향을 준다. 이로 인해 하나의 상에만 사고가 발생하여도 모든 상에 영향을 주어 3개의 리액터를 사용한 독립된 자속구속형 전류제한기보다 더 효과적으로 사고를 제한한다.

2.3. 결과 및 고찰

그림 4과 5는 감극결선시 사고발생에 따른 3상 일체화된 자속구속형 전류제한기의 1선 지락사고에 따른 동작특성을 나타낸 파형이다. 그림 5-(c)에서 a상 사고가 발생한 후 초기반주기동안 선로전류가 2.41[A]에서 81.77[A]까지 상승하였다. 3상 시스템에서 a상의 선로전류에서만 초기과도응답이 나타나며, 건전상의 선로전류에는 변화가 나타나지 않았다.

하지만, 각 상의 리액터에 연결된 1차측과 2차측 코일에 전압이 유기되어 사고상의 a상 한류소자의 인가된 초기피크전압 92.02[V]값만이 아니라, b상에 연결된 한류소자에서도 초기피크전압 135.43[V]값이 인가되었음을 그림 4-(b)를 통해 확인할 수 있었다.

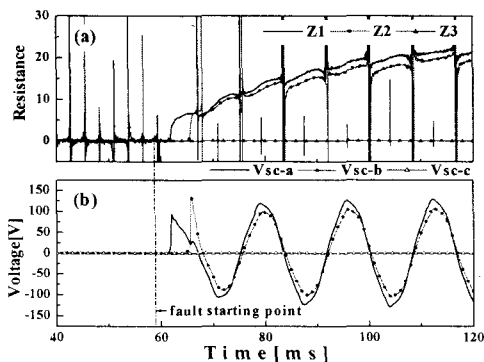


그림 4. 3상시스템에서 소자저항과 전압파형
Fig.4. The resistance and current waveform in a three-phase system
a) Generated resistances each phase
b) Generated voltages each phase

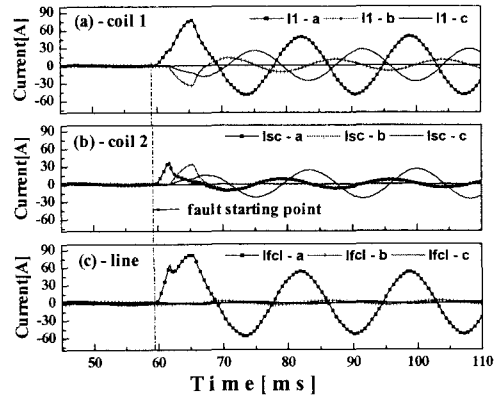


그림 5. 3상시스템에서 감극결선에 따른 전류파형
Fig.5. The current waveform in subtractive polarity winding in a three-phase system
a) The currents of the primary coils
b) The currents of the secondary coils
c) The line currents each phase

c상의 통전전류가 한류소자의 임계전류값을 초과하지 못하여 한류작용에 기인하지 못함을 그림 5-(b)에서 알 수 있었다. 이는 a상과 b상에서의 한류소자가 과도전류를 거의 제한했기 때문이며, 감극결선에 따라 발생한 자속의 크기가 적어 c상의 리액터 1차측, 2차측 코일에 전압을 인가하지 못했기 때문이다.

그림 6와 7은 가극결선시 3상 일체화된 자속구속형 전류제한기의 1선 지락사고에 따른 동작특성을 나타낸다. 감극결선과 마찬가지로 1선지락사고시 a상 선로전류만이 급격하게 31.32[A]까지 증가하였다. 하지만, 감극결선과는 달리 3상의 각상에 연결된 3개의 한류소자의 전압이 인가됨을 그림 6의 파형에서 확인할 수 있었다.

가극결선구조에 의해 사고 후 감극결선보다 발생한 자속의 크기가 더 커서 감극결선에 비해 자속구속형 전류제한기의 동작원리에 의해 3개의 리액터 모두 한류작용을 하였다. 이는 그림 7-(b)에서 b상의 2차측 통전전류가 35.83[A]이며, C상은 36.57[A]까지 상승함에 따라 동작됨을 확인할 수 있었다.

감극과 가극결선인 그림 4와 6을 비교했을 때, 1선 지락사고에 따른 선로전류 크기가 자속구속형 전류제한기의 구조적인 특징에 의해 가극결선으로 할 경우가 더 많이 제한됨을 확인할 수 있었다. 이는 자속이 증가하는 구조인 가극결선시 각 상의 리액터 코일에 인가되는 전압이 감극결선에 비해 빠르게 인가됨으로써, 감극결선의 3상 시스템보다 동작속도가 빨라져 각 상에 연결된 한류소자를 모두 퀘치시키는데 요구되는 적정시간 안에 신속하게 동작되기 때문이다.

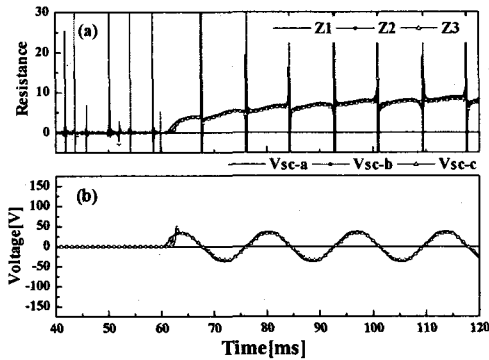


그림 6. 3상시스템에서 소저항과 전압파형
 Fig.6. The resistance and current waveform in a three-phase system
 a) Generated resistances each phase
 b) Generated voltages each phase

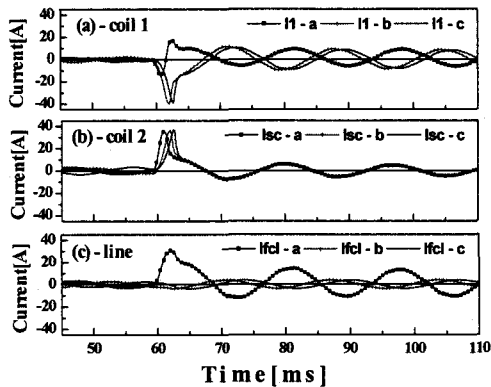


그림 7. 3상시스템에서 가극결선에 따른 전류파형
 Fig.7. The current waveform in additive polarity winding in a three-phase system
 a) The currents of the primary coils
 b) The currents of the secondary coils
 c) The line currents each phase

또한, 가극결선인 경우 한류작용이 3개 한류소자에서 의해 작용됨에 따라, 3개의 한류소자에서 발생하는 평균저항이 약 $3.73[\Omega]$ 로 동일한 실험조건에서 감극결선인 a상의 한류소자 저항은인 $6.74[\Omega]$, b상의 $7.15[\Omega]$ 보다 적게 발생된다. 따라서 가극결선이 3상에서도 한류소자의 부담이 줄이는 구조이므로, 소자파손의 우려가 적을 것으로 사료된다.

3. 결론

본 논문에서는 설계학적인 구조로써 3상 시스템에서 각상의 리액터를 1차측과 2차측 코일의 극성방향을 달리하여 3상 일체화된 자속구속형 전류제한기를 제작하

여 1선 지락사고에 대한 전류제한특성을 비교·분석하였다. 사고 발생시 동일한 자속매개체에 의하여 a상에서 발생한 사고전류가 다른 건전상의 리액터에 영향을 주어 각상의 2차측에 연결된 한류소자에 전압을 인가하여, 과도전류를 신속하게 제한하였다.

사고발생 후 자속구속형 전류제한기의 동작원리에 의해 감극결선과 가극결선에 따른 설계파라미터에 따른 각 상의 리액터에서 발생하는 자속이 다르기 때문에 3상 시스템에 연결된 각상의 리액터의 1차측, 2차측 코일의 통전전류의 제한시점에서 차이를 나타내었다. 감극결선시 c상을 제외하고 다른 상에서 켄치가 발생하여 사고전류를 제한하였으나, 가극결선에서는 3상에서 모두 켄치가 발생되어 자속구속형 전류제한기의 동작원리가 설계구조에 따라 달리 동작됨을 확인하였다. 그러나 더 높은 전원전압을 인가하게 되면, c상의 2차측 코일에도 임계전류이상의 전류가 흐르게 되어, 결선구조와 관계없이 모든 상의 한류소자의 켄치를 유도할 수 있을 것이다. 사고전류를 제한함에 있어서, 3상에서 모두 켄치가 될 경우 한류소자에서 발생하는 저항의 크기가 줄어들기 때문에 과증되는 부담이 양분되어져 한류소자의 보호측면에서 보다 유리함을 실험을 통해 확인하였다.

사고초기 제한되는 선로전류의 응답특성은 사고상인 a상에서만 나타남에 따라 건전상의 한류소자가 사고전류를 제한하는 동작을 보였음에도 3상 일체화된 자속구속형 전류제한기가 제한기로서 정상적으로 작동됨을 알 수 있었다. 이에 따라 하나의 강자성체 철심을 3상 시스템에 적용함으로써 1선 지락사고에도 자속구속형 전류제한기가 효율적으로 동작했음을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] 김준환, 이강원, "전력계통, 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, pp.19~31, 1998.
- [2] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성, "자속구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교", 전기전자재료학회논문지, Vol.18, No.4, p.365, 2005.
- [3] Sung-Hum 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, 2004
- [4] T. Matsumura, T. Uchii and Y. Yokomizu, "Development of flux-lock-type fault current limiter with high-Tc superconducting element", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol.7, No.7, p.1001, 1996.