

비대칭 고장전류 저감을 위한 초전도 한류기 동작 분석

이상봉*, 김철환*, 김규호**, 김재철***, 현옥배****
 성균관대학교*, 안산공과대학**, 송실대학교***, 한전전력연구원****

Asymmetry Components Reduction using Superconducting Fault Current Limiter Operation in Transient Period

Sang-Bong Rhee*, Chul-Hwan Kim*, Kyu-Ho Kim**, Jae-Chul Kim***, Ok-Bae Hyun****
 Sungkyunkwan University*, Ansan College of Technology**, Soong-Sil University***, KEPRI****

Abstract - This paper presents a novel scheme for reducing an asymmetry current with SFCL (Superconducting Fault Current Limiter) operation during transient period, when a fault occurs in power systems. The main idea is installation an auxiliary SFCL with characteristics, which reduces the asymmetry fault current in first half cycle before the operating of main SFCL. For proper activities of SFCLs, the principle of asymmetry current nature is reviewed. A scheme of asymmetry components reduction with SFCL is then explained. The EMTP/ATPDraw model of SFCLs using MODELS language developed and simulated to verify the performance and effectiveness.

1. 서 론

전력에너지의 사용 증가로 인해 전력계통은 더욱 대용량화 되고 있으며 특히, 배전계통의 경우에는 부하의 지속적 증가와 분산전원을 비롯한 전원의 다원화로 인해 규모의 증대와 더불어 계통 구성의 복잡성을 더해가고 있는 실정이다. 이러한 변화는 계통 사고 시 고장전류의 크기를 증가시키는 원인이 되어 기존 보호기기의 차단용량을 초과하므로 더 높은 차단 능력을 갖는 새로운 차단기로의 교체뿐만 아니라 전체 계통 설비의 개선이 요구된다[1].

전력계통의 고장 시 고장전류의 크기를 제한하는 한류기는 고용량의 계통에서 우선적으로 선택되는 보호기기이며 특히, 최근에 활발히 연구되고 있는 초전도 한류기 (Superconducting Fault Current Limiter : SFCL)의 경우에는 정상상태에서의 무 임피던스를 갖는 장점으로 계통 적용에 대한 관심이 높아지고 있으며 새로운 보호설비 대안으로 인식되고 있다. 초전도 한류기는 정상운전 시 무 임피던스로 인해 정상운전 시 계통에 영향을 주지 않으나 사고와 같은 계통 외란 시에는 초전도 상태 이탈로 임피던스를 발생시켜 사고전류를 제한하게 된다. 따라서 기존 상전도 한류기의 장점 외에 평소 무손실로 계통 운용이 가능한 장점을 갖고 있다[2].

고장전류 제한 목적을 갖는 초전도 한류기의 적용에 있어서 계통의 적용 시 중요한 고려사항은 초전도 한류기의 동작특성 분석이다. 특히, 초전도 한류기가 켜짐(Quenching) 되어 상도체화 된 경우에서의 임피던스는 고장 전류를 제한하는 직접적인 물리량으로 계통에서의 최대 고장 전류를 고려하여 결정하게 된다. 이때, 계통의 최대고장 전류는 일반적으로 전력계통의 가장 큰 사고인 3상 단락고장을 고려하여 계통내 구성되어진 보호기기의 차단용량과 비교하고 이 값을 넘지 않도록 초전도 한류기의 임피던스를 결정하게 된다. 그러나 3상 단락고장과 같은 계통의 고장전류특성은 고장시점 및 계통조건에 따라 그 크기나 파형의 모양이 다른 양상으로 나타나게 된다. 계통의 고장전류는 조건에 따라 초기에 dc 성분이 포함되며 심한 경우 정상고장전류의 약 2배 이상으로 최고값이 상승하게 된다[3].

따라서, 본 연구에서는 계통의 초전도 한류기 적용에 있어서 이러한 고장전류 양상에 따른 초전도 한류기의 동작특성을 다르게 설정하도록 하는 방법을 제안 하였고 EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)를 이용해 모의 시험하였다.

2. 고장전류 특성

2.1 비대칭 고장전류

계통에 고장이 발생하면 고장시 계통 및 고장 조건에 따라 고장전류의 양상도 다르게 된다. 특히, 계통의 유도성분은 고장이 발생한 직후의 과도상태에서 시간축 대칭이 아닌 전류의 진동을 일으키며 일정시간 이후 소멸하는 특성을 유발하게 되며 이를 비대칭 고장전류(asymmetry fault current)라 한다. 비대칭 전류는 시간축에 대칭인 교류성분(ac component)과 시간에 따라 소멸하는 직류성분(dc component)로 구성

되며 교류성분 전류의 offset을 유발한다. 이때, offset의 정도는 사고시 계통의 X/R의 비와 위상각에 그 값이 결정된다. 저항과 인덕터가 연결된 series R-L회로에서의 전류는 전류에 관한 미분방정식의 해로 구할 수 있고 식 (1)과 같다[4].

$$i(t) = i_{ac}(t) + i_{dc}(t) \tag{1}$$

$$= \frac{\sqrt{2} V}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta)e^{-t/T}]$$

where,

전원전압 : $v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \alpha)$, α : 사고시 전원위상
 $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$, $T = X/R$

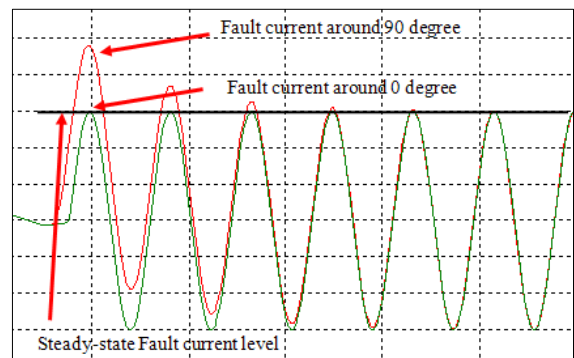
식 (1)에서와 같이 고장전류의 크기는 ac성분을 기본으로 해서 dc성분에 의한 offset 정도에 따라 그 크기가 결정된다. Offset 정도는 회로의 저항, 리액턴스, 사고시 전원위상에 따라 결정된다.

2.2 비대칭 고장전류 크기

비대칭 고장전류의 과도시간에서의 크기는 dc 성분의 크기와 직접적인 관계를 갖으며 회로의 저항과 리액턴스 값이 정해진 경우 범위는 식 (2)에서와 같이 0에서부터 $\sqrt{2}|i_{ac}|$ 이다.

$$i_{dc} = \begin{cases} 0, & \text{when } \alpha = \theta \\ \sqrt{2} \frac{V}{Z}, & \text{when } \alpha = (\theta \pm \frac{\pi}{2}) \end{cases} \tag{2}$$

따라서, dc 성분은 고장 발생시의 위상과 밀접한 관계를 가지므로 본 연구에서는 이를 이용해 예상 고장전류의 크기를 추정하고 초전도 한류기의 동작을 결정하였다. 즉, 고장시점에서의 위상을 계산하여 식 (2)를 이용해 예상 고장전류의 크기를 결정하고 과도상태에서의 고장전류 제한을 위한 초전도 한류기의 투입 임피던스를 결정하였다.



<그림 1> Fault Currents According to Fault Angle

그림 1은 고장전류의 파형을 나타내는데 고장 발생시의 위상에 따라 그 크기가 결정됨을 알 수 있다. 즉, 회로의 저항, 리액턴스 성분을 무시하는 경우 전류의 위상을 기준으로하는 경우 90도 일 경우 최대 고장전류, 0도일 경우에는 steady-state 고장전류 값과 동일한 것을 확인할 수 있다. 따라서, 일반적인 초전도 한류기의 임피던스는 계통의 steady-state 고장전류를 기준으로 정하는데 이 같은 경우에는 고장 발생 후 과도시에 발생하는 비대칭 전류의 영향으로 계통내 보호기기에 큰 충격으로 작용 할 수 있다.

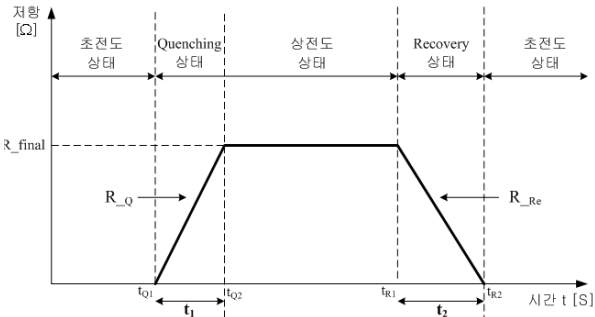
본 연구에서는 이러한 비대칭전류를 고려한 초전도 한류기의 동작 특

성을 제안하였다.

3. 비대칭 고장전류를 고려한 초전도 한류기 동작

3.1 초전도 한류기

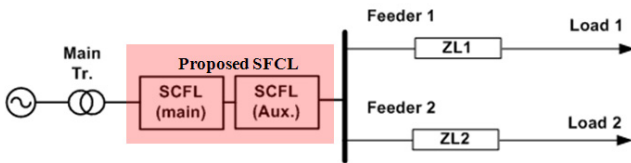
초전도 한류기는 상전도체로의 전이시 발생하는 임피던스의 종류에 의해 저항형과 유도형으로 구분할 수 있으며 본 논문에서는 사고시 발생하는 임피던스가 저항값만을 갖는 저항형 초전도 한류기의 특성을 분석하였다. 그림 2는 저항형 한류기의 동작특성을 나타낸다[5].



〈그림 2〉 An Operation Characteristic of SFCL

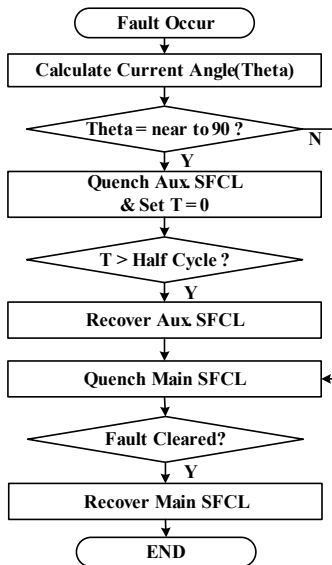
3.2 비대칭 고장전류를 고려한 초전도 한류기 동작

초전도 한류기의 비대칭 고장전류를 고려한 동작을 위해서 그림 3과 같은 방법을 사용하였다. 계통 사고시 비대칭 전류의 발생이 예상되는 경우 보조 초전도 한류기가 동작하여 과도시의 비대칭 전류를 제한하고 과도 상태 이후의 고장전류에 대해서는 메인 초전도 한류기를 적용하여 고장 전류를 제한하도록 하였다.



〈그림 3〉 Proposed SFCL Scheme

그림 4는 비대칭 고장전류 제한을 위한 초전도 한류기 동작 순서도이다. 보조 및 메인 초전도 한류기의 상호 동작을 위해 비대칭 고장전류 제한을 위한 보조 한류기의 동작은 고장 발생 후 1/2 싸이클만 동작하고 초전도 상태로 회복(recovery) 하도록 하였으며 이후 메인 초전도 한류기가 동작 하도록 하였다. 이때, 보조 초전도 한류기의 늦은 회복으로 남아 있는 저항값은 메인 초전도 한류기의 퀘칭시 발생하는 저항과 결합하여 고장전류의 크기를 제한하므로 보조 초전도 한류기의 회복 특성은 메인 초전도 한류기 보다 상당히 빠른 시간이 요구된다.

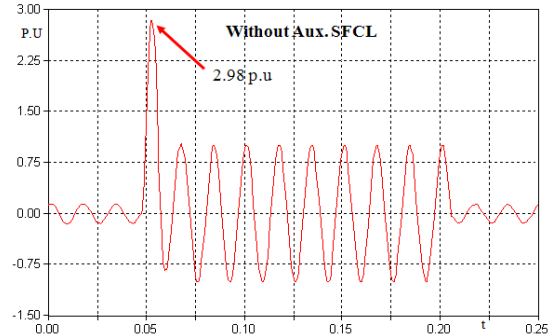


〈그림 4〉 Flowchart of SFCL Operation

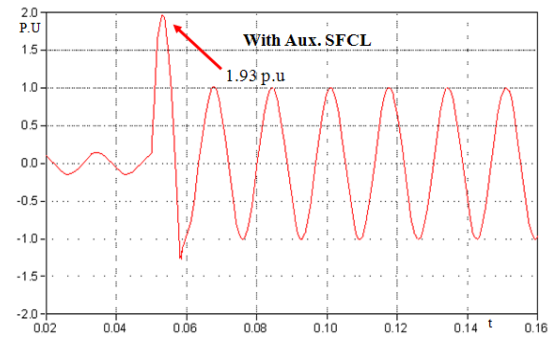
4. 모의시험

제안한 초전도 한류기의 비대칭 고장 전류제한 특성을 모의시험을 통해 확인 하였다. 고장은 1선지락 고장을 모의 하였으며 보조 및 메인 초전도 한류기의 경우 퀘칭시 저항은 2:1, 계통의 X/R비율은 6.6으로 설정하였고 그림 3의 알고리즘은 EMTP의 프로그래밍 언어인 MODELS를 이용하여 구현하였다.

모의 결과, 그림 5, 6에서와 같이 비대칭 고장전류에 대한 보조 초전도 한류기의 동작으로 고장전류의 크기를 제한 할 수 있었으며



〈그림 5〉 Fault Current (Without Aux. SFCL)



〈그림 6〉 Fault Current (With Aux. SFCL)

5. 결 론

본 연구에서는 계통의 고장시 발생하는 비대칭 고장전류 제한을 위한 초전도 한류기의 새로운 동작 특성을 제안 하였다. 이를 위해, 비대칭 고장전류의 발생 여부를 판단하고 비대칭 고장전류가 발생하는 경우 메인 초전도 한류기 투입 전에 우선 보조 초전도 한류기를 투입하도록 하여 고장전류를 제한하였고 모의시험을 통해 제안한 방법의 효율성을 확인 하였다.

향후, 비대칭 성분에 대한 보조 초전도 한류기의 발생 임피던스 결정, 계통의 X/R비율에 따른 비대칭 고장전류의 영향 등을 고려한 지속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글
본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술 개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Alex Y. Wh, Yuexin Yin, "Fault-Current Limiter Applications in Medium- and High-Voltage Power Distribution Systems", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 34, No. 1, Jan./Feb.,1998.
- [2] Michael Steurer, Klaus Frohlich, "CURRENT LIMITERS - STATE OF THE ART", Fourth Workshop & Conference on EHV Technology, July 1998.
- [3] Vladimir Sokolovsky, Victor Meerovich, Shaul Goren, Istvan Vajda, "Study of the Quench Conditions in Superconducting Current Limiters", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, Mar. 2001.
- [4] J. Ducan Glover, Mulukutra S. Sarma, "Power System Analysis and Design", BOOKS/COLE, 3rd ed., 2002
- [5] H.-R. Kim, S.-W. Yim, S.-Y. Oh, O.-B. Hyun, "Analysis on recovery in Au/YBCO thin film meander lines", Progress in Superconductivity, Vol. 9, No.1, pp.119-125, 2007.