

비대칭 고장전류 저감 기능을 갖는 초전도 한류기 동작 방안

(Operational Method of Superconducting Fault Current Limiter with Reduction Function of Asymmetric Fault Current)

김창환* · 서훈철 · 김규호 · 김철환 · 이상봉**

(Chang-Hwan Kim · Hun-Chul Seo · Kyu-Ho Kim · Chul-Hwan Kim · Sang-Bong Rhee)

Abstract

When fault currents contain decaying DC offset, the peak value of the fault current in the first cycle of the fault period is higher than the fault current during the steady-state period. To reduce the asymmetric fault current, this paper proposes an operation scheme using the series connection of two hybrid type Superconducting Fault Current Limiters (SFCLs) : an auxiliary SFCL and a main SFCL. The proposed method calculates the fault angle by comparing the zero-crossing time with fault detection time. According to the fault angle calculated, an auxiliary SFCL operates to reduce an asymmetric fault current during half a cycle after fault occurrence. After this process, the fault current is limited by a main SFCL. To confirm the usefulness of the proposed method, case studies using Electro-Magnetic Transients Program (EMTP)/Alternative Transient Program (ATP) Draw are performed.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter(SFCL), Asymmetric Fault Current, Fault Angle, Electro-Magnetic Transients Program(EMTP)/Alternative Transient Program(ATP) Draw

1. 서 론

우리나라는 급속한 산업발전으로 전력에너지 사용량이 증가함에 따라 전력 계통은 계통 간 연계 확대 및 분산 전원 도입 등 고품질, 신뢰성 향상을 위한 전원의 다원화가 진행되고 있다. 이러한 변화는 전력 계통의 총 임피던스를 감소시켜 고장 전류의 크기를 증가시키는 원인이 되어 고장 전류를 저감시키기 위한 다양한 방안들이 계통에 적용되어 왔다. 하지만 차단기 교체, 한류 리액터 설치 그리고 변압기 임피던스 제어 등의 방안들은 정상시에 손실 발생, 용량 증대에 따

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
* Main author : Dept. of Electrical Engineering at Yeungnam Univ. Master Course
** Corresponding author : Dept. of Electrical Engineering at Yeungnam Univ. Professor
Tel : 053-810-3097, Fax : 053-810-4767
E-mail : kranz@ynu.ac.kr
접수일자 : 2014년 7월 21일
1차심사 : 2014년 7월 23일
심사완료 : 2014년 9월 11일

른 교체 비용, 기술적 제약 및 신뢰도 하락 등의 문제점을 수반한다[1-2].

기존의 고장 전류 억제 방안들이 지닌 문제점을 해결하기 위하여 평상시 무 저항을 갖는 초전도 소자를 이용한 한류기를 계통에 적용하는 새로운 방안이 제시되었다. 초전도 한류기는 정상 운전 시 계통에 영향을 주지 않으나 사고 발생 시 초전도 소자의 퀘칭 발생에 따른 저항을 발생시켜 사고 전류를 제한하게 된다. 따라서 기존 방안들이 갖고 있는 문제점을 보완해 줄 수 있는 보호설비 대안으로 평가되어 현재까지 다양한 종류의 초전도 한류기가 연구 개발되고 있다 [3-6].

지금까지 개발된 초전도 한류기 중 하이브리드 초전도 한류기는 고장 발생 시 반주기 이내 및 이후에 동작하는 방식으로 크게 분류할 수 있다. 고장 발생 시 초전도 소자는 트리거의 역할만을 하고 병렬 연결된 한류 소자를 통해 고장 전류를 제한하도록 설계되어 초전도 소자의 부담을 줄일 수 있게 되어 회복 특성, 손실, 냉각 및 경제성 등의 부분에서 많은 장점을 가지고 있다. 특히 반주기 이후 동작 하이브리드 초전도 한류기는 현장에서의 보호협조가 용이하여 선호되는 방식이다[7-8].

일반적으로 하이브리드 초전도 한류기의 초전도 소자 및 한류 소자의 임피던스는 계통 내 구성된 보호기기의 차단용량 및 정상상태 고장전류를 고려하여 설계된다. 하지만 계통에 고장이 발생하게 되면 고장전류는 계통 조건 및 고장 발생 시점의 전원 위상에 따라 초기에 직류 성분이 포함된 비대칭 고장 전류(asymmetric fault current) 특성을 갖으며 그 크거나 파형이 다른 양상으로 나타나게 된다. 고장전류의 정상상태 크기만을 고려하여 설계된 초전도 한류기의 경우에는 고장 전류 크기에 따른 임피던스 조절이 용이하지 않아 실제 원하는 값으로 고장전류를 제한하지 못하는 경우도 발생하게 되어 계통 내 보호기기의 오·부동작을 초래하여 송전설비 밀도가 높은 우리나라의 경우 고장 시 과급효과가 커질 수 있다.

본 논문에서는 하이브리드 초전도 한류기의 전류제한 능력을 향상시키기 위하여 반주기 이내 및 반주기 이후 동작 초전도 한류기 2대를 직렬 연결하는 방법을

제안하고자 한다. 제안한 방법은 우선 고장 발생 시 고장 발생 각을 계산한다. 이를 기준으로 비대칭 고장 전류가 크게 발생하게 되는 0도 부근의 고장일 경우 반주기 이내 동작 초전도 한류기를 이용하여 비대칭 고장 전류를 즉시 저감시키고, 이후의 고장 전류에 대해서는 반주기 이후 동작 초전도 한류기를 이용하여 제한하는 방법이다. 본 연구의 타당성은 EMTP/ATP Draw를 이용한 모의시험을 통하여 입증하고자 한다.

2. 비대칭 고장 전류

2.1 비대칭 고장전류 특성

계통에 고장이 발생하면 고장 전류는 계통 및 고장 발생 시의 조건에 따라 그림 1과 같이 고장 발생 직후의 과도상태에서 시간 축에 대하여 대칭이 아닌 전류가 흐르게 되며, 이에 대한 영향으로 나타나는 전류를 비대칭 고장 전류라 한다.

비대칭 전류는 시간 축에 대하여 대칭인 교류 성분(ac component)과 고장 발생 직후의 과도 상태에서 시간 경과에 따라 진동 감쇠하며 소멸하는 직류 성분(dc component)으로 구성되어 있다. 저항과 인덕터가 연결된 직렬 R-L 회로에서의 고장전류는 전압 방정식에 관한 미분방정식의 해로 구할 수 있고 식 (1)과 같다[9].

$$i(t) = i_{accomponent}(t) + i_{dccomponent}(t)$$

$$= \frac{\sqrt{2} V}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{-t/\tau}] \quad (1)$$

여기서

$$v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \alpha), \alpha : \text{고장 발생 시점(각)}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \theta = \tan^{-1}(\omega L/R), \tau = L/R$$

식 (1)에서와 같이 고장 발생 시의 고장 전류는 직류 성분과 교류 성분으로 구성되며 직류 성분은 교류 성분 전류의 오프셋을 유발하며 오프셋의 정도는 계통

의 X/R 의 비와 고장 발생 시점의 전원 위상에 의해 결정된다.

2.2 비대칭 고장전류 크기

고장이 발생한 직후의 과도 상태에서, 직류 성분의 크기는 비대칭 고장전류의 크기를 결정하는 결정적인 요소이다. 회로의 저항과 리액턴스 값이 정해진 경우 고장 발생 시점에서의 전원 위상에 따라 그 크기 변화 범위는 식 (2)와 같아지게 된다.

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

그림 1은 전원 위상에 따른 고장 전류 양상을 나타낸 일반적인 파형이다. 고장 전류는 전압 위상각 기준 90도 고장인 경우 과도 진동이 존재하지 않게 되어 정상 상태 고장전류 값과 거의 동일하게 나타난다. 반면에 0도 고장일 경우 고장 초기에 발생하는 직류 오프셋 성분을 포함하게 되어 최초 1주기 내에서 고장전류의 과고치가 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

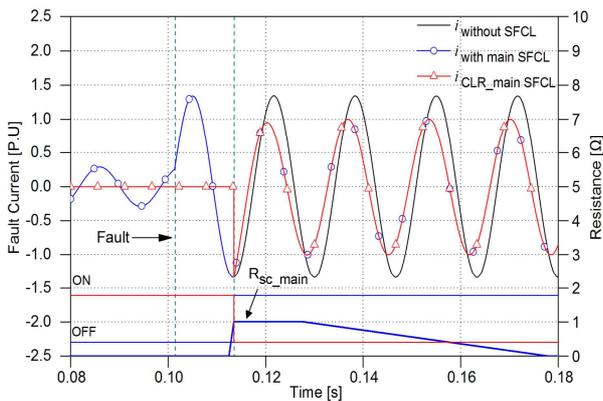


그림 1. 고장 각에 따른 고장전류 양상
Fig. 1. Fault current according to fault angle

따라서 계통의 X/R 비는 계통 고장 발생 지점 본연의 값이므로, 고장 발생 순간의 위상을 검출할 수 있다

면 고장 전류 중 직류 성분의 포함 여부를 알 수 있으므로 비대칭 고장전류의 크기를 예측할 수 있게 된다.

3. 초전도 한류기 동작 방안

3.1 초전도 한류기

하이브리드 초전도 한류기는 크게 초전도 소자, 고속 스위치 그리고 한류 소자 부분으로 구성되어 있다. 평상 시 초전도 소자와 고속 스위치를 통해서 정상 전류가 흐르고, 고장 발생 시 초전도 소자에 임계전류 이상의 전류가 흘러 켄치가 발생되면 고속 스위치가 동작하여 병렬로 연결된 한류 소자로 전류를 우회시켜 한류 임피던스에 의해 고장 전류를 제한하는 동작 특성을 가진다. 투입되는 시기에 따라 고장 발생 반주기 이내 및 이후 동작을 하는 두 가지 종류로 나눌 수 있다. 초전도 소자는 고장 발생 시 트리거 역할만을 하므로 저항형 초전도 한류기에 비해 초전도 소자의 사용량을 상대적으로 저감시킬 수 있어 회복 시간, 소형화, 경제성 등의 부분에서 많은 장점을 가지고 있다.

3.2 비대칭 고장전류를 고려한 보조 초전도 한류기 동작 방안

2.2에서 살펴본 바와 같이 고장 전류는 고장 발생 각에 따라 그 크기가 정해지며, 고장 발생 시 최초 1주기 내의 비대칭 고장 전류의 크기가 가장 크게 나타난다.

메인 초전도 한류기로서 반주기 이후 동작 하이브리드 초전도 한류기를 투입할 경우 고장 발생 최초 1주기 내의 비대칭 고장전류 크기를 직접적으로 제한하지 못하는 동작 특성을 가지고 있다. 반면에 반주기 이내 동작 하이브리드 초전도 한류기를 투입할 경우 고장 발생 최초 1주기 내의 비대칭 고장전류의 크기를 한류 소자가 직접적으로 제한하게 되므로 제한된 고장 전류와 정상 상태에서의 부하 전류를 구분할 수 없게 되어 차단기 등의 보호기기 오·부동작을 유발하는 경우도 발생하게 된다.

본 연구에서는 기존의 하이브리드 초전도 한류기가

지난 비대칭 고장 전류 제한 능력을 향상시키기 위한 방안을 제안하였다. 제안한 방법은 그림 2와 같이 반주기 이내 동작 하이브리드 초전도 한류기를 보조 초전도 한류기로, 반주기 이후 동작 하이브리드 초전도 한류기를 메인 초전도 한류기로 설정하여 2대의 한류기를 계통에 직렬로 설치하여 상호 동작 알고리즘을 통한 비대칭 고장 전류 저감 방안을 수립하였다.

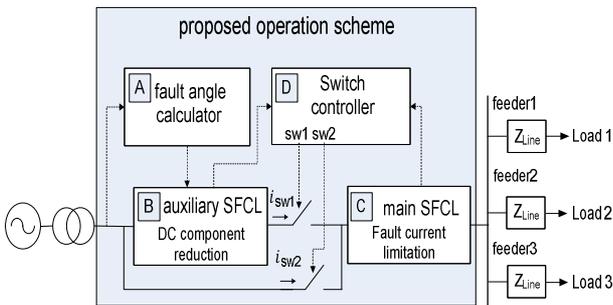


그림 2. 초전도 한류기 동작 방안
Fig. 2. Operation scheme of SFCLs

초전도 한류기 동작 방안은 그림 2와 같이 크게 고장 각 검출부(A), 보조 초전도 한류기(B), 메인 초전도 한류기(C), 스위치 제어부(D) 등 4개의 부분으로 구성되어 있다. 고장 각 검출부는 정상 운전이 이루어지는 동안 전압 파형의 영교차 시각(zero-crossing time)을 기록하며, 고장 발생 시 검출된 시각의 데이터와 비교하여 고장 발생 각을 계산하는 역할을 수행한다. 직류 오프셋 성분을 가지는 비대칭 고장 전류 발생 각의 범위를 0도에서 45도로 설정한 다음, 고장 각 검출부에서 계산된 각도가 위 범위에 해당될 시 보조 초전도 한류기가 계통에 우선 투입되어 고장 발생 초기 반주기 동안만 동작하여 비대칭 고장전류를 즉시 제한하는 역할을 수행한다. 이후 메인 초전도 한류기가 켜지면 스위치 제어부에 의해 스위치(SW1, SW2)가 동작하여 보조 초전도 한류기는 초전도 상태로 회복하고 이후의 고장 전류에 대해서는 메인 초전도 한류기를 이용하여 제한하도록 하였다. 만약 고장 각 검출부에서 계산된 각도가 위 범위에 해당되지 않을 시 보조 초전도 한류기는 동작하지 않으며 메인 초전도 한류기만이 동작하여 고장 전류를 제한하도록 설정하였다.

상기 동작 알고리즘을 회로 소자로 구현하기 위하여 EMTP 내의 프로그래밍 언어인 MODELS를 이용하였고, 4장의 모의 계통에 투입하여 사례 연구를 진행하였다.

4. 사례 연구

제안한 초전도 한류기의 비대칭 고장 전류 저감 방안을 적용하기 위한 모의 계통은 그림 3과 같다. 계통 사고는 일반적으로 계통에서 가장 많이 발생하는 1선 1지락 고장을 피더 1 부하 측에 모의하였으며 고장 저항은 1Ω으로 가정하였다. 모의 시 계통 파라미터, 보조 및 메인 초전도 한류기의 데이터는 표 1과 같다.

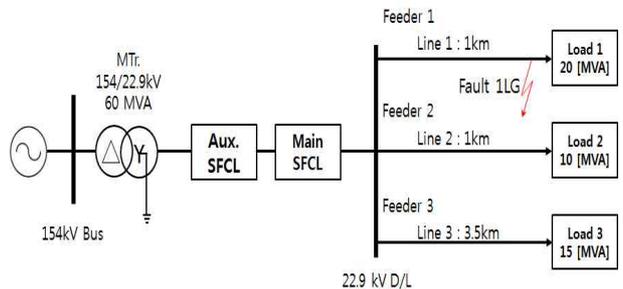


그림 3. 모의 계통 구성도
Fig. 3. Test system

표 1. 모의 계통 파라미터
Table 1. Test system parameters

주변압기	154/22.9kV-Y, 60MVA, %Z=20	
선로	0.182+j0.391Ω/km Z _{Line1} , Z _{Line2} = 1km Z _{Line3} = 3.5km	
부하	Load1 : 19.0+j6.2MVA Load2 : 9.5+j3.1MVA Load3 : 14.3+j4.7MVA	
	Aux. SFCL	Main SFCL
동작 전류	2,000Arms	2,000Arms
초전도소자	1Ω	1Ω
한류 저항	2Ω	2Ω
퀵칭 시간	0.1ms	1ms
회복 시간	50ms	50ms

비대칭 고장전류 저감 기능을 갖는 초전도 한류기 동작 방안

표 2는 모의 조건을 나타낸다. 동일한 모의 계통에 대하여 초전도 한류기가 설치되지 않은 경우, 메인 초전도 한류기만 설치된 경우 그리고 본 논문에서 제안하는 보조 및 메인 초전도 한류기가 설치된 경우에 대한 모의 조건을 나타낸다. 이 때 비대칭 고장 전류 발생에 따른 영향을 분석하기 위하여 고장 발생 각 0도와 90도에서의 고장을 각각 모의하였다.

표 2. 모의 조건
Table 2. Test conditions

조건 Case	SFCL	고장 발생각
Case 1	without SFCL	90°
Case 2	without SFCL	0°
Case 3	Main SFCL	90°
Case 4	Main SFCL	0°
Case 5	with proposed SFCLs (Aux.SFCL+Main_SFCL)	90°
Case 6	with proposed SFCLs (Aux.SFCL+Main_SFCL)	0°

그림 4는 모의 조건 case 1과 3에 대한 모의 결과이며, 그림 5는 모의 조건 case 2와 4에 대한 모의 결과를 나타내고 있다.

초전도 한류기를 적용하지 않은 case 1과 2의 경우 정상 상태 고장 전류 파고치는 1.3pu로 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 고장 발생 최초 1주기 내의 고장 전류 파고치는 고장 발생각이 90도인 경우 1.3pu로서 정상 상태 고장 전류 파고치와 동일함을 확인할 수 있다. 반면에 고장 발생각이 0도인 경우 2.1pu로서 90도 고장 전류보다 약 1.6배 크게 나타남을 알 수 있다.

메인 초전도 한류기만을 적용한 case 3과 4의 경우 반주기 이후 동작하여 정상 상태 고장 전류 파고치를 1.3pu에서 1.0pu로 동일하게 제한함을 알 수 있다. 또한 고장 발생 최초 1주기 내의 고장 전류 파고치는 고장 발생각이 90도인 경우 1.3pu, 고장 발생각이 0도인 경우 2.1pu로 나타났으며, 이는 case 1과 2의 고장 전류 파고치와 동일함을 확인할 수 있다.

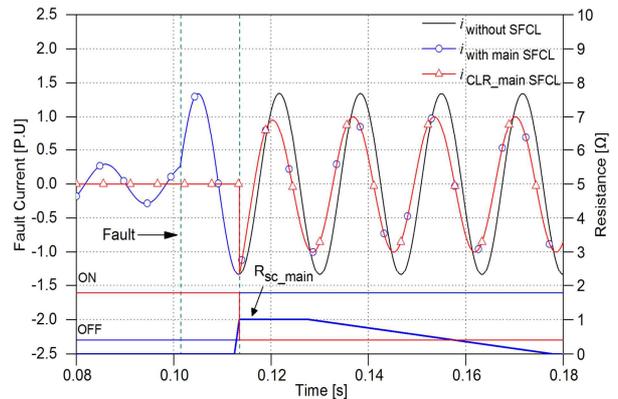


그림 4. case 1, 3 모의 결과
Fig. 4. Simulation results of cases 1 and 3

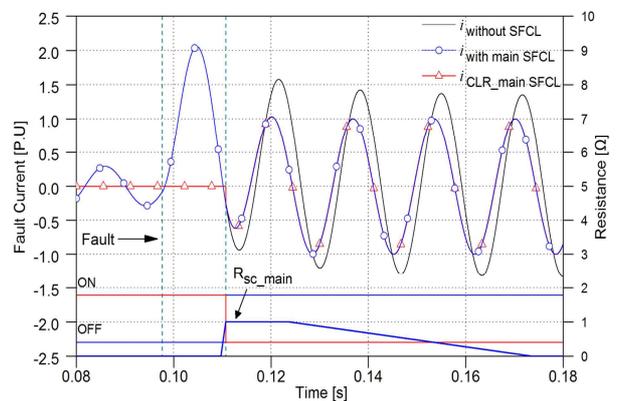


그림 5. case 2, 4 모의 결과
Fig. 5. Simulation results of cases 2 and 4

그림 6과 7은 보조 초전도 한류기와 메인 초전도 한류기를 적용한 모의 조건 case 5와 6에 대한 모의 결과를 나타낸다. 먼저 그림 6은 고장 발생 각 90도인 경우로서 고장 각 검출부의 동작 설정 범위를 만족하지 않으므로 보조 초전도 한류기의 동작이 비활성화 상태로 유지되어 고장 발생 최초 1주기 내의 비대칭 고장 전류 파고치가 1.3pu로 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 고장 발생 반주기 이후에는 메인 초전도 한류기만 동작하여 고장전류의 크기를 제한하게 되며, 이때 제한된 고장 전류는 1.0pu로서 case 2와 동일함을 확인할 수 있다.

그림 7은 모의 조건 case 6의 모의 결과를 나타낸다. 고장 발생 각 0도인 경우, 고장 각 검출부의 동작 설정 범위를 만족하므로 보조 초전도 한류기의 초전도 소

자가 켜치되고 고속 스위치가 동작하여 한류 저항에 의해 최초 1주기 내의 비대칭 고장전류의 크기를 1.4pu로 제한함을 확인할 수 있다. 그리고 반주기 이후 메인 초전도 한류기의 초전도 소자가 켜치되면 스위치 제어부에 의해 보조 초전도 한류기는 초전도 상태로 회복하게 되고, 메인 초전도 한류기의 한류 저항에 의해 고장 전류의 크기가 1.0pu로 제한됨을 확인할 수 있다.

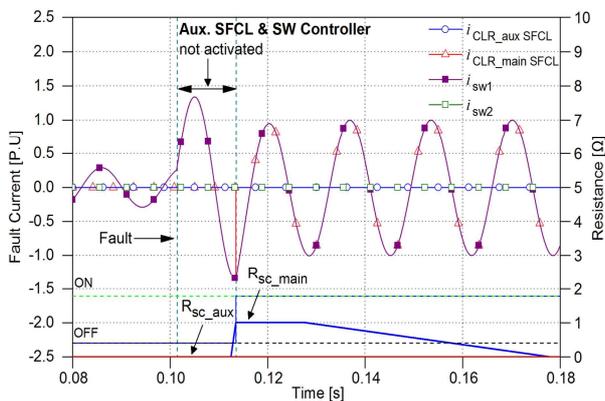


그림 6. case 5 모의 결과
Fig. 6. Simulation results of case 5

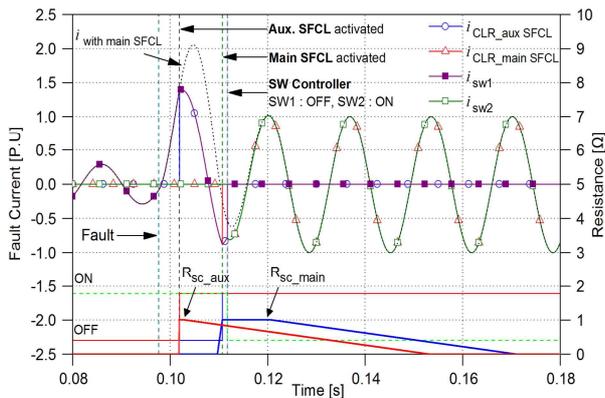


그림 7. case 6 모의 결과
Fig. 7. Simulation results of case 6

모의 조건 case 4와 6의 0도 고장의 경우 비대칭 고장 전류의 파고치는 보조 초전도 한류기 도입 전 약 2.1pu에서 도입 후 약 1.4pu로 30% 가량 저감된 것을 확인할 수 있다. 그리고 보조 초전도 한류기 도입 전인 case 4와 도입 후인 case 6의 메인 초전도 한류기

동작 시간이 동일함으로 보조 초전도 한류기 도입으로 인한 보호기기의 오·부동작 및 과전류 계전기의 재정정을 최소화시킬 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 계통에 고장 발생 시 비대칭 고장전류의 저감을 위한 보조 초전도 한류기와 메인 초전도 한류기의 상호 동작 방안을 제안하였다. 우선 비대칭 고장전류의 특성과 구성 요소를 확인하여 초전도 한류기의 동작으로 이를 저감할 수 있는 방안을 모색하였다. 이를 통해 정상 상태에서의 영 교차점과 고장 검출 시각을 비교함으로써 고장 발생 각을 계산하였고 보호기기의 오·부동작 및 기계적 손상을 초래할 것으로 예상되는 고장 발생 각 범위를 선정하여 보조 초전도 한류기를 메인 초전도 한류기보다 우선적으로 투입하여 최초 1주기 내의 비대칭 고장전류를 제한하는 방안을 제안하였으며, EMTP/MODELS를 이용한 모의시험을 통해 제안한 방법의 타당성 및 유용성을 확인하였다.

모의 결과에서 나타나는 바와 같이 고장 발생 각 계산을 통한 보조 초전도 한류기 동작 방법으로 접근한 비대칭 고장전류 저감 방안은 계통에 연결된 기기들의 손상을 방지하고, 보호기기의 정상 동작 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 본 연구에서의 동작 방안을 기초 자료로 활용하여 과전류 계전기 및 재폐로 차단기와와의 보호협조에 관한 후속 연구를 진행할 계획이다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2013년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

[1] S. B. Rhee, C. H. Kim, K. H. Kim, J. C. Kim, O. B. Hyun, "An Analysis of Superconducting Fault Current Limiter Operation According to Asymmetry Fault Current", Trans KIEE, vol. 58, No. 3, pp.450-454, 2009.
[2] M. G. On, M. H. Kim, J. S. Kim, I. K. You, S. H. Lim, J. C. Kim, "A Study on the Application of SFCL on 22.9 kV

Bus Tie for Parallel Operation of Power Main Transformers in a Power Distribution System”, Trans. KIEE, vol. 60, No. 1, pp.20-25, 2011.

[3] B. W. Lee and S. B. Rhee, “Test requirements and performance evaluation for both resistive and inductive superconducting fault current limiters for 22.9 kV Electric Distribution Network in Korea”, IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 20, No. 3, pp.1114 - 1117, Jun. 2010.

[4] S. H. Lim, “Operational Characteristics of Flux-Lock Type SFCL With Series Connection of Two Coils”, IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol.17, No.2, pp.1895-1898, June 2007.

[5] B. W. Lee, K. B. Park, J. Sim, I. S. Oh, H. G. Lee, H. R. Kim, O. B. Hyun, “Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters”, IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol.18, No.2, pp.624-627, June 2008.

[6] O. B. Hyun, J. W. Sim, H. R. Kim, K. B. Park, S. W. Yim and I. S. Oh, “Reliability Enhancement of the Fast Switch in a Hybrid Superconducting Fault Current Limiter by Using Power Electronic Switches”, IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 19, No. 3, pp.1843-1846, June. 2009.

[7] J. S. Kim, S. H. Lim, J. C. Kim, J. S. Choi, “Analysis on Current Limiting Characteristics of a Hybrid SFCL with the First Half Cycle Limiting Operation Due to Resistance of Superconducting Element”, Trans. KIEE, vol. 60, No. 10, pp.1817-1822, 2011.

[8] G. H. Lee, K. B. Park, J. Sim, Y. G. Kim, I. S. Oh, O. B. Hyun, B. W. Lee, “Hybrid Superconducting Fault Current Limiter of the First Half Cycle Non-Limiting Type”, IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol.19, No.3, pp.1888-1891, June 2009.

[9] Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J., “Power System Analysis and Design”, CI-Engineering, 5th ed., 2011.

◇ 저자소개 ◇



김창환(金蒼煥)
2013년 영남대학교 전기공학과 졸업.
2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



서훈철(徐熏徹)
2004년 성균관대 정보통신공학부 졸업.
2006년 동 대학원 정보통신공학부 졸업(석사). 2013년 동 대학 정보통신대학 졸업(박사). 2013년 9월~2014년 1월 영남대학교 박사 후 연구원. 2014년 3월~현재 연암공업대학 조교수.



김규호(金圭浩)
1988년 2월 한양대 전기공학과 졸업.
1990년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 3월 안산공과대학 전기과 부교수. 2008년 9월~현재 국립환경대학교 전기공학과 부교수.



김철환(金喆煥)
1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수, 전력IT인력양성센터 센터장.



이상봉(李相奉)
1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2012년~현재 영남대학교 전기공학과 조교수.