반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작 특성 분석

논 문

60-2-2

Analysis on Operation Characteristics of Hybrid Superconductor Fault Current Limiter(SFCL) with First Half Cycle Non-Limiting Operation

유 일 경* · 김 진 석** · 김 명 후* · 임 성 훈† · 김 재 철*** · 최 종 수§

(Il-Kyoung You · Jin-Seok Kim · Myoung-Hoo Kim · Sung-Hun Lim · Jae-Chul Kim · Jong-Soo Choi)

Abstract - Due to large demand, the increase of fault current has caused the capacity of power machines in power grid to increase. Among several countermeasures, the superconducting fault current limiter (SFCL) has been noticed as one of the promising countermeasures to solve these problems. However, in spite of excellent current limiting performances of the SFCL, the application of SFCL to power system has been delayed due to both the limited space for the SFCL's installation and its longer recovery time after the fault removal. In order to solve these problems, a hybrid type SFCL was developed.

In this paper, we studied the operation characteristics of the hybrid SFCL with first half cycle non-limiting operation by modelling using PSCAD/EMTDC and experiment. It was shown through the simulation using PSCAD/EMTDC and the simulated experiment that the fault current limiting and the fast recovery operations of the hybrid SFCL with the first half cycle non-limiting operation were achieved.

Key Words : Superconducting fault current limiter, Hybrid, After half cycle, Recovery, PSCAD/EMTDC

1. 서 론

지속적인 전력수요와 분산전원이 증가됨에 따라 대용량 전력공급을 위해 송·변전설비의 확충과 용량증대가 요구되고 있다. 용량의 증가는 단락고장으로 인한 고장전류 증가를 야기시켰다. 고장전류의 증가는 전력계통 설비들과 전력계통의 안정도에 문제를 야기할 수 있으며, 특히 고장 발생시 고장전류가 기존에 설치된 차단기 및 보호기기의 차단 용량을 초과하여 교체가 불가피하다. 기존 고장전류 제한 방법은 선로 차단, 한류 리액터 설치와 같은 방법들을 이용하여 왔지만 비용 측면이나 전력공급 손실 및 계통 안정도 측면에서 문제점을 가지고 있다 [1-3]. 이러한 이유로 고장 전류를 제한하기 위해 많은 연구가 지속되고 있고 초전도 전류제한기를 적용하는 방법은 고장전류 저감을 위한 좋은 대안 중의 하나로서 제시되고 있다 [4-6].

전력계통에서의 초전도 전류제한기는 계통의 단락사고로 인한 고장전류 발생시 고장전류를 제한해준다 [7-8]. 실제적으로 계통에 적용 가능한 초전도 전류제한기의 개발은 막대한 초전도 소자 및 냉각 비용 뿐만 아니라 상업적 실용화 난점과 기술적인 어려움으로 가능성이 불투명한 실정이라

할 수 있다. 또한 초전도 전류제한기는 이상적인 전류제한 특성을 가지고 있지만, 초전도 소자의 회복 특성 한계로 인해 재폐로 동작을 만족하기가 어려워 실제 전력계통 적용시 기존 설치된 계전기 및 차단기들과의 협조문제를 해결하기가 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해 하이브리드 초전도 전류제한기가 제안되었다 [9-10].

하이브리드 초전도 전류제한기는 초전도 소자가 고장전류를 감지해서 트리거하는 역할만 담당하기 때문에 초전도 소자의 부담이 기존 초전도 전류제한기에 비해 줄어들어 회복 특성, 교류손실, 냉각 및 경제성 등에 대하여 많은 장점을 가지고 있어 실용화를 위한 실증시험 단계에 있다. 하이브리드 초전도 전류제한기는 구조에 따라 반주기 이내 동작과 반주기 이후 동작을 하는 두 가지 종류가 있다. 이 중에서 반주기 이후 동작방식의 하이브리드 초전도 전류제한기는 고장 후 반주기 뒤에 고장전류를 제한하기 때문에 순시 사고에 대한 보호협조 대안으로 제시되고 있다 [11].

본 논문에서는 반주기 이후 동작 하이브리드 초전도 전류제한기를 PSCAD/EMTDC와 모의실험을 통하여 전류제한 특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기 구조 및 동작 특성

2.1.1 기본구조

반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 기본 구조

* 준 회 원 : 숭실대 공대 전기공학부 석사과정

** 정 회 원 : 숭실대 공대 전기공학부 박사과정

*** 펠로우회원 : 숭실대 공대 전기공학부 교수 · 공박

§ 정 회 원 : 한국전기안전공사 · 공박

† 교신저자, 정회원 : 숭실대 공대 전기공학부 교수 · 공박

E-mail : superish73@ssu.ac.kr

접수일자 : 2010년 7월 8일

최종완료 : 2011년 1월 4일

는 그림 1과 같다. 그림 1에서 초전도 소자(SC)는 고장전류를 감지하는 역할을 한다. 구동코일(Driving coil)은 전류에 의해서 발생한 전자력으로 고속스위치(SW₁, SW₂)를 동작 시킨다. 전류제한소자(CLR)는 저항형과 유도형으로서 고장 전류를 제한하는 역할을 한다.

그림 1 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 회로
Fig. 1 Circuit of hybrid type SFCL with first half cycle non-limiting operation

2.1.2 동작원리

반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기는 정상상태에서는 초전도 소자와 SW₂를 통해서 전류가 흐르고, 고장이 발생한 경우에는 초전도 소자에 임계전류 이상의 전류가 흘러 저항이 발생한다. 발생된 저항으로 인해 구동코일로 대부분의 전류가 흐르게 되고, 구동코일로 흐르는 전류에 의해서 발생한 전자력으로 고속스위치가 동작을 한다. 이때 고속스위치 위 접점의 스위치(SW₁)가 닫히고 반주기 이후 SW₂에 흐르는 전류가 0이 되는 시점에 고속스위치의 아래 접점의 스위치(SW₂)가 개방된다. 이 동작이 완료 되면 반주기 이후 고장전류는 CLR로 흘러 고장전류를 제한한다.

2.2 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기 모델링

2.2.1 초전도 소자 모델링

초전도 소자는 정상상태에서는 영 저항을 유지하고, 임계 전류 이상의 전류가 흐를 경우 초전도 소자가 켜치되어 저항이 발생한다. 이후 임계전류 이하의 전류가 흐를 경우 초전도 소자가 회복되고, 이러한 현상을 모델링하였다 [12]. 식 (1)은 초전도 소자의 동작특성을 나타낸다.

R₀는 켜치발생시 수렴하는 상전도 저항, T_F는 시정수를 나타내고 t_{fault}, t_{clear}, t_{2ndrecovery}는 각각 켜치 발생시간, 1차 회복시간, 2차 회복시간을 의미한다.

초전도 소자는 고장이 발생하여 고장전류가 임계전류 이상으로 흐르면 저항이 지수형태로 발생하고, 고장이 제거되면 a₁의 기울기로 1차 회복을 한다. 회복저항이 b₂이하가 되면 a₂의 기울기로 2차 회복을 한다.

$$R_{SC}(t) = \begin{cases} 0 & (t_{fault} > t) \\ R_0 [1 - \exp(-\frac{t - t_{fault}}{T_F})]^{\frac{1}{2}} & (t_{fault} \leq t < t_{clear}) \\ a_1(t - t_{clear}) + b_1 & (t_{clear} \leq t \leq t_{2ndrecovery}) \\ a_2(t - t_{2ndrecovery}) + b_2 & (t_{2ndrecovery} \leq t) \end{cases} \quad (1)$$

2.2.2 고속스위치 모델링

고속스witch는 2개의 a, b 접점과 접점을 동작시킬 구동코일로 구성된다. 구동코일을 저항과 리액터성분으로 구성하여 전자력이 기준치 이상 발생하면 위 접점을 동작하고 아래접점은 흐르는 전류가 0이 되는 순간 개방되도록 모델링 하였다.

2.2.3 회로구성

반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 PSCAD/EMTDC 해석모델의 회로구성은 그림 1의 기본구조를 고려하여 구현하였다. CLR의 부분은 저항형 또는 유도형을 사용하여 회로를 구성하였다. 본 논문에서는 저항형을 사용하였을 경우에 대해서 시뮬레이션 및 실험을 통해 분석하였다.

그림 2 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 모델링 회로

Fig. 2 Modeling circuit of hybrid type SFCL with first half cycle non-limiting operation

2.2.4 모델링 결과

본 해석모델의 동작 메카니즘을 검증하기 위해서, 시뮬레이션 결과 데이터를 분석하였다. 그림 1과 같이 전원, 선로, 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기, 그리고 부하로 회로를 구성하였다. 이때 고장을 부하 앞단에서 모의하여 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작 특성을 확인해 볼 수 있었다. 그림 3은 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기 모델링에 흐르는 전류 파형을 나타낸다. 고장 발생시 초전도 소자가 반주기 동안은 고장전류를 제한하지 않고, 반주기 이후부터 고장전류를 제한하는 것을 확인해 볼 수 있었다.

그림 3 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기모델링의 전류 파형

Fig. 3 Current wave of hybrid type SFCL with first half cycle non-limiting operation

그림 4는 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기 모델링의 동작특성을 나타낸다. i_{FCL} 는 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기에 흐르는 전체 전류, i_{SC} 는 초전도 소자에 흐르는 전류, i_a 는 위 접점에 흐르는 전류, i_d 는 구동코일에 흐르는 전류, i_{CLR} 은 CLR에 흐르는 전류, R_{SC} 는 초전도 소자의 발생 저항, S_{SW1} 은 위 접점 스위치 동작 신호, S_{SW2} 는 아래 접점 스위치 동작 신호를 나타낸다. 평상시에는 전류가 초전도 소자와 아래 접점으로 흐르다가 고장 발생시 고장전류로 인해 초전도 소자가 켜치되어 저항이 발생된다. 이때 고장전류가 구동코일에 흐르게 되고 전자기력이 발생되어 일정크기 이상의 전자기력이 발생되면 위 접점이 단락되고 아래 접점에 흐르는 전류가 0이 되면 접점이 개방된다. 고속스위치의 동작 이후 고장전류는 CLR에 흐르게 되어 고장전류를 제한하는 동작특성을 확인 할 수 있다.

그림 4 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기 모델링의 동작특성

Fig. 4 Operation characteristics of hybrid type SFCL with first half cycle non-limiting operation

2.3 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기 모의실험

2.3.1 모의실험 회로

그림 5는 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 모의실험을 위한 회로를 나타낸다. 모의실험 회로는 모델링 회로에서의 각각의 파라미터 값과 동일하게 구성하였으며 전원, 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기, 선로 임피던스, 부하 임피던스로 구성되었다. 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기를 동작시키기 위해서 고장을 부하 앞단(fault1 위치)에서 모의하여 실험을 실시하였다. 실제 실험에서는 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기를 구성 시 기계적 스위치를 대신하여 DSP와 전력용 스위치를 이용하여 구성하였다. 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작은 DSP를 통해 구동코일에 흐르는 전류를 센싱하여 일정 값 이상일 경우 각각의 스위치를 동작시키고, CLR에 흐르는 전류가 일정 값 이하일 경우에는 다시 스위치의 동작이 처음상태로 복귀되도록 설정하였다. 이때 각각의 설계변수는 표 1과 같이 구성되었다.

그림 5 실험 회로

Fig. 5 Experiment circuit

표 1 회로 설계변수

Table 1 Circuit parameter

선로	$R1+jL1$ [Ω]	$0.097 + j0.685$
부하	Load [Ω]	$41.20 \angle 2.62^\circ$

2.3.2 모의실험 결과

그림 6은 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 적용시와 미적용시에 대하여 전류 파형을 비교하여 나타낸다. 고장이 발생 후 고장전류가 증가하는데 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기를 미적용시 고장전류 제한해주지 않기 때문에 큰 고장전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 하지만 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기를 적용시 고장 발생 후 초기 반주기동안 고장전류를 제한하지 않고 반주기 이후 고장전류를 제한해주는 것을 확인할 수 있다. 이때 반주기 동안에 고장전류가 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 미적용시 보다 약간 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작 중에 초전도 소자의 켜치로 발생된 저항에 의한 고장전류 제한 특성이다. 이때 구동코일로 전류가 분기되는데 대부분의 전류가 구동코일로 흐르게 되지만 약간의 전류가 초전도 소자로 흐르게 되어 초전도 소자에 발생된 저항으로 인하여 SW_1 의 단락되기 전까지 전류가 제한되고,

SW₁이 단락된 이후에는 전력용 스위치 자체의 작은 저항으로 인해 전류가 제한되는 것처럼 보이는 것이다.

그림 6 전류 파형 비교

Fig. 6 Comparison of current wave

그림 7 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작 특성

Fig. 7 Operation characteristics of hybrid type SFCL with first half cycle non-limiting operation

그림 7은 실험을 통한 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작특성을 나타낸다. 위의 모델링과 같이 i_{FCL} 는 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기에 흐르는 전체 전류, i_{SC} 는 초전도 소자에 흐르는 전류, i_d 는 위 점점에 흐르는 전류, i_d 는 구동코일에 흐르는 전류, i_{CLR} 은 CLR에 흐르는 전류, R_{SC} 는 초전도 소자의 발생 저항, S_{SW1} 은 위 점점 스위치 동작 신호, S_{SW2} 는 아래 점점 스위치 동작 신호를 나타낸다. 고장 발생시 고장전류로 인해 초전도 소자가 켜치되어 저항이 발생되고 구동코일로 전류가 분기되어 흐른다. 이때 대부분의 전류가 구동코일로 흘러야 처음 반주기 동안 고장전류에 영향을 미치지 않는다. 구동코일에 흐르는 전류에 의해 일정값 이상의 반발력 발생으로 전력용 스위치가 동작하여 고장전류가 CLR 방향으로 흘러 CLR이 고장전류를 제한해준다. 이후 전력용 스위치의 동작으로 인해 초

전도 소자에 고장전류가 흐르지 않아 회복하게 되고 초전도 소자가 회복되면 초전도 소자에 다시 전류가 흐르게 된다. 이때 CLR에 의해 제한된 고장전류가 초전도 소자의 임계전류 보다 작아야 한다. 만약 제한된 고장전류가 임계전류를 넘을 경우 초전도 소자가 다시 켜치가 되어 저항이 발생된다.

그림 8은 저항형 초전도 전류제한기와 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 초전도 소자 V-I 곡선을 나타낸다. 저항형 초전도 전류제한기의 곡선을 보면 고장 발생시 V-I곡선의 기울기가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 초전도 소자에 저항이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 곡선의 기울기가 큰 것은 발생한 저항이 크고 그만큼 오랫동안 초전도 소자에 부담이 많이 가는 것을 확인할 수 있다. 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 V-I 곡선의 기울기를 보면 저항형 초전도 전류제한기 보다 완만한 기울기를 가지는 것을 볼 수 있다. 이것은 초전도 소자의 발생 저항이 작은 것을 확인할 수 있고, 기울기가 적게 생성되는 것은 그만큼 짧은 시간에 고장전류를 감지하고 회복되기 때문에 부담이 적은 것을 확인할 수 있다.

그림 8 초전도 전류제한기 종류에 따른 초전도 소자의 V-I 곡선

Fig. 8 V-I curve of superconducting element according to SFCL type

3. 결 론

본 논문에서는 반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작특성을 실험과 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

반주기 이후 하이브리드 초전도 전류제한기는 고장 발생시 고장전류를 초전도 소자가 직접 제한해주는 것이 아니라 감지하여 트리거 역할만 한다. 그리고 고속스위치를 이용하여 고장전류를 CLR에 흐르게 하여 고장전류를 제한하는 동작특성을 가지고 있다. 이때 반주기 동안에는 전류를 제한하지 않고 반주기 이후 전류를 제한하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 저항형 초전도 전류제한기와 다르게 초전도 소자의 부담이 적어 회복특성이 좋아 경제적 부담이 줄어들고 크기도 줄어들어 실계통 적용이 예상된다.

향후 계통에 하이브리드 초전도 전류제한기 도입에 따른 보호기간의 협조관계 분석을 하고 다양한 사례를 통해 계통 적용을 위한 검토를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2008-38) 주관으로 수행된 과제입니다.

참 고 문 헌

- [1] 김진석, "배전변전소에 대용량 변압기 설치시 초전도 전류제한기 적용방안 연구", 숭실대학교 일반대학원
- [2] 조승식, "최신 배전시스템 공학", 북스힐, pp. 396-469, 2006.
- [3] 김준환, 이강완, "전력계통 고장전류 증대와 대응방안," 전기저널, pp. 19-31, 1998.
- [4] O. B. Hyun, H. R. Kim, Y. S. Yim, J. Sim, K. B. Park, I. S. Oh, "Domestic Efforts for SFCL Application and Hybrid SFCL", Progress, Supercond., Vol. 10, No. 1, pp. 60-67, Oct. 2008.
- [5] H. Kameda, and H. Taniguchi, "Setting Method of Specific Parameter of a Superconducting Fault Current Limiter Considering the Operation of Power System Protection", IEEE Trans. Appl. Superconduct., Vol. 9, No. 2, pp. 1355-1360, June. 1999.
- [6] S. H. Lim, "Operational Characteristics of Flux-Lock Type SFCL With Series Connection of Two Coils", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, pp. 1895-1898, June. 2007.
- [7] I. K. You, J. S. Kim, M. H. Kim, S. H. Lim, J. F. Moon, J. C. Kim, "Current Limiting Characteristics due to Location of Superconducting Fault Current Limiter in Power Distribution System", KIEE Spring Annual Conference 2009.
- [8] I. SHIMIZU, Y. NAITO, I. YAMAGUCHI, K. KAIHO, S. YANABU, "Application Study of a High-Temperature Superconducting Fault Current Limiter for Electric Power System", Electrical Engineering in Japan, Vol. 155, No. 4, pp. 20-29, Apr. 2006.
- [9] 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 Current Limiters", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18, No. 2, pp. 624-627, June. 2008.
- [10] O. B. Hyun, K. B. Park, J. W. Sim, H. R. Kim, S. W. Yim, and I. S. Oh, "Introduction of a Hybrid SFCL in KEPCO Grid and Local Points at Issue", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 1946-1949, June. 2009.
- [11] 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. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 1843-1846, June. 2009.

- [12] H. R. Kim, S. W. Yim, O. B. Hyun, J. Sim, and S. Y. Oh, "Analysis on recovery characteristics of superconducting fault current limiters", MT-20 Conference on Magnet Technology.

저 자 소 개

유 일 경 (柳 一 慶)

1983년 2월 26일생, 2009년 숭실대 전기공학부 졸업, 2009년~현재 동대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (02) 828-7268

Fax : (02) 817-7961

E-mail : wangkami7@ssu.ac.kr

김 명 후 (金 明 厚)

1982년 6월 5일생, 2009년 안양대 전기공학과 졸업, 2009년~현재 숭실대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (02) 817-7966

Fax : (02) 817-0780

E-mail : kimmh@ssu.ac.kr

김 진 석 (金 辰 碩)

1983년 1월 26일생, 2007년 서울산업대 전기공학과 졸업, 2009년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2009년~현재 동대 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (02) 817-7966

Fax : (02) 817-0780

E-mail : redwolf832@ssu.ac.kr

임 성 훈 (林 成 勳)

1973년 11월 1일생, 1996년 전북대 전기공학과 졸업, 2003년 동대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2006년~현재 숭실대 전기공학과 교수.

Tel : (02) 828-7268

Fax : (02) 817-7961

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr

김 재 철 (金 載 哲)

1955년 7월 22일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1988년~현재 숭실대 전기공학과 교수.

Tel : (02) 817-0647

Fax : (02) 817-0870

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

최 종 수 (崔鍾壽)

1958년 2월 19일생. 1993년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2001년 8월 한양대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). ~현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (02) 440-2370

Fax : (02) 440-2369

E-mail : choijs@kesco.or.kr