

MTR 중성점 접지에 초전도 전류제한기 적용시 지락과전류계전기 동작 분석

논문
58-11-2

Analysis on the Protective Coordination on Neutral Line of Main Transformer in Power Distribution Substation with Superconducting Fault Current Limiter

김진석* · 임성훈** · 문종필*** · 김재철† · 현옥배§
(Jin-Seok Kim · Sung-Hun Lim · Jong-Fil Moon · Jae-Chul Kim · Ok-Bae Hyun)

Abstract - The fault current has increased due to growth of distributed generations for the large power demand in power distribution system. To solve some problem such as excess of the circuit breaker's cut-off ratings, the superconducting fault current limiter(SFCL) has been progressed. However, the operational characteristics of the relay is changed by SFCL. Therefore, the proper impedance for the SFCL should be selected to keep protective coordination with the SFCL when SFCL is introduced on the neutral line of main transformer in distribution system. In this paper, the proper normal conducting resistance was suggested to solve the problem in case of the protection coordination with SFCL.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter, Power System, Neutral Line, Protective Coordination

1. 서론

전력수요의 증가로 인하여 전력계통은 더욱 확대되고 있으며 특히 배전계통은 지속적인 부하의 증가와 더불어 분산전원의 구성으로 계통의 규모가 증가하고 복잡해지고 있다. 이러한 변화에 큰 영향을 받는 문제는 계통에 고장 발생시 고장전류의 크기가 증가되어 기존에 설치된 차단기 및 보호기기의 차단용량을 초과하거나 동작특성을 변화시키는 문제가 발생하여 계통 보호에 대한 설비의 개선방안이 요구된다[1].

전력계통에 고장발생시 나타나는 문제를 해결하기 위한 방안으로 차단용량이 충분한 기기로 교체하거나 동작특성을 변경해주는 방안이 있지만, 많은 비용과 시간이 필요하게 된다. 그래서 보다 효과적이고 저렴한 방안으로 한류기를 도입하는 방안이 있지만, 정상상태에서 전력손실 발생 및 전압강하의 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 보완하고자 초전도 전류제한기(Superconducting Fault Current Limiter : SFCL)를 적용하는 방안이 연구되고 있다[2-3].

초전도 전류제한기는 초전도 소자의 저항(복합형의 경우 한류소자의 크기)에 따라 제한되는 고장전류의 크기가 달라지며, 고장전류의 크기에 따라 보호기기의 동작특성도 달라진다. 이러한 초전도 전류제한기의 특징 때문에 저항의 크기를 결정해야하는 문제가 있다[4-5]. 이에 대하여 변압기 2차 측, 피더에 적용시 선로보호에 대한 연구가 진행되었지만 본

논문에서는 계통의 고장 중 빈번하게 발생하는 비대칭 고장에 대하여 보다 효과적인 적용방안으로 변전소 주변압기 중성점에 적용하였을 경우 보호기기의 보호협조 문제점을 분석, PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 툴을 사용하여 확인하였다[6].

2. 초전도 전류제한기 및 배전계통 모델링

2.1 초전도 전류제한기 모델링

고장전류를 제한하기 위해 다양한 초전도 전류제한기가 제안되어왔다[7-9]. 본 논문에서는 가장 기본적이고 가장 광범위하게 사용되는 저항형 초전도 전류제한기를 사용하여, 그림 1과 같은 저항 발생과 고장전류의 변화 특성을 갖도록 모델링하였다.

그림 1에서 고장발생 전인 정상상태에서 초전도 전류제한

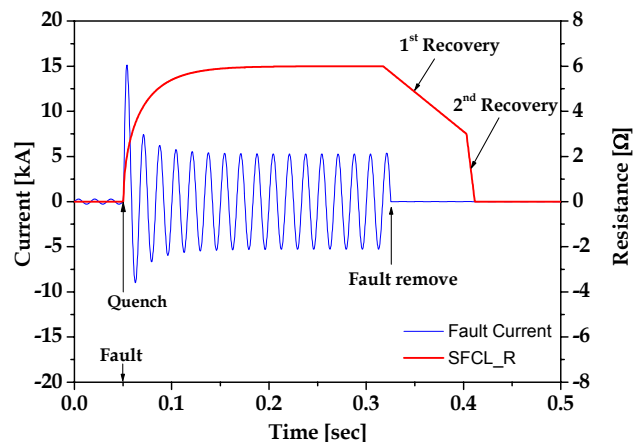


그림 1 고장발생시 초전도 전류제한기 저항과 전류파형
Fig. 1 Resistance of SFCL and waveform of fault current

† 교신저자, 펠로우회원 : 숭실대 공대 전기공학부 교수 · 공박

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

* 정 회원 : 숭실대 공대 전기공학부 박사과정

** 정 회원 : 숭실대 공대 전기공학부 교수 · 공박

*** 정 회원 : 충주대 공대 전기공학부 교수 · 공박

§ 정 회원 : 한국전력연구원 수석연구원

접수일자 : 2009년 6월 30일

최종완료 : 2009년 8월 24일

기에는 임계전류 이하의 부하전류가 흐르다가 고장이 발생하여 임계전류 이상의 고장전류가 흐르면 초전도 전류제한기의 초전도 전류제한기는 켜지되어 저항이 발생하기 시작한다. 고장이 발생하고 일정시간이 지나면 보호기기가 동작하여 고장을 제거하게 되고, 고장전류는 임계전류 이하로 감소하여 초전도 전류제한기는 회복을 시작하며 2번의 회복단계를 거쳐서 초전도 상태가 된다[10]. 이때 초전도 전류제한기는 고장전류의 크기에 의하여 켜지시 저항 크기와 회복 단계에 영향이 있지만 초전도 전류제한기에 의한 영향을 분석하고자 동일한 저항 크기와 회복동작을 갖도록 모델링하였다.

2.2 배전계통 모델링

그림 2는 초전도 전류제한기를 변전소 주변압기 중성점에 적용하기 위한 배전계통의 구성도이다. 이 배전계통에 적용되어있는 데이터는 표 1과 같으며, 부하는 임피던스 부하로 구성하여 3개의 피더로 구성하였다[6].

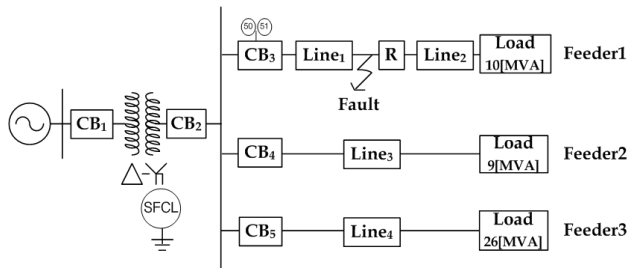


그림 2 배전계통 구성도.
Fig. 2 Configuration of power distribution system.

표 1 모의 배전계통 데이터.
Table 1 Data for distribution system.

항목	데이터 (100 [MVA] base, [%])
Z _S	154 [kV] / j1.75
Tr.	154/22.9 [kV] / j33.3
Z _{LINE} (ALOC 160 [mm ²])	Z ₀ = 8.68 + j22.86 Z ₁ =Z ₂ = 3.48 + j7.44
Load	Feeder1 : 10 [MVA] / p.f. 0.95 lag
	Feeder2 : 9 [MVA] / p.f. 0.95 lag
	Feeder3 : 26 [MVA] / p.f. 0.95 lag

본 논문에서 변전소 주변압기 중성점에 초전도 전류제한기를 적용하여 분석하고자 하는 목적으로 중성선에 고장전류가 흐르도록 고장 발생은 버스에서 1.5 [km] 떨어진 지점에 비대칭 고장인 1선 지락고장을 모의하였으며, 고장 발생시 차단기가 동작하는 요인으로 지락과전류계전기로 한정하였다. 이때, 지락과전류계전기는 표 2와 같은 오부동작의 요인을 가지고 있다. 따라서 초전도 전류제한기를 적용하여 그 영향을 분석하기 위해 오부동작의 요인을 예방하도록 적용한 부하는 평형부하이며, 지락점의 고장 저항크기를 최소로 하였다.

표 2 지락과전류계전기의 오부동작 요인
Table 2 Factor of OCGR's failure to operate

오부동작요인	발생원인
불평형 전류 (오동작)	각 상별 부하공급의 불평형
지락점 저항크기 (부동작)	불완전 지락

2.3 지락과전류계전기 모델링

일반적으로 배전계통은 수직상 방식으로 방향요소가 필요하지 않기 때문에 고장이 발생하였을 때 정상 상태보다 전류가 증가하는 것을 검출하여 고장구간을 제거하는 보호방식으로 비교적 간단하고 고장을 확실히 제거할 수 있는 과전류보호계전 방식을 사용한다.

과전류 보호방식으로 과전류계전기를 사용하지만, 특별히 지락 고장시 지락전류에 동작하도록 제작한 것을 지락과전류계전기(OCGR : Over Current Ground Relay)라 한다. 이는 동작전류의 값이 작을 뿐이고, 일반 과전류계전기와 같이 한시동작과 순시동작의 동작특성이 있으며, 한시동작은 식 1과 같고, 한국전력공사에서 사용하고 있는 강반한시의 특성상수는 표 3과 같다.

$$Time_{trip} = \left(\frac{A}{M^{p-1}} + B \right) \times TD \tag{1}$$

$$M = \frac{I_{input}}{I_{pickup}}$$

표 3 지락과전류계전기의 강반한시 특성상수
Table 3 Constants of very inverse characteristics

변수	A	B	p
값	39.85	1.084	1.95

3. 정정지침에 따른 보호협조 분석

3.1 보호기기 정정지침

본 논문에서는 초전도 전류제한기를 변전소 주변압기 중성점에 적용시 지락고장에 대한 보호기기인 지락과전류계전기의 동작특성에 대한 변화를 조사하고 초전도 전류제한기 적용시 보호협조를 고려한 적용 방안을 제시하고자 한다. 표 4는 한국전력공사에서 적용하고 있는 피더보호용 보호기기의 정정지침을 보여준다[5,11]

표 4 지락과전류계전기 정정지침
Table 4 Setting rule of OCGR

구분	정정지침
순시 텀	전위보호기기 설치점의 최대 1선 지락전류 × 1.4 이상
한시 텀	1. 최대부하전류 × 0.3 이상 2. 보호구간 최소 1선 지락전류 / 1.5 이하
한시레버	변전소 인출점 최대 1선 지락전류에서 0.5초(30cyc)이하로 동작

이 정정지침에 따라 지락고장 발생시 차단기 동작을 위한 지락과전류계전기의 정정값은 표 5와 같다.

표 5 OCGR의 정정표
Table 5 Setting table for OCGR

항목	지락 과전류 계전기
부하전류	252.1 [A]
최대부하 전류	378.2 [A]
정정치(한시)	113.5 [A]
정정치(순시)	3.75 [kA]
레버	4

3.2 초전도 전류제한기 적용시 보호협조 분석

그림 1의 배전계통에서 변전소 주변압기 중성점에 초전도 전류제한기를 적용하기 전에 설치된 지락과전류계전기를 표 4의 정정지침에 의하여 표 5와 같이 정하여 적용하였다.

위와 같이 정정하여 최대 1선 지락전류가 흐르는 변전소 인출점(Fault)에서 고장 발생시 지락과전류계전기의 동작을 확인하였으며, 그 결과 그림 3과 같다. (a)는 최대 지락고장 전류에 대한 순시동작을 보여주며, (b)는 전위 보호기기에 대한 후비보호 동작으로 정정지침에 따라 0.1 [sec]의 고장 발생 후 0.5 [sec] 이내인 0.6 [sec] 내에서 차단되는 한시동작을 보여준다.

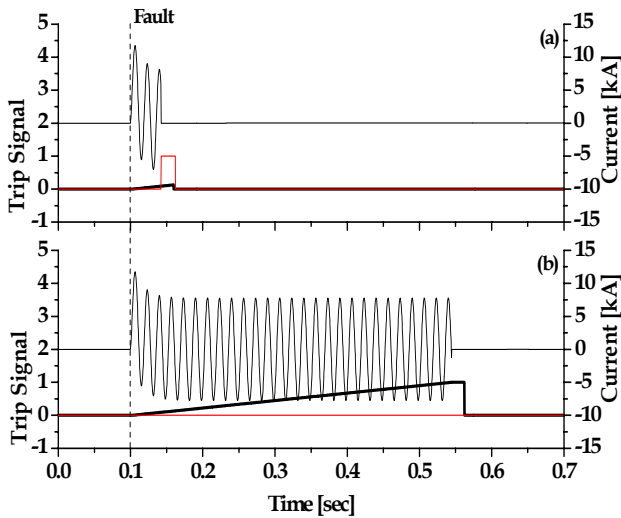


그림 3 고장시 고장전류 및 지락과전류계전기 동작파형
Fig. 3 Waveform of fault current and operation of OCGR

여기서, 변전소 주변압기 중성점에 초전도 전류제한기를 적용하여 고장전류를 계산하였다. 고장전류는 초전도 전류제한기의 저항형, 리액터형을 구분하였으며, 임피던스 크기에 따라 지락과전류계전기의 정정지침과 비교하였다.

표 6은 초전도 전류제한기의 임피던스에 따른 고장전류의 계산결과를 보여주며, 고장전류 크기에 따라 지락과전류계전

표 6 초전도 전류제한기의 임피던스 크기에 따른 고장 전류 및 보호협조 가능 범위

Table 6 Calculated fault current and range of operation in case of impedance of SFCL

		1선 지락전류 [kA]	
		저항형	리액터형
Without SFCL		5.651	5.651
With SFCL	1 [Ω]	5.196	3.959
	2 [Ω]	4.295	3.047
	3 [Ω]	3.475	2.476
	4 [Ω]	2.853	2.085
	5 [Ω]	2.395	1.801
	6 [Ω]	2.053	1.585
	7 [Ω]	1.791	1.416

□ 한시동작 범위 ■ 순시동작 범위

기의 순시동작과 한시동작의 동작가능여부를 표시하였다.

순시동작의 특징은 정정되어있는 3.75 [kA] 이상에서 동작하므로 초전도 전류제한기에 의하여 고장전류가 이 정정값 이하로 제한된다면, 순시동작이 한시동작으로 동작특성이 달라진다. 또한, 한시동작 특징은 정정지침에 따라 변전소 인출점의 최대 1선 지락고장전류에서 0.5 [sec] 이내 동작하도록 하면, 식 (1)에 따라서 M은 16.65로 계산된다. 이 결과는 그림 4의 강반한시 특성의 지락과전류계전기의 시간-전류 특성곡선을 보면, 0.5 [sec]에서 약 16.5배의 전류크기를 갖는 것을 확인할 수 있다.

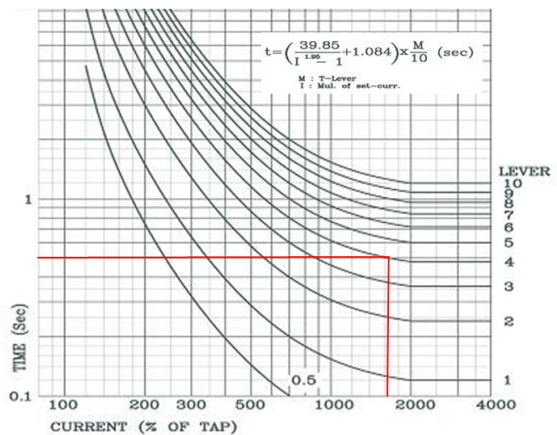


그림 4 강반한시 지락과전류계전기 시간-전류 곡선
Fig. 4 Time-Current curve of OCGR

이 값을 표 5의 한시 정정치를 참고하면, 고장전류인 I_{input} 은 1.89 [kA] 이상이 되어야 반한시 특성을 갖는 지락과전류계전기가 0.5 [sec] 이내에 동작한다. 따라서 1.89 [kA]의 고장전류 크기는 지락과전류계전기가 정정지침에 따라 동작할 수 있는 최소 고장전류이므로 표 6을 참고하면 초전도 전류제한기의 저항형의 저항 5 [Ω], 리액터형의 임피던스는 3 [Ω]까지 적용할 수 있는 점을 확인할 수 있다.

4. 초전도 전류제한기 적용시 보호협조 분석

앞선 분석을 확인하기 위하여 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 툴을 이용하여 초전도 전류제한기, 지락과전류계전기, 배전계통의 모델링을 통하여 결과를 확인하였다. 여기서 고장발생은 변전소 인출점에서 모의하였으며, 지락과전류계전기의 동작특성을 보기위하여 0.1 [sec]에 영구고장을 발생하였다.

그림 5는 변전소 주변압기 중성점에 저항형 초전도 전류제한기를 적용하였을 경우 중성선에 흐르는 전류와 지락과전류계전기의 동작특성을 나타낸다. 그림에서 (a)는 중성선에 흐르는 전류의 특징으로 고장 발생 전에는 배전계통의 부하가 대칭인 모델이므로 전류가 흐르지 않는 특징을 보인다. (b)는 5 [Ω]의 상전도 저항 크기를 갖는 초전도 전류제한기를 적용하였을 경우 지락 과전류계전기의 동작특성을 보여준다. 그림에서 굵은 선은 한시동작 특성을 나타내며, 얇은 선은 순시동작 특성을 나타낸다. 그 결과 정정지침에 따라서 변전소 인출점 고장에서 0.5 [sec] 이내인 0.6 [sec] 안에 동작하는 특징을 볼 수 있다. 그러나 6 [Ω]의 상전도 저항 크기를 갖는 초전도 전류제한기를 적용하였을 경우 (c)와 같은 결과를 얻었으며, 이 결과는 정정지침의 범위를 벗어나 동작하는 특징을 나타낸다.

그림 6은 변전소 주변압기 중성점에 리액터형의 초전도 전류제한기를 적용하였을 경우 고장발생시 중성선에 흐르는 고장전류와 지락과전류계전기의 동작특성을 보여준다.

이 결과 역시 (a)에서는 고장발생 전에 대칭 부하의 특징으로 전류가 흐르지 않다가 비대칭 고장인 1선 지락고장이 발생하여 고장전류가 흐르는 것을 나타낸다. 또한 (b)는 4 [Ω]의 상전도 임피던스를 갖는 경우로 정정지침에 의한 동작시간을 지키는 점을 볼 수 있으나, (c)는 5 [Ω]의 임피던스를 갖는 초전도 전류제한기를 적용하였을 경우로 정정지침의 동작범위를 벗어나는 특징이 나타난다.

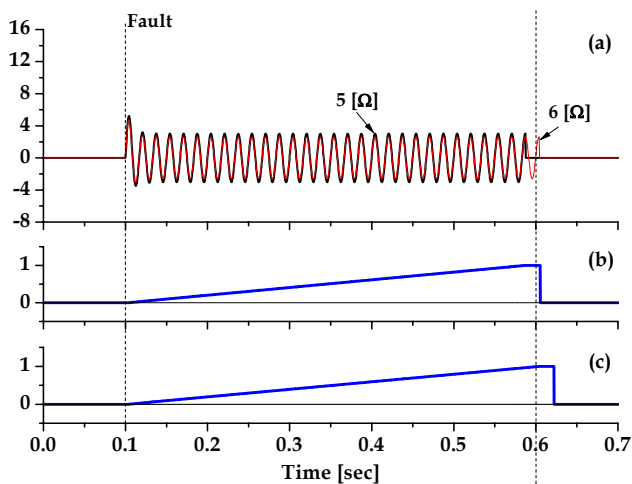


그림 5 저항형 초전도 전류제한기 적용시 고장전류 및 지락 과전류계전기의 한시동작 특성

Fig. 5 Fault current and delay operation of OCGR with SFCL of resistance type

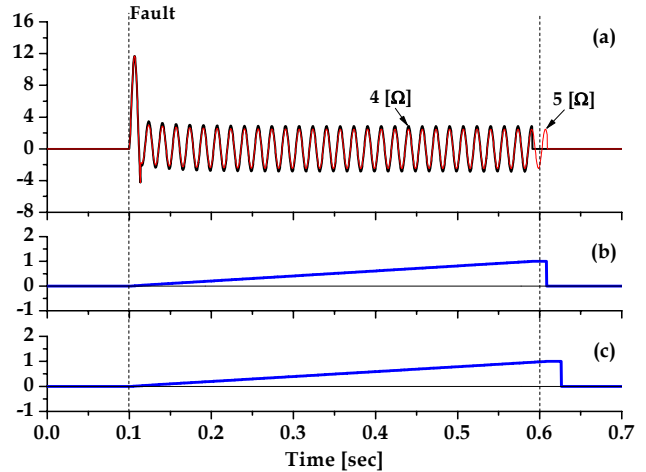


그림 6 리액터형 초전도 전류제한기 적용시 고장전류 및 지락과전류계전기 동작

Fig. 6 Fault current and delay operation of OCGR with SFCL of reactor type

그림 7은 저항형 초전도 전류제한기를 변전소 주변압기 중성점에 적용하였을 경우로 (a), (b), (c)는 각각 중성선에 흐르는 고장전류와 2 [Ω]의 상전도 저항 적용시 지락과전류계전기의 동작특성, 3 [Ω]의 상전도 저항 적용시 지락과전류계전기의 동작특성을 보여준다.

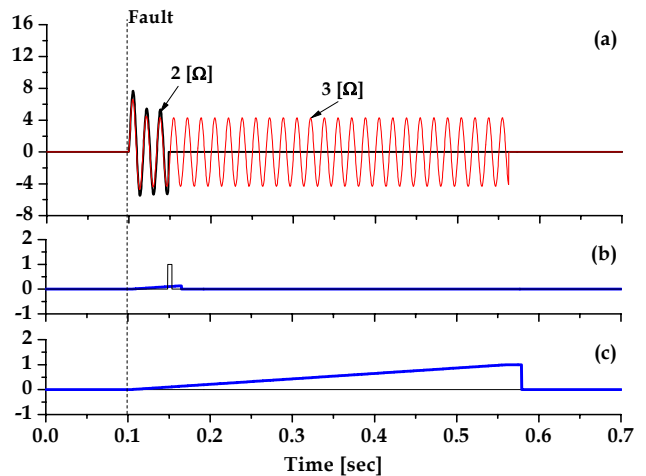


그림 7 저항형 초전도 전류제한기 적용시 고장전류 및 지락 과전류계전기의 순시동작 특성

Fig. 7 Fault current and instantaneous operation of OCGR with SFCL of resistance type

(a)의 고장전류는 앞의 한시동작특성의 결과 같이 고장발생시 중성선에 고장전류가 흐르는 점을 볼 수 있으며, (b)는 순시동작 영역에서 정상적으로 동작하는 것을 볼 수 있으나, (c)는 초전도 전류제한기에 의한 고장전류 저감효과가 보다 커서 순시동작이 한시동작을 하는 특징을 보여준다.

그림 8은 리액터형의 초전도 전류제한기를 적용하였을 경우 그림 7과 같이 순시동작에 대하여 분석한 결과이다. 그 결과 1 [Ω]의 상전도 임피던스를 갖는 경우 순시동작 범위

에서 동작하는 결과를 보여주지만 2 [Ω]의 상전도 임피던스를 갖는 경우 한시동작으로 동작영역이 변하는 점을 볼 수 있다.

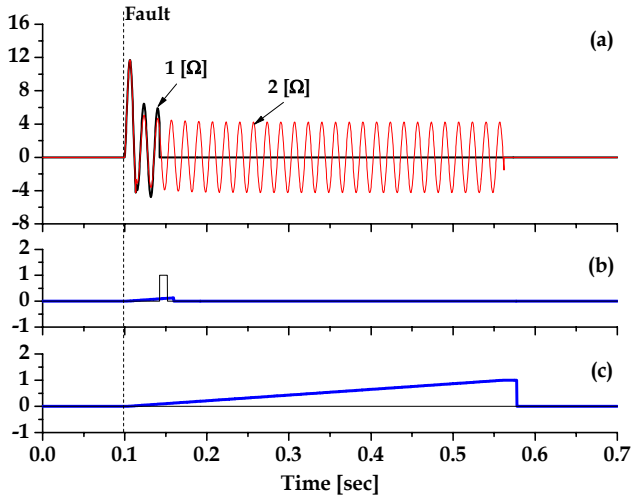


그림 8 리액터형 초전도 전류제한기 적용시 고장전류 및 지락과전류계전기의 순시동작 특성
Fig. 8 Fault current and instantaneous operation of OCGR with SFCL of reactor type

시뮬레이션 결과 앞에서 분석한 결과와 같이 저항형의 초전도 전류제한기는 5 [Ω]까지 한시특징을 가지며, 순시특성은 2 [Ω]까지 적용이 가능하다. 또한 리액터형의 경우는 4 [Ω]이 한시영역의 최대 범위이며, 순시영역은 1 [Ω]까지 가능하다. 이 결과를 정리하면 저항형의 초전도 전류제한기는 순시동작과 한시동작을 만족하기 위해서 두 영역의 최소 저항인 4 [Ω], 리액터형은 두 동작영역을 만족하기 위해서 최대 1 [Ω]까지 적용이 가능하다. 이 종류의 상전도 임피던스가 다른 특징은 배전시스템의 임피던스 구성이 저항보다 리액터성분이 더 크기 때문이다.

5. 결 론

본 논문에서는 초전도 전류제한기를 변전소 주변압기 중성점에 적용하여 지락고장을 보호하기 위해 고장전류 변화와 지락과전류계전기의 동작특성 변화를 분석하였다. 이를 확인하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 사용하였으며, 변전소 주변압기 중성점에 초전도 전류제한기를 적용할 경우 지락과전류계전기의 순시동작이 오부동작하고 변전소 인출점의 최대 1선 지락고장전류에서 정정지침을 초과하는 결과를 도출하였다. 분석결과로 피더보호용으로 초전도 전류제한기를 적용한 사례의 보호협조 분석의 결과 같이 변전소 주변압기 중성점에 초전도 전류제한기를 적용할 경우 고장전류가 저감되어 보호기기의 순시동작 및 한시동작의 동작특성이 정정지침 및 동작요소의 변화가 되지 않도록 초전도 전류제한기의 상전도 저항(임피던스)을 제한해야 한다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 김준환, 이강완, “전력계통 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, pp.19-31, 1998

[2] W. Paul and M. Chen, “Superconducting control for surge currents”, IEEE Spectrum, vol. 35, pp. 49-54, May 1998.

[3] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, T. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, “Toward the superconducting fault current limiter”, IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 6, no. 2, pp. 801-808, April 1991.

[4] 한국전기연구원, “초전도기기 모델링 및 초전도 기기보호 기술개발”, 2001년

[5] 한국전력공사, “배전실무Ⅲ”, 2006년

[6] J. M. Ahn, J. S. Kim, J. F. Moon, S. H. Lim, J. C. Kim, “Analysis on the Protective Coordination in Power Distribution System with Superconducting Fault Current Limiter,” Trans. KIEE. vol. 57, no. 5, pp. 755-760, May, 2008

[7] T. Hara, T. Okuma, T. Yamamoto, D. Ito K. Tasaki, and K. Tsurunaga, “Development of a new 6.6kV/1500A class superconducting fault current limiter for electric power system,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 182-192, Jan. 1993.

[8] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Krämer, P. kummeth, and H.-W. Neumüller, “Resistive current limiters with YBCO films,” IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 7, no. 2, pp. 828-831, Jun. 1997.

[9] W. Paul, Th. Baumann, J. Rhyner, and F. Platter, “Test of 100 kW high-Tc superconducting fault current limiter,” IEEE Trans. Appl. superconduct., vol. 5, no. 1, pp. 1059-1062, June 1995.

[10] 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

[11] 한국전력공사 배전처, “배전보호기술서,” 1995.

저 자 소 개



김진석 (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



김재철 (金載哲)

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

Tel : (02) 817-0647

Fax : (02) 817-0870

E-mail : jckim@ssu.ac.kr



임성훈 (林成勳)

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

Tel : (02) 828-7268

Fax : (02) 817-7961

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr



현옥배 (玄鈺培)

1953년 2월 11일생. 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 Iowa State Univ. 대학원 물리학과 졸업(이학박사), Ames Lab., NIST, ISTEK 연구원 역임, 현재 한전 전력연구원 수석 연구원

Tel : (042) 865-5900

Fax : (042) 865-5206

E-mail : hyun@kepri.re.kr



문종필 (文鍾必)

1977년 5월 27일생, 2000년 숭실대 전기공학과 졸업, 2007년 동대 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 2008년~2009년 숭실대 전기공학부 전임강사. 2009년~현재 충주대 전기공학과 전임강사.

Tel : (043) 841-5146

Fax : (043) 841-5140

E-mail : moon@cjnu.ac.kr