

배전계통에 초전도한류기 적용시 OCR 및 Recloser 동작특성 분석

Analysis of Operation Characteristics of OCR and Recloser in Power Distribution System with SFCL

문 중 필*
(Jong-Fil Moon)

Abstract - In this paper, the method of protective coordination is studied to install Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) to power distribution system. If SFCL is installed, the protective coordination is not operated well because of the decreased fault current. Thus, the resetting method of protective devices is presented to coordinate protection system in power distribution system with resistor-type SFCL. The presented methods are divided into three parts; OCR, OCR-Recloser, OCR-Recloser-Recloser. The presented methods are proved through case studies using PSCAD/EMTDC simulation

Key Words : Protective coordination, Power distribution system, SFCL, TCC

1. 서 론

전력수요가 증가하고 계통용량이 점차 증가함에 따라 향후 계통의 고장발생시 고장전류의 증가로 인하여 차단기가 고장전류를 차단하지 못할 가능성이 존재하게 되었다. 이에 따라 차단기를 보다 큰 용량으로 대체해야 하나 그 수량이 막대하여 엄청난 교체 비용을 요구하므로, 이에 대한 대안으로 초전도 한류기가 주목받고 있다 [1-4].

초전도 한류기는 상시에는 계통에 전혀 영향을 주지 않다가 일정전류 이상이 흐르게 되면 초전도 소자에 퀀치가 발생하여 저항이 생겨 고장전류를 감소시켜주는 역할을 하는 장치이다. 이를 이용하게 되면 계통 용량이 증가하여도 기존의 차단기를 교체할 필요 없이 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.

그러나 초전도 한류기를 계통에 설치하게 되면 고장전류의 크기를 바꾸기 때문에 기존에 정정되어 있는 보호협조를 붕괴시킬 우려가 존재한다. 즉, 계통에 사고 발생시 고장전류 감소로 인하여 보호계전기가 늦게 동작할 우려가 있으며, 상위 및 하위 보호기기간에 협조가 무너질 우려도 있다.

초전도 한류기가 배전계통에 적용되었을 때 리클로저와 퓨즈와의 협조에 문제가 발생하여 새로운 퓨즈 용량을 결정하는 연구[5]와 또한 초전도 한류기를 변전소 주변압기 중성점에 설치하였을 경우에 지락과전류 계전기의 동작특성을 분석한 연구 사례가 있다[6].

본 논문에서는 초전도 한류기의 배전계통 적용시 OCR 및 Recloser의 보호협조 문제를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 해결방안을 제시하였다. 우선 배전시험선로를 모델링하였으며 저항형 초전도 한류기를 모델링하였다. 시험선로에

고장이 발생할 경우 각 사례에 따라 고장전류 크기를 분석하여 이에 따른 과전류계전기 및 리클로저의 보호협조 정정방안을 제시하였다.

2. 배전선로 모델링

2.1 배전선로 개요

본 논문에서 모델링한 시험선로는 변전소에서 전원을 공급받아 약 10 [km]에 이르는 전용선로를 거쳐 시험선로에 이르며, 시험선로는 가공선로만 3상 2회선으로 4 [km]이며 다회로 개폐기의 조작을 통하여 최대 8 [km]로 운영할 수 있다. 또한 가변저항을 통하여 회로상으로 보다 길게 만들 수 있으며 인공지락발생장치를 이용하여 상정사고시험을 할 수 있도록 되어 있다 [7].

2.2 배전선로 모델링

본 논문에서는 앞서 설명한 시험선로를 고장계산에 적합하도록 그림 1과 같이 모델링하였다. 그림 1에서 노드 0~8까지는 외부 변전소로부터 시험배전계통까지의 선로를 나타내며, 9번 이후로는 시험배전계통선로이다. 또한 실선은 가공선로를 나타내고 점선은 케이블선로를 나타낸다. 시험계통은 6개의 다회로 개폐기와 선로중간에 여러 대의 개폐기가 연결되어 있어 계통을 다양하게 구성할 수 있도록 되어 있다. 본 모델에서 초전도 한류기 설치 위치는 90-91번 사이이며, 91-92에는 과전류 계전기와 차단기가 설치되어 있다.

3. 초전도 한류기 모델링

본 논문에서는 저항형 초전도 한류기 모델을 사용하였다. 사용한 초전도 한류기 모델은 식 (1)과 같다 [8].

* 교신저자, 종신회원 : 한국교통대 전기공학과 조교수 · 공박

E-mail : moon@ut.ac.kr

접수일자 : 2012년 10월 23일

최종완료 : 2012년 11월 20일

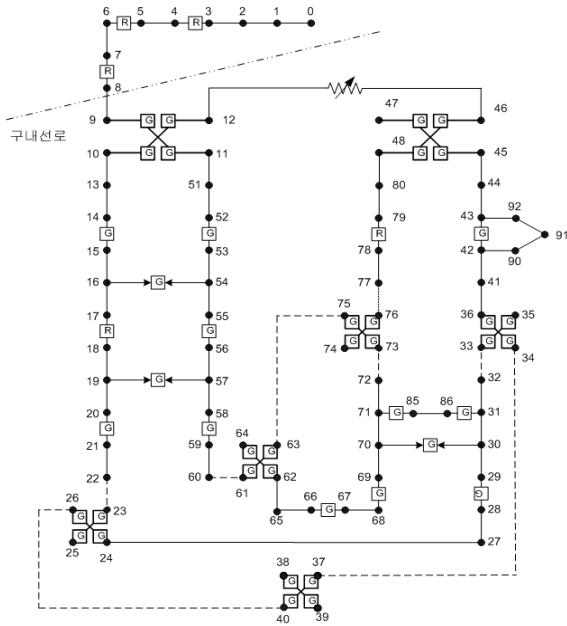


그림 1 배전선로 모델링
Fig. 1 Modeling of power distribution system for testing

$$R_{sc} = \begin{cases} 0 & (t_q > t) \\ R_n \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_{quench}}{T_f(I_{fault})}\right) \right]^{\frac{1}{2}} & (t_q \leq t < t_1) \\ a_1(t-t_1)+b_1 & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ a_2(t-t_2)+b_2 & (t_2 \leq t) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 R_n 는 켄치발생시 수렴하는 상전도 저항, T_f 는 시정수를 나타내고, t_q , t_1 , t_2 는 각각 켄치 발생시간, 1차 회복시간, 2차 회복시간을 의미한다. 모델링에 사용한 상전도 저항의 크기와 시정수, 1차와 2차 회복속도는 표 1에 나타내었다.

표 1 초전도한류기 파라미터

Table 1 Parameters of SFCL

파라미터	값
R_n [Ω]	1~20, j1~j20
T_f	0.01
a_1 [Ω/s]	-80
a_2 [Ω/s]	-160
b_1 [Ω]	R_n
b_2 [Ω]	$R_n/2$

4. 보호협조 분석

4.1 고장전류 분석

본 논문에서는 보호기기 정정 및 보호협조 분석을 위하여 크게 3가지 경우에 대하여 사례연구를 수행하였다. 즉, 배전계통 보호 및 보호협조의 기본이 되는 OCR 순시트립, OCR-Recloser 협조, OCR-Recloser-Recloser 협조를 모의하기 위한 사례를 선정하였다. 표 2는 상정사고 사례를 나타낸다.

표 2 상정사고 사례

Table 2 Cases for fault study

		Case1	Case2	Case3
선로구성		0-9-12-46-43-92-90-42-41	(Case1)-36-33-27-24-16	(Case2)-54-62-65-73-76-80
사고지점		41	16	80
등가 임피 던스 [%]	Z_1	54.87 + j224.46	63.72 + j242.80	80.17 + j265.21
	Z_0	103.81 + j372.45	152.22 + j427.35	155.73 + j493.00

여기서 사례1은 OCR의 동작특성을 위한 시험이며, 사례2는 OCR-Recloser협조, 사례3은 OCR-Recloser-Recloser 협조 분석을 위한 시험이다.

각각의 사례에 대하여 3상단락 및 1선지락을 상정할 경우, 고장전류를 표 3~5에 나타내었다. 고장전류는 시험계통 외부의 선로길이가 매우 길어서 임피던스가 크기 때문에 일반 배전계통에 비하여 매우 작게 산출되었다.

표 3 사례 1에 대한 SFCL 임피던스에 따른 고장전류 크기 분석

Table 3 Cases for fault study Fault current according to the impedance magnitude of SFCL for Case 1

Case 1	3상단락 [kA]	1선지락 [kA]	
Without SFCL	1.935 ∠ -1.16	1.414 ∠ -1.18	
With SFCL	0[Ω]	1.091 ∠ -1.33	0.891 ∠ -1.32
	1[Ω]	1.067 ∠ -1.25	0.875 ∠ -1.25
	5[Ω]	0.933 ∠ -0.98	0.787 ∠ -1.02
	10[Ω]	0.758 ∠ -0.74	0.665 ∠ -0.81
	20[Ω]	0.514 ∠ -0.47	0.476 ∠ -0.54
	j1[Ω]	1.010 ∠ -1.35	0.836 ∠ -1.33
	j5[Ω]	0.777 ∠ -1.40	0.671 ∠ -1.38
	j10[Ω]	0.602 ∠ -1.44	0.536 ∠ -1.42
j20[Ω]	0.414 ∠ -1.48	0.382 ∠ -1.46	

표 4 사례 2에 대한 SFCL 임피던스에 따른 고장전류 크기 분석

Table 4 Cases for fault study Fault current according to the impedance magnitude of SFCL for Case 2

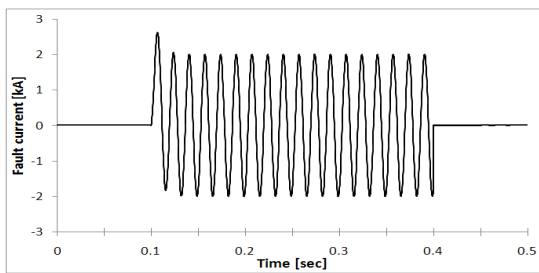
Case 2	3상단락 [kA]	1선지락 [kA]	
Without SFCL	1.674 ∠ -1.15	1.192 ∠ -1.18	
With SFCL	0[Ω]	1.004 ∠ -1.31	0.798 ∠ -1.30
	1[Ω]	0.984 ∠ -1.24	0.785 ∠ -1.24
	5[Ω]	0.869 ∠ -0.99	0.714 ∠ -1.04
	10[Ω]	0.717 ∠ -0.76	0.615 ∠ -0.84
	20[Ω]	0.497 ∠ -0.50	0.453 ∠ -0.58
	j1[Ω]	0.935 ∠ -1.33	0.754 ∠ -1.32
	j5[Ω]	0.733 ∠ -1.38	0.617 ∠ -1.36
	j10[Ω]	0.575 ∠ -1.42	0.502 ∠ -1.40
	j20[Ω]	0.402 ∠ -1.47	0.365 ∠ -1.45

표 5 사례 3에 대한 SFCL 임피던스에 따른 고장전류 크기 분석

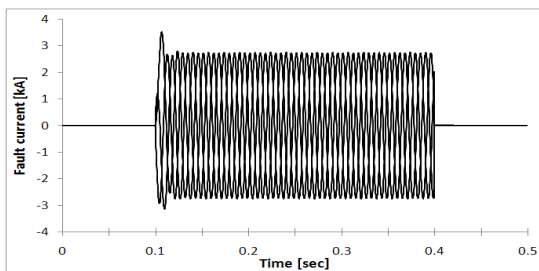
Table 5 Cases for fault study Fault current according to the impedance magnitude of SFCL for Case 3

Case 3		3상단락 [kA]	1선지락 [kA]
Without SFCL		1.417∠-1.12	0.994∠-1.16
With SFCL	0[Ω]	0.910∠-1.28	0.706∠-1.27
	1[Ω]	0.890∠-1.21	0.694∠-1.22
	5[Ω]	0.793∠-0.99	0.637∠-1.04
	10[Ω]	0.665∠-0.77	0.558∠-0.86
	20[Ω]	0.474∠-0.52	0.424∠-0.61
	j1[Ω]	0.854∠-1.30	0.672∠-1.29
	j5[Ω]	0.682∠-1.35	0.561∠-1.33
	j10[Ω]	0.544∠-1.40	0.465∠-1.38
j20[Ω]	0.387∠-1.45	0.345∠-1.43	

그림 2와 3은 사례1에 대하여 EMTDC로 모델링하여 시뮬레이션한 파형을 보여준다. 그림 2는 SFCL이 없는 경우이며, 그림 3은 5 [Ω]의 SFCL을 설치하였을 때의 고장전류 파형이다.



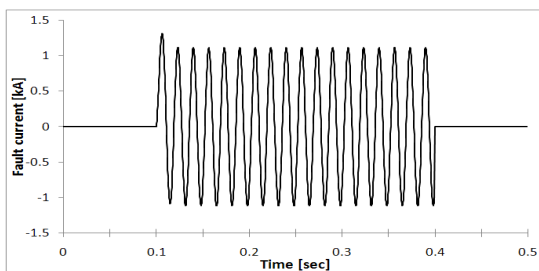
(a) 1선지락 고장



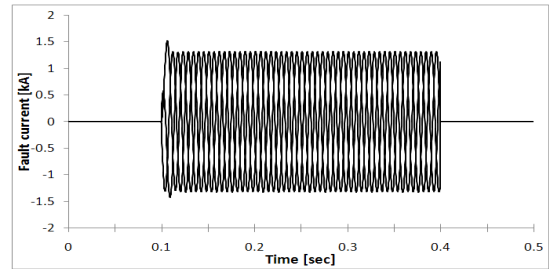
(b) 3상단락 고장

그림 2 사례 1에 대한 고장전류 파형(without SFCL)

Fig. 2 Fault current waveform for case 1 (without SFCL)



(a) 1선지락 고장



(b) 3상단락 고장

그림 3 사례 1에 대한 고장전류 파형(with SFCL)

Fig. 3 Fault current waveform for case 1 (with 5[Ω] SFCL)

4.2 보호협조 분석

앞의 세 가지 사례에 대하여 과전류계전기, 리클로저 1, 2를 정정하여 보호협조를 구축하였다. 우선, SFCL이 없는 경우에 대하여 각 사례를 바탕으로 각 보호기기에 대하여 레버값을 결정하였으며, 이때의 CT비는 100/5, Tap은 5로 설정하였다. 다음으로 SFCL을 설치할 경우 그 임피던스 값에 따라 보호협조를 설정하였고, 그 결과는 표 6과 같다. 여기서 TD는 Time Delay, 'D'는 지연동작, 'F' 순시동작을 나타낸다. 그림 4(a)는 SFCL이 없는 경우 각각의 보호기기에 대한 T-C 곡선을 나타내며, 그림 4(b)는 사례3에서 SFCL의 저항값이 5 [Ω]일 경우에 대하여 재정정된 T-C 곡선을 보여준다. 그림 5는 OCR, Recloser1, Recloser2에 대해서 SFCL이 없는 경우와 있는 경우에 대하여 TC곡선을 비교하여 보여준다.

표 6 SFCL 임피던스에 따른 보호기기 재정정

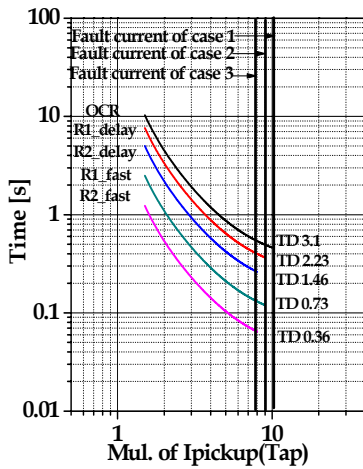
Table 6 Resetting protective devices according to impedance of SFCL

보호기기	OCR	TD				
		R/C 1		R/C 2		
		D	F	D	F	
Without SFCL	4	3	1	2	0.5	
With SFCL	0[Ω]	3.30	2.44	0.81	1.61	0.40
	1[Ω]	3.26	2.41	0.80	1.59	0.40
	5[Ω]	3.01	2.23	0.74	1.46	0.36
	10[Ω]	2.59	1.91	0.64	1.25	0.31
	20[Ω]	1.73	1.29	0.43	0.85	0.21
	j1[Ω]	3.16	2.34	0.78	1.54	0.39
	j5[Ω]	2.64	1.95	0.65	1.28	0.32
	j10[Ω]	2.08	1.53	0.51	1.01	0.25
j20[Ω]	1.29	0.96	0.32	0.63	0.16	

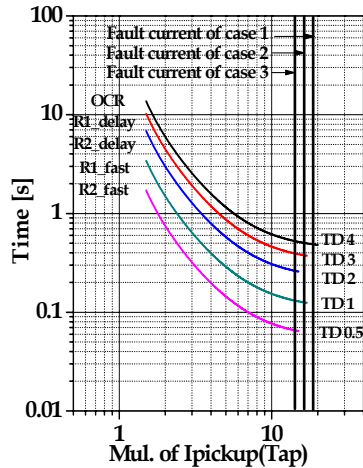
그림 5(a)는 OCR의 경우에 SFCL이 없는 경우 레버를 4로 정정하였다가, SFCL이 설치되었을 경우 레버를 3.01로 설정하여 OCR 트립시간이 SFCL이 없는 경우나 있는 경우에 같아지도록 TD 값을 정정한 결과를 보여준다. 그림 5(b), (c)도 마찬가지로 리클로저 1, 2에 대하여 SFCL이 없는 경우와 있는 경우에 똑같은 트립시간을 갖도록 정정한 결과를 보여준다.

SFCL을 설치한 경우 트립시간이 SFCL이 없는 경우 트립시간과 같은지를 검증하기 위하여 EMTDC를 이용하여

시뮬레이션 하였다. 그림 6~8은 EMTDC를 이용하여 각각의 위치에서 사고시 사고 파형 및 보호기기 트립파형을 보여준다.



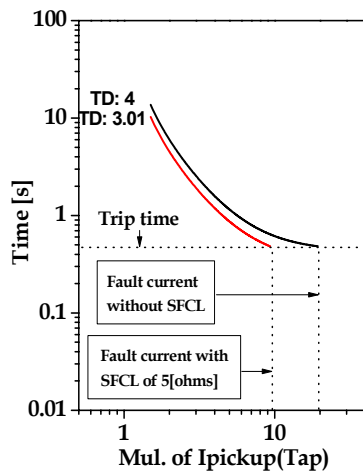
(a) SFCL이 없을 때의 TC 곡선



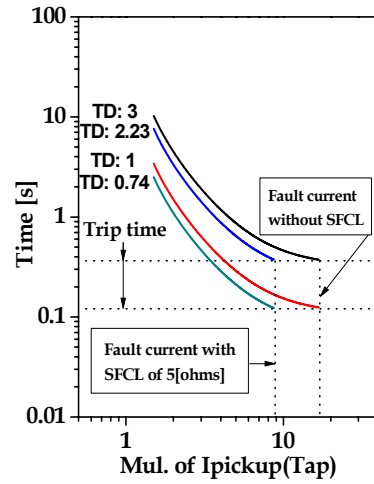
(b) 5 [Ω]의 SFCL 설치시 TC곡선

그림 4 SFCL 유무에 따른 TC 곡선

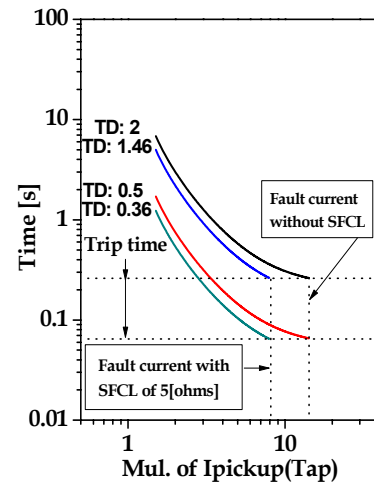
Fig. 4 TC curves in case with and without SFCL



(a) OCR



(b) Recloser1



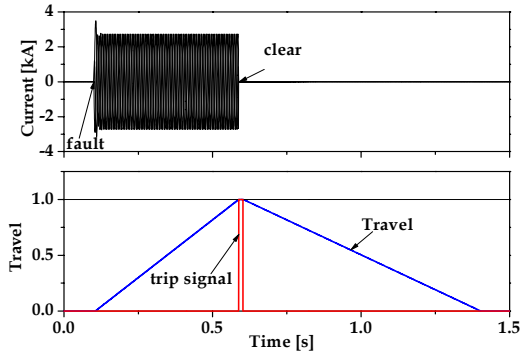
(c) Recloser2

그림 5 SFCL 적용유무에 따른 보호기기별 TC 곡선

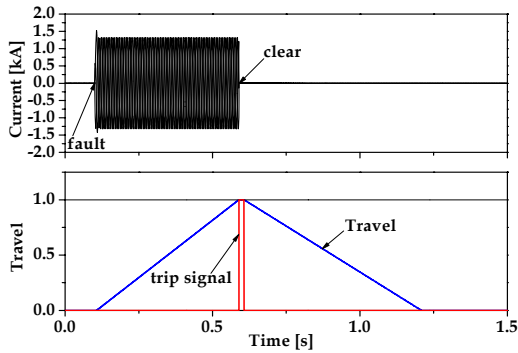
Fig. 5 TC curves for each of protective devices in case without SFCL and with SFCL of 5 [Ω]

그림 6은 OCR 정정을 검증하기 위한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 시간은 1.5 [s]이며, 사고는 0.1 [s]에 발생하였고 사고는 영구사고로 가정하였다. 그림 6(a)에서, 사고가 0.1 [s]에 발생하여 OCR Travel이 1이 되는 0.583 [s]에 OCR이 트립되는 것을 확인할 수 있다. (b)에서 보면, 5 [Ω]의 SFCL이 설치되어 고장전류가 (a)에 비하여 고장전류가 많이 감소하였음에도 불구하고 TD를 3.01로 재조정하였기 때문에 동일시간이 경과한 후 트립되는 것을 알 수 있다.

그림 7과 8은 리클로저가 2F2D로 동작할 경우 리클로저 1과 2에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 7을 보면 그림 6의 OCR의 경우와 마찬가지로, SFCL을 설치하지 않았을 경우의 트립시간과 SFCL이 설치된 경우의 트립시간은 고장전류의 크기가 감소하더라도 적절한 TD 정정에 의하여 동일한 시간에 트립되는 것을 알 수 있다. 그림 8의 리클로저 2의 경우에도 마찬가지임을 알 수 있다.



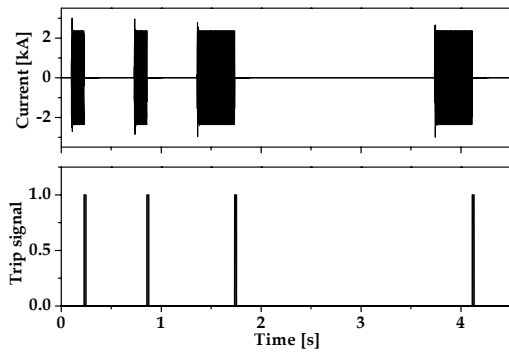
(a) 사례1 - SFCL 없는 경우



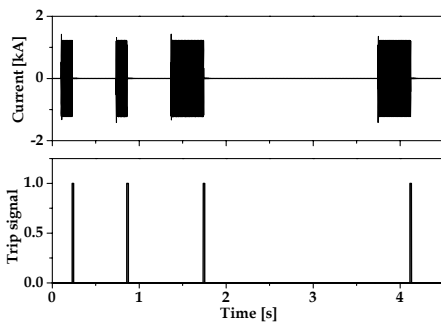
(b) 사례1 - 5 [Ω]의 SFCL 연결시

그림 6 사례 1 - OCR

Fig. 6 Case 1 - OCR



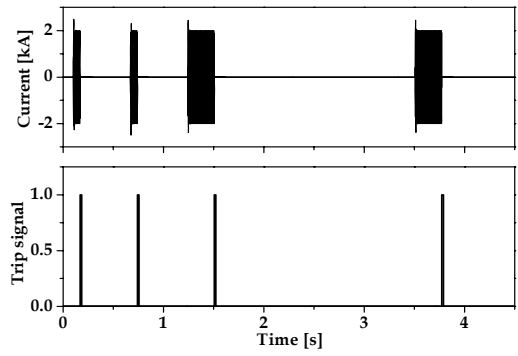
(a) 사례2 - SFCL 없는 경우



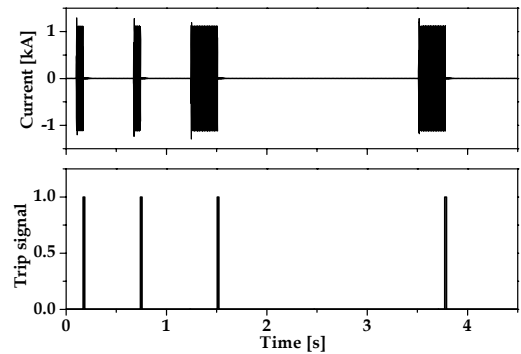
(b) 사례2 - 5 [Ω]의 SFCL 연결시

그림 7 사례 2 - Recloser 1

Fig. 7 Case 2 - Recloser 1



(a) 사례3 - SFCL 없는 경우



(b) 사례3 - 5 [Ω]의 SFCL 연결시

그림 8 사례 3 - Recloser 2

Fig. 8 Case 3 - Recloser 2

6. 결 론

본 논문에서는 초전도 한류기를 배전계통에 적용하기 위하여 배전시험계통에서의 초전도 한류기 적용시 OCR 및 Recloser의 동작특성 분석 및 보호협조 방안을 제시하였다. 우선, 배전계통을 고장계산 및 보호협조에 이용할 수 있도록 모델링하였다. 이 선로에서 고장계산을 통하여 보호기기를 정정하였으며, 다음으로 다양한 임피던스값을 갖는 초전도 한류기 적용시 각각의 경우에 대하여 트립시간이 SFCL 설치전과 동일하도록 보호기기를 재정정하여 보호협조를 구축할 수 있도록 하였다. 사례연구를 통하여 OCR, OCR-Recloser, OCR-Recloser-Recloser 협조를 분석하였으며, 초전도한류기 설치 전과 후에 모두 정상적으로 보호협조가 가능함을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원 및 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (2011-0013024)

참 고 문 헌

- [1] 안재민, 김진석, 문종필 외, "배전계통 초전도 전류 제한기 적용시 보호협조 분석", 대한전기학회 논문지, 제 57권, 5호, 2008년 5월.
- [2] 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
- [3] H. Kameda, and H. Taniguchi, "Setting Mothod of Specific Parameter of a Superconducting Fault Current Limiter Considering the Operation of Power System Protection," IEEE Tranactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, June 1999
- [4] B. W. Lee, J. Sim, K. B. Park, I. S. Oh, S. W. Yim, H. R. Kim, O. B. Hyun, "Fabrication and Tests of the 24kV class Hybrid Superconduction Fault Current Limiter", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 9, No. 4, pp. 32-36, 2007
- [5] 김명후, 김진석, 유일경 외, "배전계통에 초전도 전류제한기 적용시 Recloser-Fuse 협조 방법에 관한 연구", 대한전기학회논문지 제 58권 10호, pp. 1385-1841, 2009년 10월.
- [6] 김진석, 임성훈, 문종필 외, "MTR 중성점 접지에 초전도 전류제한기 적용시 지락과전류계전기 동작 분석", 대한전기학회논문지 제 58권 11호, pp. 2089-2094, 2009년 11월.
- [7] 한전전력연구원, 22.9KV 배전 실증시험장 건설에 관한 연구, 기술보고서, 1995년.
- [8] J. F. Moon, S. H. Lim, J. C. Kim, S. Y. Yun, "Assessment of the Impact of SFCL on Voltage Sags in Power Distribution System", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, pp. 2161-2164, Jun 2011

저 자 소 개



문 종 필 (文 鍾 必)

1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2009년~현재 한국교통대학교 전기공학과 조교수

Tel : 043-841-5146

Fax : 043-841-5140

E-mail : moon@ut.ac.kr