

전력계통에서의 초전도 한류기 설치를 위한 기초적 연구

Preliminary investigation of a proposed site for SFCL installation in the power systems

김용학*, 윤용범**, 최효상***, 현옥배****

Yong-Hak Kim*, Yong-Beum Yoon**, Hyo-Sang Choi***, Ok-Bae Hyun****

Abstract : We have conducted preliminary investigation to propose a suitable site for superconducting fault current limiter(SFCL) installation in the KEPCOs 154kV grid. This investigation limited the application SFCL to the bus-tie position of the grid in the Seoul area. First, we calculated maximum potential fault current for all substations. Then, among substations where the fault current exceeds the CB capacity, we selected two substations where buses are being operated untied. For the selected two, S S/S and M S/S, fault currents at the M S/S were estimated to be 22.5kA and 24.3kA for two buses untied, respectively, but 44.2kA if buses were tied. Simulation using a hypothetical SFCL of 5 Ohm impedance showed that it controlled the fault current up to 20.1kA for bus-tie position, 28.4kA and 29.9kA for both buses, respectively, each of which are under the capacity of the currently installed 31.5kA GIS. For both substations a SFCL with 5 Ohm impedance successfully controls the fault current under the CB capacity, and 10 Ohm SFCL may be recommendable to maximize the SFCL effect.

Key Words : superconducting fault current limiter, fault current, bus-tie, line impedance

1. 서 론

전력계통에서 전력수요가 증가하게 되면 이에 대응하여 전원 및 송변전 설비 신증설이 이루어지고, 이로 인하여 전력계통의 등가 임피던스가 점점 작아져서 계통의 단락고장전류가 지속적으로 증가하게 된다. 우리나라의 경우 외국에 비하여 송전선로가 짧고, 계통변전소간을 연결하는 송전선로가 망상형태로 구성되어 있어 수요가 밀집되어 전력계통 고장전류가 증대되고 있는 추세이다. 현재 우리나라 송전계통의 중심인 345kV 전력계통 차단기의 정격차단전류는 40kA이다. 그러나 전원 밀집지역과 같이 계통 등가임피던스가 작은 지역에서는 고장전류가 차단내력을 상회하고 있어 모선분리 및 차단기 차단내력 상승 등 많은 노력이 진행되고

* 정 회 원 : 한전 전력연구원 선임보연연구원
 ** 정 회 원 : 한전 전력연구원 책임연구원
 *** 정 회 원 : 한전 전력연구원 선임연구원
 **** 정 회 원 : 한전 전력연구원 책임연구원
 원고접수 : 2002년 10월 02일
 심사완료 : 2002년 11월 06일

있다[1].

이와 같은 노력의 일환으로 초전도 한류기(SFCL)에 의한 고장전류 억제대책이 실계통 적용에 따른 특성연구를 중심으로 국·내외적으로 활발히 진행되고 있다[2-4]. 본 연구팀에서도 국내 154kV급 임의의 모선간에 저항형 한류기를 적용하여 시뮬레이션 한 바 있으며 3상 단락사고의 경우 사고전류 60kA에 대하여 100 Ω의 초전도 한류기로서 39kA 까지 고장전류를 억제함을 확인하였다[5]. 이번 논문에서는 우리나라에서의 고장용량 현황을 고찰하고 고장전류 저감을 위하여 모선분리 운전중인 154kV 변전소를 대상으로 SFCL 적용시의 효과를 분석하고 SFCL이 가져야 할 적정 임피던스값을 제시하였다.

2. 본 론

2.1. 전력계통에서의 고장용량 저감대책

전력계통에서 고장전류가 차단기 차단내력을 상회하게 되면 고장전류를 안정하게 차단할 수 없어 해당 차단기 소손은 물론 인접 전력설비에 까지 사고가 파급되어 경제적 손실은 물론 전력공급의 신뢰성을 저하시킨다. 따라서, 차단내력이 더 큰 고가의 차단기로 교체하거나 고장전류를 차단기 차단내력 이하로 억제하는 대책을 강구하여야 하나 차단기 차단내력을 증대시키는 것은 차단기 구성요소 및 기술적인 제약에 따라 한계가 존재하게 된다.

표 1. 고장전류 저감대책

Table 1. Traditional ways of fixing a fault current

고장 전류 억제 대책	장 점	단 점
차단기 교체	기존기술로 신뢰도 높음	*교체비용 과다. *최대 100kV까지 차단
모선 및 선로 분리	용이하게 고장전류 억제	*시스템 신뢰성 및 운용상 유연성 저하
직렬 한류리액터	구조간단, 기존기술로 이용가능	*큰 전압강하 *정상 운전시 손실 발생

고장전류가 증대되어 기존 차단기 차단내력을 상회하게 되면 고임피던스 전력설비 채용, 직렬 한류리액터 설치, 연계선로 분리 및 모선 분리 등을 실시하여 고장전류를 억제하고 있으나 인접계통에 과부하, 전압

변동 심화, 전력계통 안정도 저하 및 송전 유연성 결여 등 단점이 있다. 표 1은 현재의 고장전류 대처 방안의 장단점을 나타낸 것이다[6].

2.2. 초전도 한류기 적용 타당성 분석

2.2.1. 적용대상 계통

모선분리 운전을 하고 있는 임의의 154kV 급의 M S/S (M: 임의의 변전소명, S/S: substation, 변전소)와 S S/S에 저항 또는 리액터형 SFCL를 설치했을 경우 그 적용효과를 분석하였다. M S/S와 S S/S는 부하중심지역에 위치하면서 전력공급에 중요한 기능을 담당하고 있으며 인근계통구성은 각각 그림 1, 2와 같다. 그림 1에 나타난 바와 같이 M S/S는 J S/S로부터 154kV 2회선을 통하여 전력을 받아 자체 부하에 공급하고 나머지는 Y1 S/S 및 Y2 S/S에 전력을 공급하고 있다. 또한 DMY (임의의 모선명)에 연결된 부하는 R S/S를 통하여 전력을 공급받고 있다. 그림 2에 나타난 바와 같이 S S/S의 일부 부하는 A S/S로부터, 그리고 SDMY에 연결된 부하는 D S/S 및 N S/S로부터 공급받고 있다. 상기 그림 1, 2에 나타난 바와 같이 모선사이에 있는 차단기를 개방하여 모선을 분리운전함으로써 모선에서의 고장발생시 고장전류가 차단기의 정격차단전류 기준(31.5kA 또는 50.0kA)이하를 유지하도록 하고 있다.

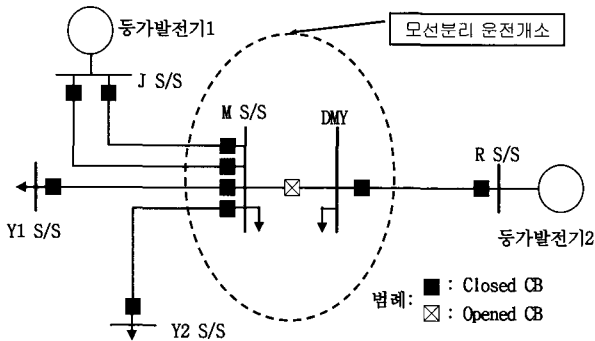


그림 1. 모선분리 운전중인 M S/S 인근 계통도
Fig. 1. The diagram of M S/S being operated in bus untied

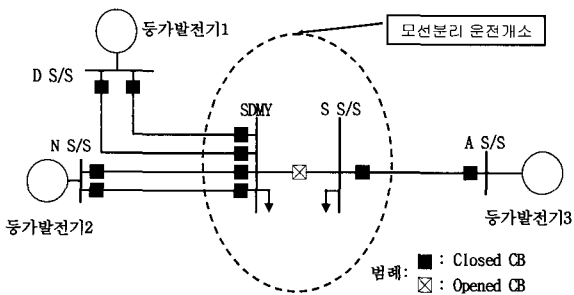


그림 2. 모선분리 운전중인 S S/S 인근 계통도
Fig. 2. The diagram of S S/S being operated in bus untied

2.2.2. SFCL 설치개념도 및 모의절차

(1) SFCL 설치 개념도

본 논문에서는 SFCL을 일정저항 혹은 리액터스로 모델링하였으며, 그림 1, 2계통의 모선운전분리개소에 SFCL를 설치하여 모선연계운전을 하는 경우 SFCL

의 저항값 혹은 리액터스값에 따라 고장전류가 어떻게 제한되는가를 모의하였다. 이를 위하여 SFCL은 분리된 두 모선사이에 설치되는 것으로 모델링하였으며 세부설치 개념도는 그림 3과 같다. 그림 3에서 CB (circuit breaker)는 차단기를 나타낸다.

또한, 그림 3의 SFCL, 즉 SFCL1 및 SFCL2가 저항형인 경우와 리액터스형인 경우로 구분하여 각각의 임피던스를 각 1Ω, 5Ω, 10Ω, 30Ω로 변화시키면서 고장전류 제한효과를 고찰하였다. 모의수단으로는 전력계통 해석에 통상적으로 사용되는 프로그램인 PSS/E를 이용하였다[7].

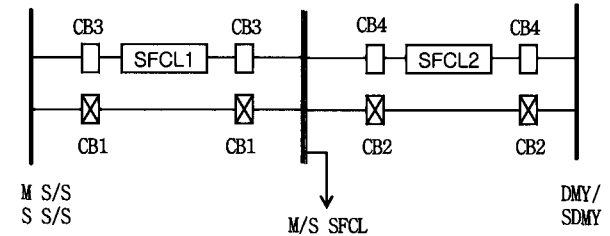


그림 3. SFCL 설치 개념도
Fig. 3. The diagram of applied SFCL in bus tie.

(2) 모의절차

- ① 모선분리 운전중인 M S/S, S S/S 모선을 연계하고(CB close) SFCL을 투입한다.
- ② 정상운전시 CB3, CB4는 개방하고 CB1, CB2를 투입한다.
- ③ 고장발생시 CB3, CB4는 투입하고 CB1, CB2를 개방한다.
- ④ SFCL 임피던스값을 설정한다.
- ⑤ 3상 모선고장을 발생시키고 고장전류 및 각각의 송전선로로부터 유입되는 고장전류분포를 파악한다.
- ⑥ 고장전류가 차단기 정격차단전류 이내인지를 검토한다.
- ⑦ ③ - ⑥의 과정을 반복한다.

2.2.3. SFCL의 고장전류 제한효과

상기한 모의절차에 따라 표 2에 나타난 바와 같이 3가지 경우로 구분하여 SFCL에 의한 고장전류 제한효과를 분석하였다.

표 2. SFCL 효과분석 케이스 분류

Table 2. The various cases for SFCL application

순번	세부내역
Base Case	M S/S, S S/S 모선 분리시
Case 1	M S/S 모선 연계 운전 및 SFCL 투입시
Case 2	S S/S 모선 연계 운전 및 SFCL 투입시

(1) 저항형 SFCL을 적용한 경우

저항형의 경우 SFCL 임피던스 변화에 따른 고장전류 변화추이는 표 3과 같다. 표 3으로부터 SFCL를 설치하여 두 변전소에서 모선 연계운전을 하는 경우 차단용량 이내로 고장전류를 제한하기 위해서는 M S/S의 경우 SFCL 임피던스값은 5Ω 이상, S S/S의 경우는 1Ω 이상이어야 한다는 것을 추정할 수 있다.

3. 결 론

표 3. 저항형 SFCL의 임피던스값에 따른 고장전류 변화 추이

Table 3. The fault current values for various impedances of a resistive SFCL

변전소명	차단용량	고장전류 (kA)					
		모선분리 (No SFCL)	모선연계(SFCL, 저항형(Ω))				
			0	1	5	10	30
Case1(M S/S에 저항형 SFCL 적용시)							
M S/S	31.5kA	22.5	44.2	38.3	26.1	23.7	22.7
DMY		24.3	44.2	39.9	29.1	26.4	24.9
M SFCL		-	44.2	40.3	24.9	15.4	5.8
S S/S	50.0kA	33.2	33.3	33.2	33.2	33.2	33.2
S DMY		31.9	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
S SFCL		-	-	-	-	-	-
Case2(S S/S에 저항형 SFCL 적용시)							
M S/S	31.5kA	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
DMY		24.3	24.4	24.4	24.4	24.3	24.3
M SFCL		-	-	-	-	-	-
S S/S	50.0kA	33.2	53.1	45.3	34.9	33.7	33.3
S DMY		31.9	53.1	45.0	33.9	32.6	32.1
S SFCL		-	53.1	47.4	26.8	16.0	5.9

표 4. 리액터형 SFCL의 임피던스값에 따른 고장전류 변화 추이

Table 4. The fault current values for various impedances of a reactive SFCL.

변전소명	차단용량	고장전류 (kA) 비 고					
		모선분리 (No SFCL)	모선연계(SFCL, 리액터형)				
			0	1	5	10	30
Case1(M S/S에 리액터형 SFCL 적용시)							
M S/S	31.5kA	22.5	44.2	36.6	28.4	25.9	23.7
DMY		24.3	44.2	37.5	29.9	27.6	25.5
M SFCL		-	44.2	35.6	20.1	12.9	5.3
S S/S	50.0kA	33.2	33.3	33.2	33.2	33.2	33.2
SDMY		31.9	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
S SFCL		-	-	-	-	-	-
Case1(S S/S에 리액터형 SFCL 적용시)							
M S/S	31.5kA	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
DMY		24.3	24.4	24.4	24.4	24.3	24.3
M SFCL		-	-	-	-	-	-
S S/S	50.0kA	33.2	53.1	44.7	37.5	35.6	34.1
SDMY		31.9	53.1	44.0	36.4	34.4	32.8
S SFCL		-	53.1	41.2	21.8	13.7	5.5

(2) 리액터형 SFCL을 적용한 경우

리액터형 SFCL의 경우 임피던스 변화에 따른 고장전류 변화추이는 표4와 같다. 표4로 부터 SFCL을 설치하여 두 변전소에서 모선연계 운전을 하는 경우 차단용량 이내로 고장전류를 제한하기 위해서는 M S/S의 경우 저항형 SFCL의 경우와 동일하게 임피던스값은 5Ω 이상, S S/S의 경우는 1Ω 이상이어야 한다는 것을 추정할 수 있다.

본 논문에서는 모선분리 운전중인 154kV급 M S/S와 S S/S를 대상으로 SFCL 설치 효과를 제시하였다. 정상상태에서의 평형고장계산 과정을 이용하여 저항형 및 리액터형 SFCL의 임피던스 변화에 따른 고장전류 제한 효과를 고찰하여 정격차단전류 이내로 유지 하기 위한 SFCL의 적정 임피던스값을 제시하였다. 모선분리운전시 M S/S와 DMY에서 각각 22.5kA, 24.3kA의 고장전류를 보였던 선로가 모선연계운전시 44.2kA까지 상승하였다. 이때 5의 한류 임피던스를 갖는 초전도한류기를 이 계통에 적용한 결과 28.4kA, 29.9kA까지 억제되었으며, 10의 한류 임피던스를 갖는 초전도한류기를 적용할 때 한류효과를 극대화할 수 있음을 확인하였다.

정상상태의 고장계산은 SFCL의 형태(저항형, 리액터형)에 관계 없이 한류임피던스 값은 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그러나, 과도상태의 고장계산은 차이가 있을 것으로 예상되는바 향후 이에 대한 해석을 통하여 저항형 SFCL과 리액터형 SFCL의 장단점을 도출할 예정이다.

SFCL이 실계통에 적용되는 경우, 전력 계통의 운용에 많은 변화(전력계통 안정도, 고장전류 저감, 계통보호협조)를 가져올 것으로 예상되며 전력계통측면 SFCL모델개발 등을 비롯하여 각종 효과검증을 위한 실증 시험 환경의 구축이 앞으로 요구된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 차세대 초전도응용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 김준환, 이강완, 고장전류 증대와 대응 방안 (상), 전기저널, 256, 19-25 (1998).
- [2] 김준환, 이강완, 고장전류 증대와 대응 방안 (하), 전기저널, 257, 24-31 (1998).
- [3] Yusuyuki Shirai, Kazuhiro Fujikawa, "Recovery Characteristics of Fault Current Limiter with Adjustable Trigger Current Level", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, 144-147 (1999).
- [4] Hiroyuki Hatta, Shinichi Muroya, Tanzo Nitta, Yusuyuki Shirai, Masami Taguchi, "Experimental Study on Limiting Operation of Superconducting Fault Current Limiter in Double Circuit Transmission Line Model System", JSPS - RFTF9701004, 172-175 (2002).
- [5] 최효상, 황시돌, 현옥배, 단락사고에 대한 저항형 초전도 한류기의 실계통 시뮬레이션, 한국초전도저온공학회, 1권, 1호, 28-32 (1999).
- [6] 김경대, 문봉수, "전력계통 고장용량 증가에 따른 계통 신뢰도향상에 관한 연구", 전기학회 춘계학술대회, 137-139 (2002).
- [7] POWER TECHNOLOGIES, INC. "Program Application Guide PSS/E-28", (2001).

저 자 소 개



김용학(金容鶴)

1969년 08월 13일생, 1994년 전남대 전기과 졸업, 1996년 동대학원 전기과 졸업(석사), 현재 한국전력공사 전력연구원 근무



윤용범(尹用範)

1958년 09월 28일생, 1984년 부산대 전기공학과 졸업, 1995년 서울대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996-97 미국 MIT Visiting Scientist, 현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원



최효상(崔孝祥)

1966년 02월 21일생, 1989년 전북대 공대 전기공학과 졸업, 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원



현옥배((玄鈺培)

1953년 02월 11일생, 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 미 아이오와 주립대 물리학과 졸업(이학박사), Ames Lab., NIST, ISTEAC 연구원 역임, 현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원