

수용가계통에서의 초전도한류기 적용가능성 검토

이승렬 김중을 윤재영
한국전기연구원

A study on the application of HTS-FCL in Customer System

Seung Ryul Lee Jong Yul Kim Jae Young Yoon
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - As the load density of KEOCO system is higher, the fault current can be much higher than SCC(Short Circuit Capacity) of circuit breaker. Even though there are several alternatives to reduce fault current, as the superconductivity technology has been developed, the HTS-FCL (High Temperature Superconductivity Fault Current Limiter) can be one of the attractive alternatives to solve the fault current problem. This study presents the application of HTS-FCL in real customer system.

1. 서 론

국내 전력계통은 높은 경제성장과 더불어 부하가 급증해왔으며, 특히 도심지역은 부하의 고밀도화로 인하여 고장전류 등의 문제가 발생하게 되었다. 국내 전력계통의 고장전류 문제는 부하집중 등으로 인해서 향후 더욱 심각해질 전망이다. 이에 따른 고장전류 저감대책으로서 현재, 선로개방, 모선분리, 직렬리액터 적용, 차단용량 증가 등의 대책을 강구할 수 있지만, 각각의 대안들은 계통관점에서 약간의 문제점을 갖거나 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 때문에, 고장전류 억제, 계통 안정도 및 공급신뢰도 확보, 전력기기의 경제적 효율성 등 여러 가지 문제를 동시에 해결하기 위한 한가지 방안으로서 초전도 한류기(Superconducting Fault Current Limiter : SFCL)의 도입이 제기되었다. 본 연구에서는 초전도한류기의 도입방안으로서 수용가계통에서의 그 적용가능성을 검토하는 것을 목적으로 한다.

2. HTS-FCL 계통적용가능성

2.1 154kV 수용가계통

2.1.1 검토사례 선정배경

국내 전력계통 내의 일부 154kV 자가용 수용가의 경우, 고장전류의 문제가 발생할 소지가 있다. 이러한 경우, 고장전류 문제를 해결하기 위한 대안으로서 초전도한류기를 고려할 수 있다. 본 사례는 국내 실 계통에서의 고장전류 문제가 있는 154kV 직수용가에 초전도한류기를 적용하는 경우이다. 본 연구에서는 우리나라의 대표적인 154kV 자가용 수용가에 대한 고장전류 문제 발생여부 및 초전도한류기 적용가능성을 검토하기 위한 사례로서 울산 154kV 변전소에서 수전하는 H 사의 CASE를 선정하여 검토하였다. 검토사례의 선정배경은 다음과 같다.

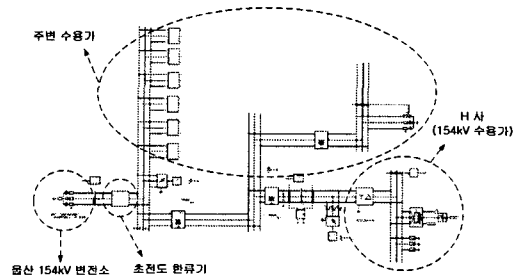
- 2001년 11월 단락용량초과로 인한 정전사고 발생
- 정전사고 발생내역 및 피해
 - 모선 3상고장 → 단락용량 초과 및 차단기 파괴
 - 지속정전 발생

- 석유화학 공장의 특성상 막대한 피해 초래
- 차단용량 문제가 발생하면 차단기는 물론이고 모선, MOF, DS 등 대부분의 설비를 교체해야 함.
- 수전변전소 모선 포함 변전설비 교체비용으로 20 ~ 30 억 소요예상
- 향후 단락용량 대폭 증가 예상
- 국내의 상당수 154kV 직수용가들이 당면하고 있는 문제임
- 향후 FCL 혹은 단락용량 증대 필요 : 초전도한류기 적용 가능성 높음

위에서 기술한 바와 같이 H사는 단락용량 초과로 인한 정전사고가 발생한 경험이 있으며, 이에 따라서 차단용량 문제로 인해서 단락용량의 대폭증가가 불가피하다고 결정을 하였다.

2.1.2 계통구성

울산 154kV 변전소는 당시 모선분리를 하여 운전 중이었으며, 경우에 따라서 모선통합 운전을 하고 있는 실정이다. 본 사례에서 고장이 발생한 시점의 울산 변전소의 경우, 모선통합 운전을 한 것으로 추정되며, 모선통합 운전시 고장전류 문제가 더욱 심각하므로 본 검토에서는 기본적으로 모선통합시의 계통을 고려하여 검토 CASE를 상정하였다. 본 CASE의 상세계통검토를 위한 EMTDC 계통을 구성하면 다음 그림과 같다.



<그림 1> 154kV 수용가계통 구성도

2.1.3 계통데이터

정확한 계통해석을 위해서는 상기 계통구성과 함께 전 원임피던스, 선로데이터 등의 데이터가 필수적이다. 보다 신뢰성 있는 계통해석을 위한 계통데이터는 다음과 같다.

1) 울산 154kV 변전소 전원 등가임피던스

고장해석을 위해서는 우선 전원 등가임피던스가 필요하다. 본 검토에서는 한전을 통해서 입수한 울산

154kV 변전소 모선 등가임피던스를 사용한다. 모선 등가임피던스는 다음과 같다.

- 울산 154kV 변전소 모선 등가임피던스
 - 정상분 : $Z1 = 0.046 + j1.032$ [%]
 - 영상분 : $Z0 = 0.146 + j0.963$ [%]

2) H사 부하데이터

계통해석을 위해서 적용한 H 사의 부하데이터는 다음과 같다.

- 전체 부하 유효전력 용량 : 10MW
- Static Load (전체부하의 15%) : $1.5+j10.75$ (PF=0.95)
- Dynamic Load (전동기부하, 전체부하의 85%) : 8.5MW(11394.1HP), 역률 0.9기준 9.44MVA

3) 울산 154kV 변전소 수전 수용가 데이터

일반적으로 주변 수용가의 존재여부가 고장전류 해석 결과에 큰 영향은 미치지 않지만, 본 검토에서는 보다 상세한 검토를 위해서 주변 자가용 발전기의 영향을 등가적으로 고려하여 계통해석을 하였다. 울산 154kV 변전소 산하의 154kV 수용가 현황은 다음 표와 같다.

<표 1> 울산 154kV 변전소 연결 자가용수용가 선로사양

자가용 수용가명	선로사양	길이(km)
DH 사	ACSR 240 1회선	3.787
HW 사	ACSR 240 1회선	1.694
SS 사	ACSR 240 1회선	3.334
S 사	CV 200 1회선	2.2
HS 사	ACSR 240 1회선	2.2
T(1) 사	ACSR 240 1회선	0.854
T(2) 사	CV 400 1회선	1.831
B 사	CV 400 1회선	0.4
HD 사	ACSR 240 1회선	2.587
DHW 사	ACSR 240+360	1.6

EMTDC 계통분석에서 송전선로 임피던스는 도체 특성자료 및 송전선로 첩합의 기하학적 데이터를 입력하여 구할 수 있지만, 현실적으로 송전선로의 구간별 첩합 형태가 서로 상이하며 정확한 관련 데이터를 구하는 것이 어렵다. 이러한 단위 길이당 선로정수의 정확성이 고장전류 해석결과에 미치는 영향은 극히 미미하다. 따라서, 송전선로 임피던스를 현장 자료조사와 한전에서 사용하는 송전 도체의 선종별 표준 임피던스 및 기타 참조자료를 적용하였다.

<표 2> 주변 수용가 수전선로 임피던스 (154kV, 100MVA 기준)

도체 선종	정상분 임피던스(%/km)			영상분 임피던스(%/km)		
	R1	X1	Y1	R0	X0	Y1
ACSR 240 ^{*1)}	0.0565	0.1920	0.0811	0.1156	0.4329	0.0333
ACSR 160 ^{*2)}	0.0896	0.2097	0.0776	0.1994	0.6689	0.0330
CV 200 ^{*3)}	0.0686	0.0695		0.0709	0.0623	
CV 400 ^{*4)}	0.02171	0.07029		0.04686	0.05657	

- *1) R1, X1, R0, X0는 한전자가용 선로임피던스 자료 적용
Y1, Y0는 계통보호업무 참고자료집 데이터 적용
- *2) 한전 보호업무 참고자료 HDCC 150[mm] 데이터 준용
- *3) 한전 자가용 선로 임피던스 자료 적용 (울산-SK CV200 선로 데이터)
- *4) CV400은 사양이 동일한 타 선로 데이터 준용

<표 2>는 한전의 계통 보호업무 참고자료에 수록되어 있는 도체 선종별 임피던스 중에서 본 사례의 계통해석과 관련 있는 선종별 단위길이 당(km당) 임피던스를 수록한 것이다.

4) 초전도한류기 데이터

초전도한류기의 투입효과를 확인하기 위해서 기 개발된 EMTDC 초전도한류기 모델을 적용하였다. 초전도한류기의 투입위치는 울산 154kV 변전소 후단이며, 초전도한류기의 최종저항값은 154kV 100MVA 기준으로 0.05 pu (= 11.858 Ω)으로 가정하였다.

2.1.4 해석결과

상기 구성된 계통에서 t = 1 초에 고장이 발생한 것으로 모의하였으며, 고장위치는 울산 154kV 모선과 H사 154/6.6kV 변압기 154kV측으로 가정하였다. 초전도한류기 투입 전후의 검토결과는 다음과 같으며, 본 결과에서 초전도한류기의 적용효과를 확인 할 수 있다.

<표 3> 고장해석 결과

고장 위치	울산 154kV 모선		H사 변압기 1차측	
	HTS-FCL 적용 전	HTS-FCL 적용 후	HTS-FCL 적용 전	HTS-FCL 적용 후
고장 전류	41.63 kA	10.20 kA	31.44 kA	9.82 kA

위의 결과에서 알 수 있듯이 초전도한류기를 적용하기 전에 154kV 수용가측 고장이 발생하였을 경우, 고장전류 수치가 31.44 kA로서 일반적인 154kV 수용가 측 차단기 용량인 31.5kA에 거의 육박하는 수치를 기록하고 있다. 이는 계통운영상태 및 주변 수용가 등의 영향에 의해서 경우에 따라서는 차단기 용량을 초과할 가능성이 있음을 나타낸다. 이 경우, 고장문제에 대한 대책 수립이 필요한데, 일반적으로 고려하는 방법은 차단용량의 증대이다. 그러나, 이 방안은 MOF, DS 등 기타 관련 설비를 모두 교체해야하므로 경제적인 비용이 많이 소요된다는 단점이 있다. 따라서 고장전류문제를 해소하기 위한 대안으로서 초전도한류기를 적용한다면, 상기 표의 결과에서 알 수 있듯이 현재의 고장전류를 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 향후 단락용량이 증대되는 악조건에서도 고장문제를 해결할 수 있을 것으로 예상된다. 그러므로 초전도한류기의 도입은 경제적인 면의 장점을 가질 뿐만 아니라, 고장전류 문제의 근본적인 해결방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 22.9kV 수용가계통

2.2.1 검토사례 선정배경

본 사례는 22.9kV 자가용 수용가의 고장전류 문제를 확인하여 고장전류 문제가 있을 경우, 이에 대한 대책방안으로서 초전도한류기를 적용하기 위한 사례이다. 적절한 사례를 선정하기 위해서 국내 22.9kV 자가용 수용가에 대한 자료를 수집하였으며, 그 중 고장전류 문제가 심각할 것으로 판단되는 1개 CASE를 선택하여 검토사례로서 선정하였다. 본 사례는 서울지역의 신촌 154kV 변전소에서 수전하는 22.9 kV 수용가 E에 대한 검토사례이며, 계통 구성 및 관련 데이터에 대한 세부적인 내용은 다음과 같다. 기본계통 데이터는 실제 계통 데이

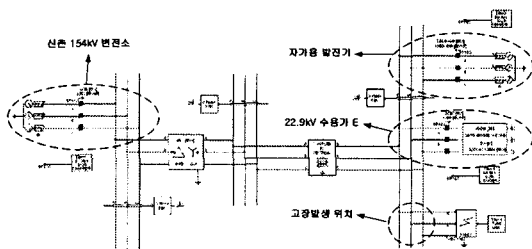
터에 가까운 값을 사용하기 위해서 2010년 PSS/E 한전계통 데이터를 활용하였다.

- 신촌 154 kV 변전소 (PSS/E 계통데이터 활용)
 - 모선 전압 : $V_s = 160.79$ kV
 - 전원 등가임피던스 : $Z_s = 3.5224 \angle 79.21^\circ \Omega$ (고장전류 = 26.23 kA 기준)
 - : 2010년 PSS/E 한전계통 데이터를 대상으로 고장계산을 수행하여 선정
- 최대부하
 - : $P = 3.376$ MW, $Q = 1.3504$ MVAR
 - 무효전력 Q는 역률 0.93을 가정하여 추정하였음.
- 배전선로 선종 및 길이
 - 선종 : CN 325mm² (873m), 전력선 EC 160mm² (950m), 중앙선 AL 95 mm² (950m)
 - 기본검토 계통 구성시는 CNCV 325 mm² (1km)로 가정했음.

상기의 실제 계통데이터를 이용한 계통검토와 별도로, 22.9kV 수용가의 일반적인 고장전류 문제를 검토하기 위해서 가장 악조건에서의 고장해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 이 때, 22.9kV 수용가 E는 자가용 발전기가 없는 수용가이지만, 자가용 발전기가 고장전류 문제에 미치는 영향을 확인하기 위해서 자가용 발전기 역시 존재하는 경우까지 가정하여 계통검토를 하였다. 고장전류 문제에서의 악조건으로 가정하여 고려한 관련 데이터는 다음과 같다.

- 신촌 154 kV 변전소 전원 등가임피던스
 - 모선 전압 : $V_s = 160.79$ kV
 - 전원 등가임피던스 : $Z_s = 1.8566 \angle 80^\circ \Omega$ (고장전류=50kA 수준)
- 자가용 발전기
 - 전압 : 22.9kV
 - 전원 등가임피던스 : $26.2205 \angle 80^\circ \Omega$ (3MVA, 15% 기준)

본 사례는 22.9kV급 배전계통에 대한 검토이므로 EMTDC 프로그램을 사용한 계통검토를 기본으로 한다. 위의 데이터를 적용하여 EMTDC 기본검토계통을 구성하면 아래 그림과 같다.



<그림 7.2> 22.9kV 수용가계통 구성도

2.2.2 해석결과

상기 구성된 계통에서 $t = 1$ 초에서 고장이 발생한 것으로 가정했을 때, 고장전류 결과는 다음과 같다. 아래 결과에서 보면, 실제 계통에서 고장전류는 약 8.48 kA로서 수용가의 22.9kV 차단용량인 12.5 kA를 고려할 때, 고장전류 문제는 없을 것으로 판단된다. 또한, 자가용 발전기의 투입함으로써 약 0.5 kA 정도의 고장전류 증가를 보이므로 자가용 발전기가 고장전류 문제에

미치는 영향은 매우 작을 것으로 추정된다. 좀 더 심각한 고장전류 문제를 갖도록 154kV 변전소의 고장전류 수준을 50kA 정도로 가정하여 검토한 결과 역시 22.9kV 수용가 측면에서는 고장전류가 약 9 kA 정도 로써, 고장전류 문제가 발생하지는 않는 것으로 확인되었다. 그러므로 본 검토 사례는 초전도한류기의 적용이 불필요할 것으로 판단된다.

<표 4> CASE-FCL-L2 고장전류 검토결과

검토조건	자가용 발전기 투입 전	자가용 발전기 투입 후
2010년 실제 운전조건 적용 (고장 전류 = 26.23 kA 기준)	8.48 kA	8.96 kA
154kV 변전소 $Z_s = 1.8566 \angle 80^\circ \Omega$ (고장전류 = 50 kA 수준) 가정	8.67 kA	9.16 kA

3. 결 론

본 연구에서는 실제 수용가계통에서의 초전도한류기 적용가능성을 판단하기 위해서 계통적용가능 사례를 도출하였으며, 각 사례에 대해서 세부계통해석을 수행하였다. 각 사례별 계통적용 필요성 및 가능성 결과를 나타 내면 다음과 같다.

<표 5> CASE별 해석결과

해석 CASE	적용대상 및 적용방법	계통적용 필요성 및 가능성
CASE-FCL-1	154kV 자가용 수용가	높 음
CASE-FCL-2	22.9kV 자가용 수용가	낮 음

- 고장전류 문제가 있는 154kV 수용가의 경우, 초전도한류기의 도입은 경제적인 면의 장점을 가질 뿐만 아니라, 고장전류 문제의 근본적인 해결방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.
- 국내 22.9kV 자가용 수용가에 대한 자료를 수집하여, 그 중 고장전류 문제가 심각할 것으로 판단되는 1개 CASE(신촌 154 kV 변전소에서 수전하는 22.9 kV 수용가 E)를 선택하여 고장해석을 수행 하였다. 그 결과 최악의 고장전류 문제를 갖는 조건을 고려하여도 고장전류 문제가 발생할 가능성은 매우 적은 것으로 확인되었다. 그러므로 22.9kV 수용가의 경우, 초전도한류기의 적용이 불필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

“본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도용융기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.”

[참 고 문 헌]

- [1] M. Noe, B. R. Oswald, "Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems", IEEE Transactions on applied superconductivity, 1999.6
- [2] H. Kameda, "Setting method of specific parameters of a superconducting fault current limiter considering the operation of power system protection" IEEE Transactions on applied superconductivity, 1999.6