

국내 실계통에서의 154kV 초전도한류기 계통적용 가능성 검토

論 文

53A-12-4

Feasibility Study on the Application of 154kV HTS-FCL in Korean Power System

李昇烈^{*} · 金鍾律^{*} · 崔興官^{**} · 尹在映^{***}

(Seung Ryul Lee · Jong-Yul Kim · Heung-Kwan Choi · Jae Young Yoon)

Abstract - As the load density of KEPCO system is higher, the fault current can be much higher than SCC(Short Circuit Capacity) of circuit breaker. Fault current exceeding the rating of circuit breaker is a very serious problem in high density load area, which can threaten the stability of whole power system. 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 154kV HTS-FCL in Korean power system.

Key Words : 초전도한류기, 고장전류, 154kV Power System, Bus-Tie

1. 서 론

1960년대 이후 경제발전과 함께 전력수요가 증가하여 전력계통이 점차 대형화하고 복잡화함에 따라 고장전류 문제 및 공급신뢰도 문제 등이 대두되었다[1]. 전력수요 증가에 따른 발전설비 및 송변전 시설의 확장으로 인하여 향후 국내 전력계통의 고장 전류는 점점 더 증가할 것으로 전망된다. 특히 우리나라는 수도권 지역의 부하 밀집 정도가 매우 높고 계통 구성 역시 복잡한 환상(Loop) 구조로 운영되고 있다. 때문에 부하밀도 및 계통구성형태 등으로 인한 고장 전류의 증가가 매우 심각할 것으로 예상된다.

이에 따른 고장전류 저감대책으로서 현재, 선로개방, 모선 분리, 직렬리액터 적용, 차단용량 증가 등의 대책을 강구할 수 있다[2]. 그러나 이러한 방안들은 고장전류 문제해결의 최선책이 아니며, 계통측면에서도 공급신뢰도 저하 등의 문제점을 야기할 가능성이 존재한다. 따라서 고장전류 문제를 해결하기 위한 근본적인 대안으로서 초전도한류기의 적용가능성을 검토해 볼 필요가 있다. 초전도한류기의 계통적용가능성에 대한 연구는 전세계적으로 초기단계에 있으며, 현재까지는 계통관점에서의 초전도한류기 기본영향이나 경제성 측면의 연구가 주를 이루고 있다[6~8]. 이러한 전세계적 조류에 따라 현재 국내에서도 초전도한류기 개발이 이루어지고 있으며, 현재 초전도한류기의 국내계통 적용가능성에 대한 본격적인 연구는 미미한 실정이다. 단지 초전도한류기

개발관련연구, 경제성관점 및 기기의 계통영향에 관한 기본 연구만이 일부 진행 중에 있다[9~12]. 본 연구에서는 우선 154kV 초전도한류기의 국내계통 적용가능 사례를 제시한 후, PSS/E 및 EMTDC를 이용하여 각 사례별 계통검토를 수행하였으며 최종적으로 적용가능 사례의 국내계통 적용가능성에 대하여 잠정결론을 도출하였다.

2. 국내계통의 고장전류 문제

2.1 전력수요의 편재

국내 전력계통의 특성 중 하나는 타 국가와 전력용통이 불가능한 단독계통(Island System)이며, 발전원은 중·남부

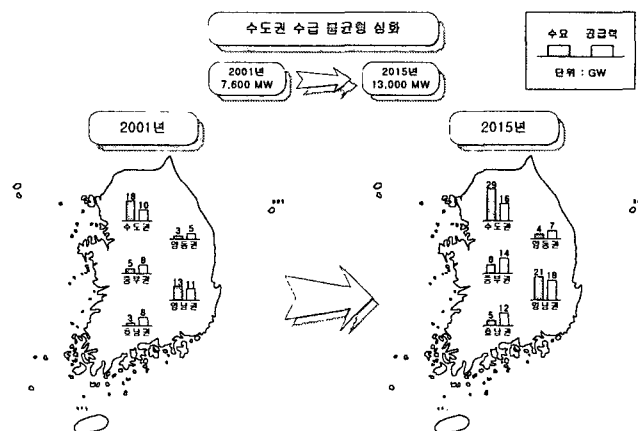


그림 1 수도권 전력수급 불균형 추이
Fig. 1 Unbalance of power supply and demand in the metropolitan area

* 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 研究員
E-mail : srlee@keri.re.kr

* 正會員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 研究員

** 正會員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 先任研究員

*** 正會員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 責任研究員

接受日字 : 2004年 5月 8日

最終完了 : 2004年 10月 15日

지역에 편재되고 전력수요는 수도권에 과도하게 집중되어 있다는 것이다. 이러한 특성은 전세계적으로 유례를 찾아보기 힘든 사례인데, 이처럼 전력계통에서 특정지역에 부하가 집중되어 있는 경우, 고장전류문제 및 전압문제 등 여러 가지 문제가 발생할 가능성이 매우 높다. 향후, 그림 1 수도권 전력수급 불균형 추이에서 보는 바와 같이 수도권의 전력부족과 지역별 전력수급 불균형은 더욱 심화될 전망이다[1], 부하 밀집지역인 수도권에서 전압 및 고장전류 문제 발생의 가능성은 더욱 커질 것으로 예상된다. 따라서, 기타 고장전류 저감책과 함께 초전도한류기와 같은 대책방안이 강구되어야 할 것이다. 또한, 이와 함께 수급안정 및 원활한 전력수송을 위한 송변전 설비의 보강이 필요할 것으로 사료된다.

2.2 국내계통 고장전류 추이

향후 국내 전력계통의 고장전류 추이를 살펴보기 위해서 2006년~2010년 한전 실계통 계획데이터를 대상으로 PSS/E 3상 고장해석을 수행하였다. 대상계통의 부하시점은 고장전류 문제가 좀 더 심각한 부하집중 시점을 선정하기 위해서 각 년도별 하계 peak 시점을 선택하였으며, 모의 대상지역 역시 부하밀도가 높아서 고장전류 문제가 발생할 것으로 판단되는 수도권지역을 선택하였다. 이러한 데이터를 기준으로 하여 PSS/E 고장해석을 통해서 154kV전체 모선에 대한 고장전류 수치를 확인하였다.

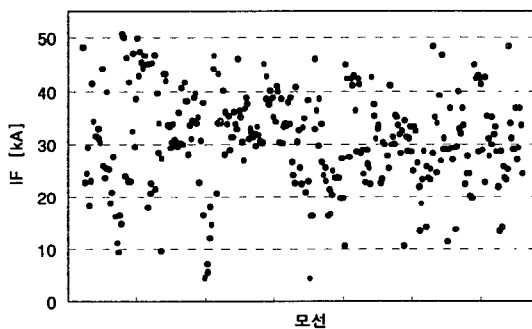


그림 2 2006년 수도권 154kV 모선 고장전류 분포
Fig. 2 Fault current of metropolitan 154kV bus in 2006

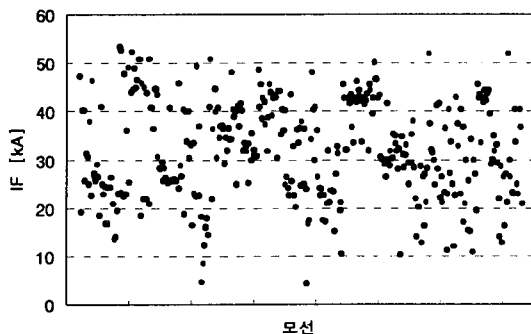


그림 3 2010년 수도권 154kV 모선 고장전류 분포
Fig. 3 Fault current of metropolitan 154kV bus in 2010

그림 2, 3의 수도권 154kV 모선 고장전류 분포를 보면, 154 kV 계통에서 계통 다중연계와 부하밀도 증가로 인하여 고장전류가 점점 증가하는 경향을 보이며, 2010년경에는 154 kV 차단기 최대 용량인 50 kA를 넘는 모선이 다수 발생할 것으로 예상된다. 이처럼 고장전류가 차단기 용량을 초과하는 경우, 고장으로 인한 사고 파급영향을 미연에 방지하고 전력계통의 안정적인 운영을 도모하기 위해서는 고장전류의 크기를 억제해야 한다. 다시 말해서 전력계통에서 고장이 발생할 경우, 고장전류를 억제하여 차단용량보다 적게 하여 차단기가 고장구간을 신속하게 분리할 수 있어야 한다.

2.3 고장전류 억제대책

현재 한전에서 검토되고 있는 고장전류 대책은 아래와 같으며 실 계통적용 시에는 경제성, 계통신뢰도 및 현장여건을 고려하여 선택적으로 추진하고 있다. 향후 장기송변전계획에 고장전류 억제대책의 하나로써 초전도한류기의 적용방안이 포함되기 위해서는 기술적 측면의 타당성은 물론 경제적 측면의 타당성도 반드시 확보되어야 할 것으로 사료된다.

- 345kV 변전소간 154kV 연계선로 분리 시행
- 모선분리 시행(모선 Section CB 설치, 인출변경 또는 단일모선 운전)
- 직렬리액터 설치 검토
- 대용량 차단기 적용(345kV : 50kA, 63kA, 154kV : 50kA)

3. 초전도한류기 도입필요성

위에서 살펴본 바와 같이 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 대안들이 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 초전도한류기(Superconducting Fault Current Limiter : SFCL)의 도입이 제기되었다. 초전도한류기는 정상 상태에서는 임피던스가 거의 0(zero)이지만, 고장상태에서는 상당히 큰 값을 가지므로 고장전류를 크게 감소시키는 효과를 나타낸다[6]. 그러므로 계통용량 증대에 따른 고장용량 증대에 효율적으로 대처하기 위하여 적용할 수 있다. 즉, 초전도한류기를 적용함으로써 고장발생시 전력계통을 안전하게 보호할 수 있음은 물론이고, 고장용량이 초과되는 송변전 설비를 교체하지 않아도 되므로 경제적으로 큰 효과를 볼 수 있다. 또한 초전도한류기는 한류리액터 적용이나 모선분리 등의 대책들보다 계통안정화를 저하시킴이 없이 고장전류 저감효과가 크며, 차단용량 증가보다 상대적으로 비용도 적게 드는 장점이 있다.

4. 상전도 차단기 기본정격

현재 한전계통에서 사용되는 차단기는 정격전압에 따라 7.2kV, 25.8kV, 72.5kV, 170kV, 362kV로 구분되며, 정격차단 전류 및 정격전류에 따라 다양한 사양을 가지게 된다. 본 연구에서 초전도한류기 적용과 관련된 차단기의 사양은 154kV급이므로 이에 대해서 고찰하면 다음과 같다.

- 154kV 한전 및 수용가 계통의 차단기 기본정격은 170kV 31.5kA(일부 한전 변전소용 및 수용가설비) 및 50.0kV(대부분 한전 변전소용)이다. 만약, 향후 고장 전류 문제가 심각하고 다른 대안이 부적절한 경우 170kV 63kA 차단기 적용도 고려하고 있는 실정이다.

5. 해석개요

5.1 해석사례 선정

실계통에서 초전도한류기를 적용하기 위한 적용가능개소를 도출하기 위해서 우선 검토 CASE로서 수용가계통과 전력회사계통을 고려하였다. 이러한 분류기준은 가능한 모든 CASE를 포괄하기 위한 것이며, 앞서 기술한 분류기준 하에 실제 적용가능 CASE를 상정하면 표 1과 같다. 본 연구에서는 도출된 각각의 CASE에 대해서 상세 계통검토 및 기본 검토를 통해서 적용가능성을 판단하고, 초전도한류기의 최적 적용대상을 선정한다.

표 1 초전도한류기 적용가능 CASE

Table 1 Application cases of HTS-FCL

해석 CASE	적용대상 및 적용방법	해석방법
CASE-FCL-L1	154kV 자가용 수용가	EMTDC 해석
CASE-FCL-U1	한전 154kV 모선 및 선로	PSS/E 해석

5.2 검토방법

초전도한류기의 적용가능성에 대한 기술성 검토는 기술성 검토는 크게 PSS/E 계통해석, EMTDC 계통해석으로 구분되며, 적용 CASE 별로 적합한 방법을 택해서 수행한다. PSS/E 계통해석은 조류해석과 고장해석을 기본으로 하며, EMTDC 계통해석은 PSS/E 계통해석이 불가능한 경우에 대한 상세 계통검토로서 수행한다. 초전도한류기 적용을 위한 계통검토는 고장해석을 기본으로 한다. 계통계획단계에서 고장전류 문제는 가장 가혹한 고장조건인 3상 고장해석을 하는 것이 원칙이므로, 본 연구에서는 조류계산 데이터를 이용하여 3상 고장해석을 수행한다. 정상상태에서 초전도한류기는 계통전압 및 선로조류 분포에 거의 영향을 주지 않으므로, 초전도한류기를 투입했을 경우의 조류해석은 무의미하다. 따라서 초전도한류기 계통검토에서 조류해석은 수행하지 않는다.

6. CASE별 계통해석

6.1 CASE-FCL-L1 계통검토 (154kV 자가용 수용가)

6.1.1 검토사례 선정 배경

국내 전력계통 내의 일부 154kV 자가용 수용가의 경우, 고장전류의 문제가 발생할 소지가 있다. 이러한 경우, 고장 전류 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 문제발생여부 및 초전도한류기 적용가능성을 검토하기 위한 사례로서 울산 154kV 변전소에서 수전하는 H 사의 CASE를 선정하여 검토하였다. 검토사례의 선정배경은 다음과 같다.

- 2001년 11월 단락용량 초과로 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 적용 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 결정하였다.

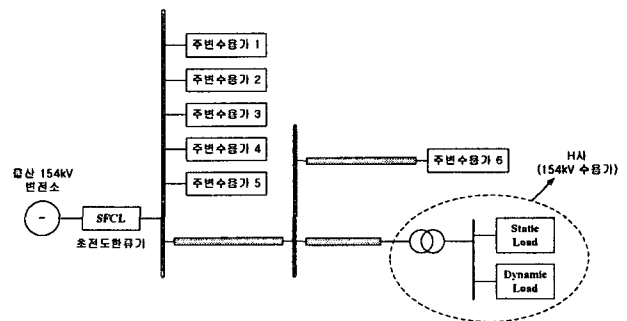


그림 4 CASE-FCL-L1 계통구성도

Fig. 4 CASE-FCL-L1 power system diagram

6.1.2 계통구성

울산 154kV 변전소는 현재 모선분리를 하여 운전 중이며, 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 CASE는 EMTDC 계통검토를 기본으로 하며, 상세계통검토를 위한 계통구성도는 그림 4와 같다.

6.1.3 계통데이터

정확한 계통해석을 위해서는 상기 계통구성과 함께 전원 임피던스, 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

표 2 울산 154kV 변전소 연결 자가용 수용가 선로사양
Table 2 Transmission line of customers for the connection to 154kV Ulsan S/S

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

3) 울산 154kV 변전소 수전 수용가 데이터

일반적으로 주변 수용가의 존재여부가 고장전류 해석결과에 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 표 2와 같다.

EMTDC 계통분석에서 송전선로 임피던스는 도체 특성자료 및 송전선로 첩탑의 기하학적 데이터를 입력하여 구할 수 있지만, 현실적으로 송전선로의 구간별 첩탑형태가 서로 상이하므로 정확한 관련 데이터를 구하는 것도 어렵다. 이러한 단위 길이 당 선로정수의 정확성이 고장전류 해석결과에 미치는 영향은 극히 미미하다. 따라서, 송전선로 임피던스를 현장 자료조사와 한전에서 사용하는 송전 도체의 선종별 표준 임피던스 및 기타 참고자료를 적용하였다. 표 3은 한전의 계통 보호업무 참고자료에 수록되어 있는 도체 선종별 임피던스 중에서 본 사례의 계통해석과 관련 있는 선종별 단위길이 당(km당) 임피던스를 수록한 것이다.

표 3 주변수용가 수전선로 임피던스(154kV, 100MVA 기준)
Table 3 Impedance of the receiving power line for the neighbor customer (154kV, 100MVA Base)

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

4) 초전도한류기 데이터

초전도한류기의 투입효과를 확인하기 위해서 기 개발된 EMTDC 초전도한류기 모델을 적용하였으며[12], 투입위치는 울산 154kV 변전소 후단이다. 국내에서 154kV 초전도한류기가 개발되지 않은 관계로 현재까지 정확한 Quenching 임피던스 값이 알려진 바가 없다. 단, 해외 연구사례에서 제시하는 값을 살펴보면, 초전도한류기 사양과 연구사례별에 매우 다양하다[5][6]. 해외사례는 전압계급이나 계통특성 등이 우리나라와 상이하므로 이러한 결과를 전적으로 이용하는 것은 무리한 점이 있으므로 국내 계통에 적합한 값을 도출할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 해외사례를 일부 참조하여, 임피던스 변화에 따른 한류효과 기본검토를 통해서 충분한 한류효과를 나타낼 수 있을 것으로 판단되는 Quenching 최종임피던스 값으로 154kV 100MVA 기준 0.05 pu (= 11.858 Ω)을 선정하여 적용하였다. 이러한 초전도한류기의 파라미터 선정문제는 계통검토 및 기기개발측면에서 매우 중요한 문제 중에 하나이다. 따라서, 향후 이에 대한

심도깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

6.1.4 검토결과

상기 구성된 계통에서 t = 1 초에 고장이 발생한 것으로 모의하였으며, 고장위치는 울산 154kV 모선과 H사 154/6.6kV 변압기 154kV측으로 가정하였다. 초전도한류기 투입 전후의 검토결과를 표 4와 같으며, 본 결과에서 초전도한류기의 적용효과를 확인 할 수 있다.

표 4 고장해석 결과

Table 4 The result of fault analysis

고장 위치	울산 154kV 모선		H사 변압기 1차측	
	HTS-FCL 적용 전	HTS-FCL 적용 후	HTS-FCL 적용 전	HTS-FCL 적용 후
	고장전류	41.63 kA	10.20 kA	31.44 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 계통 운영상태 및 주변 수용가 등의 영향에 의해서 경우에 따라서는 차단기 용량을 초과할 가능성이 있음을 나타낸다. 이 경우, 고장문제에 대한 대책수립이 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.

6.2 CASE-FCL-U1 (한전 154kV 모선 및 선로)

6.2.1 검토사례 선정

본 사례는 고장전류 문제가 있는 한전 154kV 모선 및 선로에 초전도한류기를 적용하기 위한 것이며, 본 검토에서는 초전도한류기의 최적적용대상을 도출하는 것을 목적으로 한다. 검토대상 데이터는 2010년 국내 한전계통을 선택하였다. 우선, 국내 154kV 계통 전체의 고장전류 문제 모선을 살펴보면 표 5와 같다. 여기서 고장전류 문제발생 기준은 154kV 차단기 정격용량인 50kA를 넘는 모선이다. 표 5의 검토 대상 CASE에서 대도심 부하집중으로 인해서 고장전류 문제가 가장 심각한 지역인 AREA 1 (서울전력관리처)에서의 고장전류를 저감시키기 위해서 초전도한류기를 적용한다. 초전도한류기의 대표적인 적용위치는 선로 및 Bus-Tie이며, 적용시나리오는 매우 다양하다. 본 연구에서는 이러한 모든 적용가능 CASE에 대한 초전도한류기의 적용효과 검토

를 자동적으로 수행하여 최적 적용대상을 도출하기 위한 프로그램을 개발하였다. 개발프로그램의 상세 내용은 다음과 같다.

표 5 고장전류 문제발생 모선(2010년 peak 계통 154kV 모선)
Table 5 Buses with fault current problem(154kV bus in 2010 peak power system)

고장발생 모선		고장전류	AREA
모선번호	모선명		
1610	성동1	53.43 kA	1
1611	왕십리	52.68 kA	1
1670	마장	52.37 kA	1
1710	미금1	50.76 kA	1
1711	미금1S	50.76 kA	1
1745	회경	50.70 kA	1
3660	신시흥21	50.23 kA	3
4510	신성남1	52.10 kA	3
41711	D미금1	50.76 kA	1
44510	D신성남1	52.10 kA	3

6.2.2 초전도한류기 최적적용 위치선정 프로그램 개발

초전도한류기의 최적적용위치를 자동적으로 선정할 수 있는 프로그램을 PSS/E IPLAN을 이용하여 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 기본 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) **STEP 1** : 검토대상계통 데이터(BASE-CASE) 입력
- 2) **STEP 2** : 초전도한류기 적용대상 지정
 - 전압계급(ex, 154kV), AREA 등
- 3) **STEP 3** : 각종 초기값 구성
 - 대상모선 및 선로데이터 정보, 고장전류 판단기준값, 적용위치 등
- 4) **STEP 4** : BASE-CASE에 대한 고장해석 -> 고장전류 문제모선 파악 및 저장
- 5) **STEP 5** : 초전도한류기 적용위치 CASE 선정
 - 초전도한류기 투입방법(투입장소, 개수 등)의 모든 경우의 수를 고려하여 CASE 선정
 - ① 선로에 초전도한류기 투입
 - 고장전류 문제모선 결정
 - 각 문제모선에 연결되어 있는 선로 파악
 - 선로에 초전도한류기를 투입하는 모든 경우의 수를 고려한 CASE 선정
 - ② Bus-Tie 적용
 - 고장전류 문제모선 결정
 - 각 문제모선의 모선분리 후 초전도한류기 Bus-Tie 적용의 모든 경우의 수(선로 결선구

성에 따른 경우의 수)를 고려한 CASE 선정

6) STEP 6 : CASE 별 고장해석 -> 고장전류 계산 및 결과 임시 저장

7) STEP 7 : CASE 별 고장전류 저감확인 및 저장

- 고장전류 저감율 및 평균저감율계산

• 저감율 = $\frac{IFB - IFA}{IFB}$

: 초전도한류기 적용 전후의 각 모선에서의 고장전류 저감율

• 평균저감율 = $\sum_{i=1}^n \frac{(\text{저감율})_i}{n}$

: 각 모선 고장전류 저감율의 평균값

단, IFB = 초전도한류기 적용 전 고장전류

IFA = 초전도한류기 적용 후 고장전류

n = 고장전류문제 발생모선 수

8) STEP 8 : 최적 적용위치 결정

- 초전도한류기 투입수량 및 고장전류 평균저감율에 따른 최적 적용위치 판단

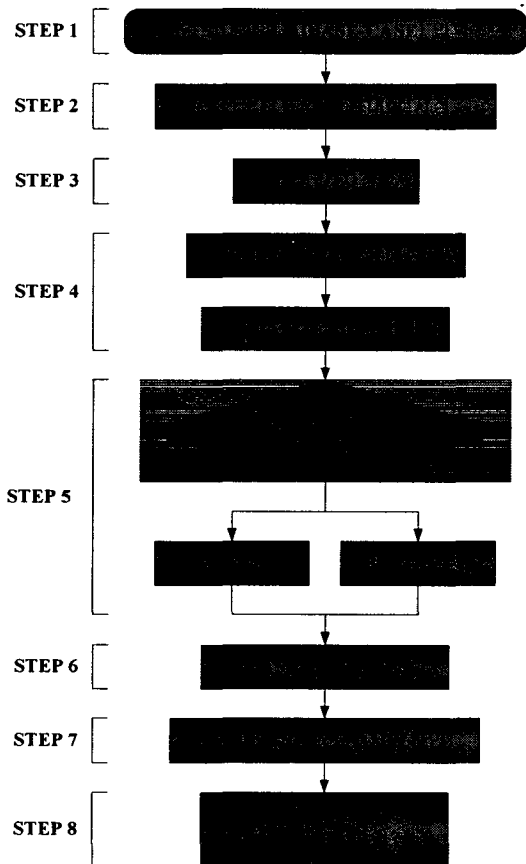


그림 5 초전도한류기 최적적용위치선정 프로그램 알고리즘
Fig. 5 Algorithm for determination of optimum location to apply HTS-FCL to power system

6.2.3 검토결과

1) 초전도한류기 선로적용 CASE

먼저, 초전도한류기를 선로에 투입한 경우에 대해서, 초전도한류기 투입 수량 및 고장전류 평균저감율에 따른 결과를 나타내면 표 6과 같다. 본 결과는 AREA 1 지역의 고장전류 모선이 모두 고장전류가 저감된 경우만을 선택하였으며, 여기서는 초전도한류기의 선로투입 CASE 중 고장전류 저감 효과가 큰 상위 5개 CASE의 결과만 보인다.

표 6 초전도한류기 선로투입에 따른 고장전류 저감효과
Table 6 Fault current results by applying HTS-FCL to transmission line

CASE 번호	초전도한류기 투입수량	초전도한류기 적용선로			고장전류 평균저감율
		From	To	회선	
131072	2	1710	1700	2	0.160896
128	2	1610	1745	2	0.148866
65664	3	1610	1745	2	0.246535
		1710	41710	1	
393216	3	1710	1700	2	0.220959
		1711	1710	1	
262272	3	1610	1745	2	0.204964
		1711	1710	1	

위의 결과에서 초전도한류기를 2대 투입하는 CASE 중 1710 - 1700 (미금1 - 미금3) 선로에 초전도한류기를 투입하는 CASE 131072가 최소개수를 사용함으로써 가장 고장전류 저감효과가 큰 것으로 나타남을 알 수 있다. 상기 CASE에 대한 고장전류 결과를 상세히 보이면 표 7과 같다. 표 7의 결과에서 모든 고장전류 문제모선에서 초전도한류기 2대를 선로에 투입함으로써 고장문제가 해결됨을 확인할 수 있다.

표 7 1710 - 1700 선로에 초전도한류기 투입결과
Table 7 Fault current results by applying HTS-FCL to 1710-1700 Transmission line

고장전류 문제모선	고장전류 [kA]		고장전류 저감율
	HTS-FCL 적용 전	HTS-FCL 적용 후	
성동1	53.43	47.33	0.114122
왕십리	52.68	46.73	0.113422
마장	52.37	46.50	0.112987
미금1	50.76	40.20	0.13676
미금1S	50.76	40.20	0.151023
휘경	50.70	42.43	0.153032
D미금1	50.76	40.20	0.160896

위의 결과에 따라서 초전도한류기의 선로적용 위치를 도시화하면 나타내면 그림 6과 같다.

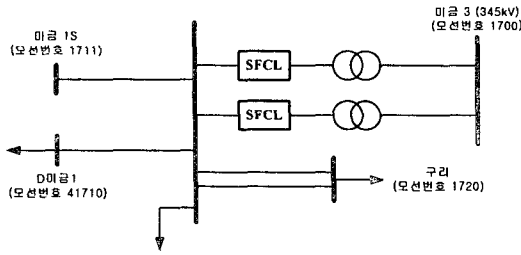


그림 6 초전도한류기 미금 1 - 미금 3 적용위치
Fig. 6 HTS-FCL application to Migeum1-Migeum3

2) 초전도한류기 Bus-Tie 적용 CASE

① 성동1 Bus-Tie 적용 (프로그램 결과)

다음으로 초전도한류기를 Bus-Tie에 적용하는 경우의 적용효과를 검토하였다. 개발 프로그램에서 Bus-Tie에 초전도한류기를 적용하기 위한 모선은 사용자가 지정할 수 있도록 설계되어 있으며, 본 검토에서는 고장전류 문제가 가장 심각한 성동 154 모선(모선번호 : 1610)에 초전도한류기를 적용한 경우에 대한 결과를 보인다. 고장전류 저감효과가 큰 상위 5개 CASE의 결과를 나타내면 표 8과 같다. 여기서 각각의 CASE는 모선분리 후의 선로결선 구성에 따라 구분된 CASE이다.

표 8 초전도한류기 Bus-Tie 적용효과

Table 8 Results of HTS-FCL Bus-Tie application

CASE 번호	고장전류 평균저감율
7748	0.394419
7684	0.394419
7744	0.393197
7680	0.393197
8053	0.359422

상기 결과에서 고장전류 저감효과가 가장 뛰어난 CASE 7748의 선로 결선구성은 표 9와 같다. 번호 1부터 13은 1610에 연결된 선로의 인근 모선을 나타낸다. 정보데이터는 0과 1로 구분되는데, 0은 분리된 모선으로 이동하지 않음을 의미하며, 1은 이동함을 의미한다. 즉, 0으로 표시된 모선들과 1로 표시된 모선들로 구분되어 모선분리됨을 나타낸다.

표 9 모선분리시 선로결선구성 (CASE7748)

Table 9 Transmission line grouping in splitting Bus

	1	2	3	4	5	6	7
모선	1465	1611	1635	1655	1670	1685	1695
정보	0	0	1	0	0	0	1
	8	9	10	11	12	13	
모선	1745	1980	1602	1604	1606	1608	
정보	0	0	1	1	1	0	

참고로, 위의 결과에 따라 초전도한류기를 Bus-Tie에 적용한 계통도를 나타내면 그림 7과 같다.

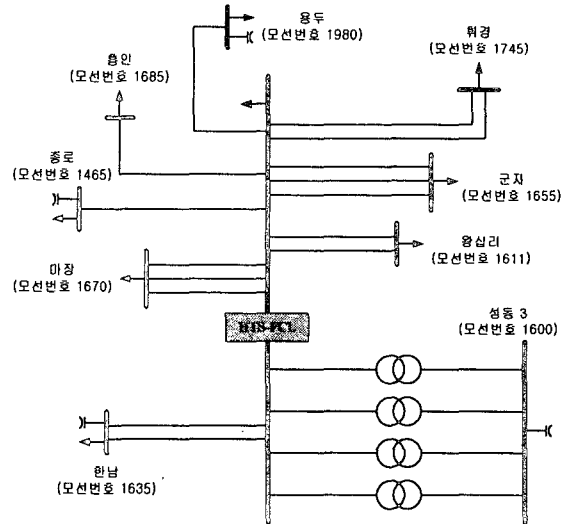


그림 7 프로그램 결과에 따른 초전도한류기 Bus-Tie 적용계통도

Fig. 7 Diagram of HTS-FCL Bus-Tie application system by developed program results

상기 CASE 7748의 세부 고장전류 저감효과 결과는 표 10과 같다. 표 10의 결과에서 알 수 있듯이 초전도한류기를 투입하는 경우, 선로에 투입하는 경우보다 Bus-Tie에 적용하는 경우가 더욱 효과가 큼을 알 수 있다.

표 10 CASE 7748 고장전류 저감효과

Table 10 Fault current results of CASE 7748

고장전류문제모선		고장전류 [kA]		고장전류 저감율
모선번호	모선명	초전도한류기 적용 전	초전도한류기 적용 후	
1610	성동1	53.43	28.71	0.462768
1611	왕십리	52.68	28.48	0.459346
1670	마장	52.37	28.39	0.457893
1710	미금1	50.76	33.91	0.332096
1711	미금1S	50.76	33.91	0.332096
1745	휘경	50.70	31.20	0.384637
41710	D미금1	50.76	33.91	0.332096

② 성동1 Bus-Tie 적용 (실제 계통운영 가능성 반영, 공급신뢰도 고려)

프로그램을 이용하여 도출된 Bus-Tie 적용결과에서 345kV 모선과 연결되는 변압기 bank를 하나의 모선에 모두 연결하는 것은 신뢰도 측면에서 불리한 결과이다. 실제 계통운영에서는 공급신뢰도 등을 고려하여 변압기 bank 수를 균등하게 배분하여 모선분리를 하는 것이 일반적이다. 따라서 상기 결과들 중에서 실제 계통운영이 가능한 경우로서, 변압기 bank 2대씩 균등하게 모선분리한 CASE에 대한 결과를 확인하였다. 모선분리시 선로결선 및 검토결과는 아래와 같다.

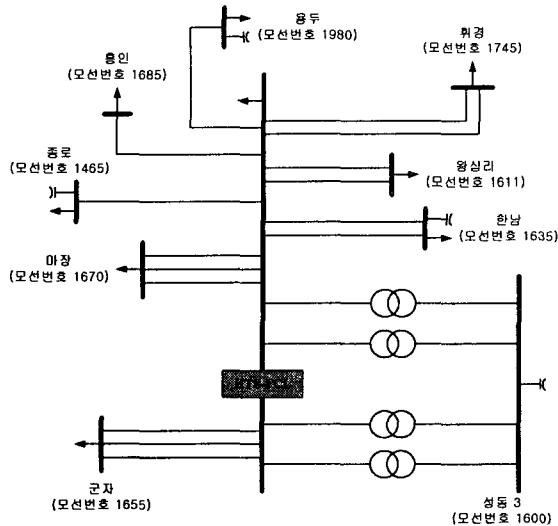


그림 8 공급신뢰도를 고려한 초전도한류기 Bus-Tie 적용 개념도

Fig. 8 Diagram of HTS-FCL Bus-Tie application system considering reliability by developed program results

표 11 고장전류 상세결과

Table 11 Fault current results

고장전류 문제모선		고장전류		고장전류 저감율
모선번호	모선명	초전도한류기 적용 전	초전도한류기 적용 후	
1610	성동1	53.43	28.59	0.464956
1611	왕십리	52.68	28.37	0.461398
1670	마장	52.37	28.28	0.459908
1710	미금1	50.76	45.33	0.107008
1711	미금1S	50.76	45.33	0.107008
1745	휘경	50.70	44.12	0.129737
41710	D미금1	50.76	45.33	0.107008

7. 결 론

본 연구에서 초전도한류기의 국내 전력계통적용 가능성에 대해서 기본적인 기술검토를 수행하였다. 우선 국내 전력계통 현황과 이에 따른 초전도한류기의 도입 필요성 및 계통 적용효과에 대해서 분석하였으며, 실제 계통에의 적용가능성을 판단하기 위해서 실제 계통적용가능 사례를 도출하여, 각 사례에 대해서 PSS/E 및 EMTDC 등을 이용하여 세부계통 해석을 수행하였다. 적용 사례별 세부 계통해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

○ CASE-FCL-L1 : 154 kV 자가용 수용가

- 본 사례는 국내 실 계통에서의 고장전류 문제가 있는 154kV 직수용가에 초전도한류기를 적용하는 경우이다. 우리나라의 대표적인 154kV 자가용 수용가에 대한 고장전류 문제발생여부 및 초전도한류기 적용가능성을 검토하기 위한 사례로서 울산 154kV

변전소에서 수전하는 H 사의 CASE를 선정하여 검토하였다.

- 상세 계통검토 결과 고장전류 문제가 발생할 가능성이 있으며, 이에 대한 대책방안이 필요한 것으로 나타났다. 따라서 고장전류 문제가 있는 154kV 수용가에 초전도한류기를 도입한다면, 경제적인 면의 장점을 가질 뿐만 아니라 고장전류 문제의 근본적인 해결방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

○ CASE-FCL-U1 : 한전 154kV 모선 및 선로

- 본 사례는 한전 154kV 계통에서 고장전류 문제가 있는 모선을 검토하고 가정 적절한 투입방안을 모색하는 것을 목적으로 한다. 검토방법으로는 PSS/E를 이용한 고장해석을 위주로 하였으며 효율적인 해석을 위하여 최적투입위치 선정 프로그램을 개발하였다.
- 계통검토 결과, 국내 154kV 전력계통에서 고장전류 문제해결을 위한 초전도한류기의 적용이 필요할 것으로 판단되며, 기술성 및 경제성의 종합적인 관점에서 초전도한류기를 Bus-Tie에 적용하는 것이 최적대안으로서 도출되었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 산업자원부, “제 1 차 전력수급기본계획(2002년~2015년)”, 2002. 8
- [2] 한국전력공사, 송변전사업본부, 계통계획실, “2002년 장기 송변전 건설계획(2002년~2015년)”, 2002. 12.
- [3] 한국전력거래소, 계통기술처, “2002년 전력계통 설비정수 종합표”, 2002. 6.
- [4] 한국전력공사, “한전표준구매편서”.
- [5] Masaki Tsuda, Yasunari Mitani, Kichiro Tsuji, Kunihiko Kakihana, “Application of resistor based superconducting fault current limiter to enhancement of power system transient stability”, IEEE Transaction on applied superconductivity, Vol. 11. No. 1, pp. 2122-2125, March 2001.
- [6] 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, Vol. 9, No. 2, pp. 1355-1360, June 1999.
- [7] M. Noe, B. R. Oswald, “Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in

- power systems," IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 1347-1350, 1999. 6.
- [8] M. Sjostrom, D. Politano, "Technical and Economical Impacts on a Power System by Introducing an HTS FCL", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 2042-2045, MARCH 2001.
- [9] 이승제, 이찬주, 고태국, "고온 초전도 한류기가 설치된 전력 시스템의 안정도 해석", 전기학회논문지, 48B권 1호, pp. 227-232, 1999. 5.
- [10] 최효상, 현옥배, 고태국, "초전도 한류기를 포함한 계통의 지락사고에 대한 EMTDC 해석", 전기학회논문지, 48B권 4호, pp. 161-166.
- [11] Jong-Yul Kim, Heung-Kwan Choi, Jae-Young Yoon, "A Study on the Application Impacts on Korean Power System by Introducing SFCL", KIEE International Transactions on PE, Vol. 3-A, No. 1, pp. 1-6, 2003.
- [12] 윤재영, 김종율, 이승렬, "퀵칭 특성을 고려한 EMTDC 저항형 초전도한류기 모델링", 전기학회논문지, 53A권 2호, pp. 73-79, 2004. 6.

저 자 소 개



이 승 렬(李昇烈)

1975년 9월 23일생. 1999년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 박사과정수료. 2003년~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력시스템연구그룹(연구원)
 Tel : 055-280-1358, Fax : 055-280-1390
 E-mail : srlee@keri.re.kr



최 흥 관(崔興官)

1968년 2월 6일생. 1994년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 ~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력시스템연구그룹(선임연구원)
 Tel : 055-280-1313, Fax : 055-280-1390
 E-mail : hkchoi@keri.re.kr



김 종 율(金鍾律)

1974년 7월 6일생. 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력시스템연구그룹(연구원)
 Tel : 055-280-1336, Fax : 055-280-1390
 E-mail : jykim@keri.re.kr



윤 재 영(尹在暎)

1962년 7월 30일생. 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 기술사(발송배전). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)/ 1987년~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력시스템연구그룹장(책임연구원)
 Tel : 055-280-1316, Fax : 055-280-1390
 E-mail : jyoon@keri.re.kr