

# 실계통에서의 154kV HTS-FCL Bus-Tie 최적 적용방안에 관한 연구

論 文
54A-5-4

## A Study on the Bus-Tie Application of 154kV HTS-FCL in Korean Power System

李昇烈<sup>†</sup> · 金鍾律<sup>\*</sup> · 尹在映<sup>\*\*</sup>  
(Seung Ryul Lee · Jong-Yul Kim · Jae Young Yoon)

**Abstract** - As the power demand has been increasing, a fault current problem is becoming more serious in real power system. Various ways like bus-split operation, transmission line open operation, are used in Korean power system for solving the problem. In this time, superconducting FCL(Fault Current Limiter) has been developed as a vary attractive alternative since HTS(High Temperature Superconductivity) was discovered. In Korea, a project developing superconducting FCL to apply to 154kV transmission system is proceeding. Therefore, a power system analysis for SFCL application to power system is necessary. This paper presents the determination of quenching resistance and the selection of optimal cites when 154kV HTS-FCL is applied to Korean power system.

**Key Words** : 초전도한류기, 고장전류, 전력계통, Bus-Tie 적용

### 1. 서 론

국내 전력계통은 국가경제의 급속한 발전과 함께 전력수요가 지속적으로 증가하였으며, 특히 대도시의 경우는 부하 집중 현상이 발생하게 되었다. 이렇게 급증하는 부하에 충분한 전력을 공급하기 위하여 송배전설비 확충이 필요하게 되었으며 이로 인해서 고장전류 문제가 심화되고 있는 실정이다. 현재 국내계통에서 고장전류 문제를 해소하기 위한 방안으로서 345kV 변전소간 154kV 연계선로 분리운전, 모선분리운전, 직렬리액터 설치, 대용량 차단기 도입 등 다양한 방안을 고려하고 있다[1][2]. 그러나, 이러한 대책방안들은 계통신뢰도 및 계통안정도를 저하시키거나 비용이 많이 든다는 단점을 갖고 있으며, 또한 이러한 방안들은 근본적인 고장전류 저감책이라고 말하기에는 무리가 있다. 이러한 시점에서 전세계적으로 고장전류를 감소시키기 위한 하나의 대안으로서 고온초전도한류기가 제안되고 있으며, 초전도한류기 개발 및 계통적용관련 연구가 활발히 진행 중에 있다[3]-[10]. 현재 국내에서는 DAPAS 프로젝트를 통해서 실계통 적용 이전의 초보단계로서 6.6kV급 Prototype의 저항형/유도형 초전도한류기가 개발된 상태이며[11][12], 향후 2010년 154kV급 초전도한류기 개발 및 상용화를 위한 연구가 추진 중에 있다[13]-[17]. 이와 함께 초전도한류기의 계통적용을 위한 기본연구가 진행되고 있으며, 기본 연구 결과

초전도한류기 적용방안으로서 345kV 변압기 2차측 154kV 모선적용(Bus-Tie 적용)이 효과적인 것으로 나타났다[18][19]. 본 연구에서는 초전도한류기를 실계통 내의 154kV 모선에 적용하는 경우, 최적 선로배치/초전도한류기 적용위치와 적정 한류저항 값을 결정하는 것을 목표로 한다.

### 2. 고장전류 유입비율

초전도한류기를 실계통 내의 모선에 적용하는 경우, 고장 위치에 따라서 초전도한류기에 의해서 감소시킬 수 있는 고장전류는 특정 선로들을 통해서 유입되는 일부 고장전류만 해당된다. 예를 들어, 그림 1과 같이 P<sub>1</sub>에서 고장이 발생한다면 초전도한류기(SFCL)에 의해서 감소되는 고장전류는 전체 고장전류 중 IF<sub>1</sub>만 해당되며, IF<sub>2</sub> 및 IF<sub>3</sub>는 저감되지 않는다. 이는 실 계통 내의 모선에 초전도한류기를 적용할 때, 동일한 모선에 초전도한류기를 적용하는 경우도 적용위치에 따라서 그 적용효과는 매우 큰 편차가 있음을 의미한다. 따라서, 이러한 고장위치 및 고장전류 유입량 등을 고려한 초전도한류기 Bus-Tie 최적 적용위치에 대한 심도 깊은 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 신뢰성 있는 결과도출을 위하여 고장전류 유입비율을 도입하여 초전도한류기 Bus-Tie 최적적용위치를 결정하였다. 고장전류 유입비율 K에 대한 정의는 식 (1)과 같다.

$$K = \frac{IF_{SFCL}}{IF_{total}} = \frac{IF_1}{IF_1 + IF_2 + IF_3} \quad (1)$$

여기서, K : 고장전류 유입비율, SFCL : 초전도한류기  
IF<sub>SFCL</sub> : 고장 발생시 초전도한류기를 통해서 흐르는 고장전류 크기

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 研究員  
E-mail : srlee@ker.re.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 前任研究員

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 責任研究員  
接受日字 : 2005年 2月 22日  
最終完了 : 2005年 3月 17日

$IF_{total}$  : 전체 고장전류  
 $IF_1, IF_2, IF_3$  : 연결선로를 통하여 유입되는 고장전류

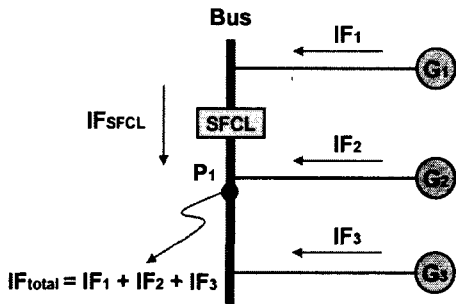


그림 1 초전도한류기 Bus-Tie 적용개념도  
 Fig. 1 Bus-Tie application of SFCL

### 3. 초전도한류기 적용검토 개요

본 연구는 실계통 내에서 154kV 초전도한류기를 모선에 Bus-Tie 방식으로 적용하는 경우, 최적 투입위치와 적정 Quenching 저항을 선정하기 위한 연구로서, 다음과 같은 기본가정 하에 실계통 검토를 수행한다.

- 검토대상년도 : 2010년 국내 미래 송전계통
  - 현재 국내 초전도한류기는 2010년 이후 상용화를 목표로 하여 개발 중에 있다. 따라서 본 연구에서는 초전도한류기가 도입될 것으로 예상되는 2010년 국내계통에 대하여 검토한다.
- 초전도한류기 적용위치 : Bus-Tie 적용
  - 초전도한류기의 154kV 계통 적용위치 및 적용방안으로서 1) 선로적용, 2) Bus-Tie 적용의 두 가지 방안을 생각할 수 있다. 상기 두 가지 방안에 대한 기본검토 결과, 기술적/경제적 관점에서 154kV급 초전도한류기 적용방안으로서 Bus-Tie 적용이 적합한 것으로 나타났다[18][19]. 따라서 본 연구에서는 기본적으로 Bus-Tie 적용에 대하여 검토한다.
- 초전도한류기 적용모선 및 최적 적용방안
  - 최소의 초전도한류기를 적용함으로써 고장전류 문제를 가능한 모두 해결할 수 있는 대상모선을 선정하여 기본검토를 하며, 각 대상모선에 대해서 초전도한류기 최적적용 방안을 위한 기본 연구를 수행한다.
- 고장전류 유입비율
  - 154kV계통은 송전계통의 기본 특성상 고장위치에서 다수 전원의 형태로 고장전류가 유입된다고 가정하고 Quenching 저항을 상정한다. 다수 전원의 고장전류 유입비율을  $K(0.0-1.0)$ 로서 표현하고,  $K$  비율로 유입되는 전원단에 Quenching 저항이 삽입되었다고 가정한다.

실 계통 내의 상세 검토절차는 다음과 같다. 먼저 PSS/E를 이용하여 2010년 실계통 내의 고장전류 문제모선을 도출한 후, 실계통 등가프로그램인 E-TRAN을 이용하여 대상모

선에 대해서 EMTDC 등가계통을 구성한다. 다음으로, 등가계통에서 고장전류 유입비율을 고려하여 초전도한류기 적용 CASE 분류를 하고 기 개발된 EMTDC 초전도한류기 모델([19]-[21])을 개량한 수정모델을 이용하여 계통검토를 수행한다. 최종적으로 대상모선에서의 초전도한류기 최적 적용 위치 및 적정 Quenching 저항을 결정한다.

- (STEP 1) 실계통 154kV 변전소 선정
  - : 고장전류 문제모선 (PSS/E 고장계산)
- (STEP 2) E-TRAN 등가변환
  - : 등가계통의 정확성을 위해서 대상 변전소의 3 Level 연결모선까지 등가화
- (STEP 3) 초전도한류기 Bus-Tie 적용 전후의 고장전류 확인 (EMTDC 계통해석)
  - 고장전류 유입비율  $K$ 를 고려한 CASE 분류
  - CASE별 EMTDC 고장해석
- (STEP 4) 초전도한류기 최종적용위치 및 적정 Quenching 저항 결정

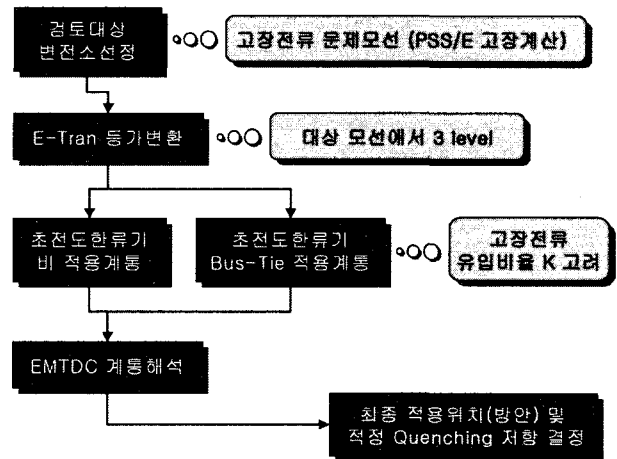


그림 2 초전도한류기 적용검토절차  
 Fig. 2 Flowchart of SFCL application

### 4. 사례 연구

#### 4.1 실계통 154kV 모선 선정

##### 4.1.1 대상모선 선정기준

본 연구는 국내 154kV 계통의 고장전류 저감을 위한 대책으로서 154kV 초전도한류기의 실계통 적용에 대한 기본검토이므로, 먼저 국내 154kV 모선 중에서 고장전류 문제모선 확인 및 초전도한류기 적용대상 모선의 선정이 필요하다. 실계통에서의 적용대상 모선 선정기준은 다음과 같다.

- (기준 1) 고장전류 문제가 있는 모선 : 차단기 용량인 50kA 이상 154kV 모선
- (기준 2) 가능한 인근모선도 고장전류 문제가 있는 모선
- (기준 3) 345kV 모선의 하위 154kV 모선

### 4.1.2 대상모선 선정

고장전류 문제가 있는 모선을 확인하기 위해서 PSS/E를 이용하여, 한전 154kV 모든 모선에 대해서 3상 모선고장해석을 실시하였다. 검토대상 데이터로는 초전도한류기가 적용가능할 것으로 보이는 미래계통인 2010년 국내 한전계통을 선택하였다. 고장전류 문제가 있는 모선의 기준으로서 한전 154kV 차단기 정격용량인 50kA를 적용하여, 고장전류가 50kA를 넘는 모선을 고장전류 문제모선으로 가정하였다. 그 결과를 요약하면 표 1과 같다.

표 1 고장전류 문제모선 (2010년 peak 계통 154kV 모선)  
Table 1 Fault current problem buses (154kV buses of 2010 peak system)

고장발생 모선		고장전류	AREA
모선번호	모선명		
1610	성동1	53.4 kA	1
1611	왕십리	52.7 kA	1
1670	마장	52.4 kA	1
1710	미금1	50.8 kA	1
1711	미금1S	50.8 kA	1
1745	휘경	50.7 kA	1
3660	신시흥21	50.2 kA	3
4510	신성남1	52.1 kA	3
41711	D미금1	50.8 kA	1
44510	D신성남1	52.1 kA	3

표 1에서 미금1과 미금1S는 모선분리 후 미금1-미금1S 사이의 Bus-Tie 차단기를 다시 투입된 초기상태로서, 본 사례는 미금1과 미금1S는 하나의 모선과 마찬가지로인 경우이다. 현재 국내 계통의 대부분의 154kV 모선은 이중모선으로 구성되어 있으며, 특정 계통조건에서 고장전류 문제가 심각한 경우, 임시방편적인 방법으로서 Bus-Tie 차단기를 개방

하여 모선분리 상태에서 계통운영을 하는 것이 일반적이다. 따라서, 본 사례는 미금1 모선에서 고장전류 문제가 있으므로 실제 계통운영에서는 Bus-Tie 차단기를 개방하여 모선 분리 상태에서 계통운영을 하게 될 가능성이 높다. 이러한 경우, 초전도한류기를 적용하게 되면 모선분리를 하지 않고도 계통운영이 가능할 것으로 예상된다.

결국, 상기 도출된 고장전류 문제 모선 중, 위에서 가정된 변전소 선정기준 1, 2, 3을 고려하여 초전도한류기 적용대상 변전소를 선정하면 (성동1)과 (미금1/미금1S)가 가장 적합할 것으로 판단된다. 참고로, (성동1)과 (미금1/미금1S) 인근 계통도를 나타내면 그림 3과 같다.

### 4.2 E-Tran 등가변환

EMTDC를 이용하여 초전도한류기 적용효과를 검토하기 위해서는 실제계통을 축약한 등가계통의 구성이 필요하다. 이에 따라, 상기 도출된 대상 변전소에 대해서 E-Tran을 이용하여 계통등가화를 하였으며, 등가화 개요는 다음과 같다.

- 등가대상 변전소 : (미금1/미금1S), (성동1)
- 등가화 범위 : 대상 모선에서 3 level(3개 직렬연결선로) - EMTDC 고장계산결과의 정확성을 조금 더 높이기 위해서 대상변전소에서 3 level까지 등가화
- 송전선로 : PI모델 적용

### 4.3 적용모선별 검토 CASE 분류

#### 4.3.1 (미금1/미금1S) E-Tran 등가계통 Bus-Tie 적용

초전도한류기의 적용가능 위치를 선정하기 위해서 먼저 (미금1/미금1S)에서 고장발생시 연결선로로부터 유입되는 고장전류의 크기 및 기여분을 나타내면 표 2와 같다. 표 2의 결과를 기본으로 하여, 전체 고장전류에 대한 각 선로의 고장전류 유입량을 비율로서 표현한 K에 따라서 가능 CASE를 분류하였다. 우선, 모든 CASE는 모선을 2개로 구

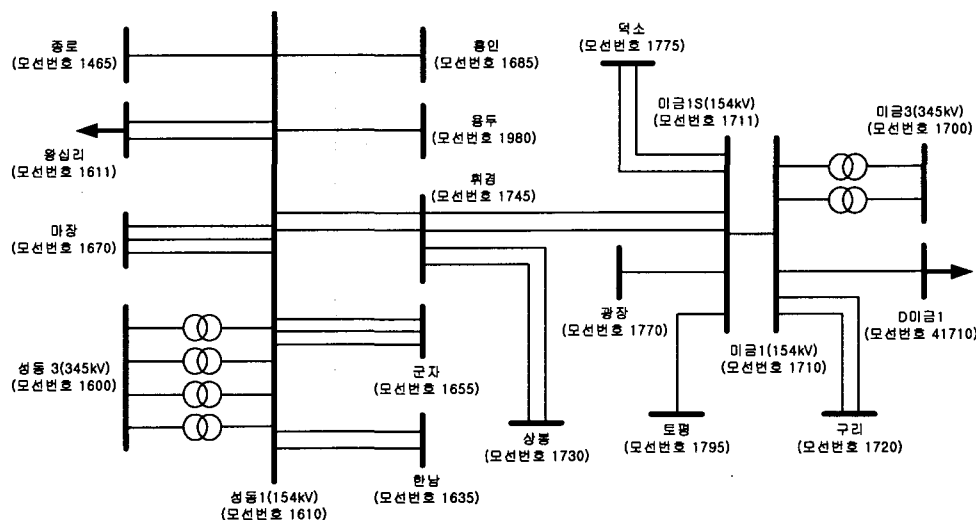


그림 3 (성동1) 및 (미금1/미금1S) 인근 계통도  
Fig. 3 Diagram of (Sungdong1) and (Migeum1/Migeum1S) buses

분하여 그 사이(미급1-미급1S Bus-Tie)에 초전도한류기를 적용하는 것으로 가정하였으며, 그 후 분리된 각 모선에 고장전류 유입량에 따라서 선로를 연결하여 고장전류 유입비율 K를 결정하여 CASE를 선정하였다. 연결선로는 루트선로연결을 기본으로 하였다.

표 3의 CASE는 고장전류 유입비율 K 크기에 따른 대표적인 사례를 나타낸 것이다. 본 검토에서는 도출된 CASE에 대해서 초전도한류기 적용 전후의 고장계산을 통하여 적정 적용위치 및 Quenching 저항 값을 결정한다.

표 2 (미급1/미급1S) 에서의 고장전류 결과

Table 2 Fault current results in a bus (Migeum1/Migeum1S)

전체 고장전류	고장전류 유입선로	고장전류	고장전류 기여분
51.7 kA	구리 → 미급1 (2회선)	4.4 kA	8.5 %
	D미급1 → 미급1	0 kA	0 %
	미급3 → 미급1 (2회선-TR)	20.8 kA	40.2 %
	휘경 → 미급1S (2회선)	18.5 kA	35.8 %
	광장 → 미급1S (1회선)	1.8 kA	3.5 %
	토펡 → 미급1S (1회선)	2.5 kA	4.8 %
	덕소 → 미급1S (2회선)	3.7 kA	7.2 %

표 3 K 크기에 따른 CASE 분류 (미급1/미급1S)

Table 3 Test cases (Migeum1/Migeum1S)

CASE	K	고장 모선	미급1 및 미급1S의 연결선로
1	0.085	미급1S	미급1 (구리, D미급1)
16	0.915	미급1	미급1S (미급3, 휘경, 광장, 토펡, 덕소)
2	0.168	미급1S	미급1 (구리, 광장, 토펡, D미급1)
15	0.832	미급1	미급1S (미급3, 휘경, 덕소)
3	0.240	미급1S	미급1 (구리, 광장, 토펡, 덕소)
14	0.760	미급1	미급1S (D미급1, 미급3, 휘경)
4	0.358	미급1S	미급1 (휘경, D미급1)
13	0.642	미급1	미급1S (구리, 미급3, 광장, 토펡, 덕소)
5	0.402	미급1S	미급1 (미급3, D미급1)
12	0.598	미급1	미급1S (구리, 휘경, 광장, 토펡, 덕소)
6	0.474	미급1S	미급1 (미급3, 덕소, D미급1)
11	0.526	미급1	미급1S (구리, 휘경, 광장, 토펡)
7	0.485	미급1S	미급1 (구리, 미급3, D미급1)
10	0.515	미급1	미급1S (휘경, 광장, 토펡, 덕소)
8	0.491	미급1S	미급1 (구리, 휘경, 토펡)
9	0.509	미급1	미급1S (D미급1, 미급3, 광장, 덕소)

4.3.2 (성동1) E-Tran 등가계통 Bus-Tie 적용

(미급1/미급1S)와 마찬가지로 (성동1) 등가계통에서도 초전도한류기의 적용가능 위치를 선정하기 위해서 먼저 (성동1)에서 고장발생시 연결선로로부터 유입되는 고장전류의 크기 및 기여분을 확인하였다. 그 결과를 요약하면 표 4와 같다. 표 4의 결과를 바탕으로 (미급1/미급1S)의 CASE 분류 기본전제사항과 동일한 가정 하에 (성동1)의 적용가능 CASE를 분류하면 표 5와 같다.

표 4 (성동1)에서의 고장전류 결과

Table 4 Fault current results in a bus (Sungdong1)

전체 고장전류	고장전류 유입선로	고장전류	고장전류 기여분
53.4 kA	성동3 → 성동1 (4회선-TR)	35.2 kA	65.9 %
	종로 → 성동1 (1회선)	0 kA	0 %
	왕십리 → 성동1 (1회선)	0 kA	0 %
	마장 → 성동1 (3회선)	0 kA	0 %
	홍인 → 성동1 (1회선)	0 kA	0 %
	용두 → 성동1 (1회선)	0 kA	0 %
	휘경 → 성동1 (2회선)	15.3 kA	28.7 %
	군자 → 성동1 (3회선)	2.9 kA	5.4 %
	한남 → 성동1 (2회선)	0 kA	0 %

표 5 K 크기에 따른 CASE 분류 (성동1)

Table 5 Test cases (Sungdong1)

CASE	K	고장 모선	성동1 및 성동1S의 연결선로
1	0.054	성동1	성동1 (성동3, 홍인, 휘경, 종로, 마장, 용두)
6	0.946	성동1S	성동1S (군자, 왕십리, 한남)
2	0.287	성동1	성동1 (성동3, 홍인, 군자, 종로, 마장, 용두)
5	0.713	성동1S	성동1S (휘경, 왕십리, 한남)
3	0.341	성동1	성동1 (성동3, 홍인, 종로, 마장, 용두)
4	0.659	성동1S	성동1S (휘경, 군자, 왕십리, 한남)
TRD-1	0.489	성동1	성동1 (성동3 TR 3 bank, 홍인, 종로, 마장, 용두)
TRD-2	0.511	성동1S	성동1S (휘경, 군자, 왕십리, 한남, 성동3 TR 1bank)

정성적 검토에 의하면 고장전류 유입비율이 0.5에 가까울 수록 고장전류 저감효과가 클 것으로 예상된다. 본 사례의 경우, (미급1/미급1S) CASE 분류와 동일한 가정 하에 2회선 이상의 선로들을 하나의 루트회선으로 고려한다면, 고장전류 유입비율 0.5와는 상당히 차이가 있는 CASE만으로 분류된다. 따라서, 본 사례에서는 고장전류 배분비율이 0.5에 가까운 CASE에 대한 상세검토를 위해서 변압기 4 Bank 중 1 Bank를 성동1S 모선에 연결한 CASE TRD-1/2를 선정하여 그 효과를 확인하였다.

4.4 검토 CASE별 해석결과

4.3절에서 도출된 검토 CASE에서 Quenching 저항을 변화시키며 고장전류 저감효과를 확인하였다.

4.4.1 (미급1/미급1S) CASE별 해석결과

1) 자기모선(미급1/미급1S) 고장전류 결과

상기 도출된 CASE에 대해서 초전도한류기 적용 전후의 고장해석을 실시하였으며 그 결과 중 대표적인 예를 나타내면 표 6~9와 같다. 결과를 살펴보면 (CASE 6, 11), (CASE

8, 9)가 초전도한류기에 의한 효과가 큰 것으로 나타났다. 즉, K가 0.5에 가까운 경우, 그 효과가 가장 크다고 할 수 있다. 단, 인근의 여러 345kV 모선으로부터 전력을 수전하는 경우는, 연결선로가 어떠한 345kV 모선으로부터 나온 선로인가에 따라서 배분비율에 따른 효과는 약간의 차이가 있을 수 있다. 따라서, 154kV 초전도한류기 적용시 1) K=0.5 지점, 2) 인근 계통구성을 모두 고려하여 적용위치를 선정할 필요가 있다. 아래 결과에서 Quenching 저항 R<sub>Q</sub>에 의한 효과는 약 5 [Ω] 이상이면 큰 차이가 없는 것으로 보이므로, 본 검토결과만으로 판단한다면 Quenching 저항은 5 [Ω] 이상이 적합할 것으로 사료된다.

표 6 (CASE 2, 15) 고장전류 결과

Table 6 Fault current results of (CASE 2, 15)

IF [kA]	K / CASE	R <sub>Q</sub> [Ω]	고장전류 [kA]	감소율 [%]
51.7 kA	0.168 (CASE 2)	0	51.7 kA	-
		5	50.6 kA	2.1 %
		10	50.6 kA	2.1 %
		15	50.6 kA	2.1 %
	0.832 (CASE 15)	0	51.7 kA	-
		5	35.2 kA	31.9 %
		10	34.7 kA	32.9 %
		15	34.6 kA	33.1 %

표 7 (CASE 4, 13) 고장전류 결과

Table 7 Fault current results of (CASE 4, 13)

IF [kA]	K / CASE	R <sub>Q</sub> [Ω]	고장전류 [kA]	감소율 [%]
51.7 kA	0.358 (CASE 4)	0	51.7 kA	-
		5	47.9 kA	7.4 %
		10	47.8 kA	7.5 %
		15	47.8 kA	7.5 %
	0.642 (CASE 13)	0	51.7 kA	-
		5	41.2 kA	20.3 %
		10	40.9 kA	20.9 %
		15	40.8 kA	21.1 %

표 8 (CASE 6, 11) 고장전류 결과

Table 8 Fault current results of (CASE 6, 11)

IF [kA]	K / CASE	R <sub>Q</sub> [Ω]	고장전류 [kA]	감소율 [%]
51.7 kA	0.474 (CASE 6)	0	51.7 kA	-
		5	38.7 kA	25.1 %
		10	36.3 kA	29.8 %
		15	35.7 kA	30.9 %
	0.526 (CASE 11)	0	51.7 kA	-
		5	36.2 kA	30.0 %
		10	33.7 kA	34.8 %
		15	33.1 kA	36.0 %

표 9 (CASE 8, 9) 고장전류 결과

Table 9 Fault current results of (CASE 8, 9)

IF [kA]	K / CASE	R <sub>Q</sub> [Ω]	고장전류 [kA]	감소율 [%]
51.7 kA	0.491 (CASE 8)	0	51.7 kA	-
		5	39.4 kA	23.8 %
		10	38.0 kA	26.5 %
		15	37.7 kA	27.1 %
	0.509 (CASE 9)	0	51.7 kA	-
		5	39.1 kA	24.3 %
		10	37.6 kA	27.3 %
		15	37.2 kA	28.0 %

2) (미급1/미급1S) 인근 모선의 고장전류 결과

상기 도출된 결과에서 (CASE 6, 11)과 (CASE 8, 9)가 초전도한류기의 적용효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 초전도한류기 적용대상 변전소뿐만 아니라 인근 변전소의 고장전류 문제까지 해결할 수 있는 경우가 더욱 좋은 방안이라 할 수 있으므로, 이를 검토하기 위해서, (CASE 6, 11)과 (CASE 8, 9)에 대해서 인근 모선의 고장전류 결과를 확인하였다.

표 10 인근모선 고장전류 결과 (CASE 6, 11)

Table 10 Fault current results of nearby buses(CASE 6, 11)

고장발생 모선		고장전류 결과			
모선 번호	모선명	초전도한류기 투입 전	초전도한류기 투입 후 ( R <sub>Q</sub> 크기에 따른 고장전류 )		
		R <sub>Q</sub> = 0 [Ω]	R <sub>Q</sub> = 5	R <sub>Q</sub> = 10	R <sub>Q</sub> = 15
1610	성동1	54.7 kA	46.7 kA	44.9 kA	44.4 kA
1710	미급1	51.7 kA	36.2 kA	33.7 kA	33.1 kA
1711	미급1S	51.7 kA	38.7 kA	36.3 kA	35.7 kA
1745	휘경	51.7 kA	41.3 kA	39.1 kA	38.6 kA
41711	D미급1	51.7 kA	38.7 kA	36.3 kA	35.7 kA

표 11 인근모선 고장전류 결과 (CASE 8, 9)

Table 11 Fault current results of nearby buses (CASE 8, 9)

고장발생 모선		고장전류 결과			
모선 번호	모선명	초전도한류기 투입 전	초전도한류기 투입 후 ( R <sub>Q</sub> 크기에 따른 고장전류 )		
		R <sub>Q</sub> = 0 [Ω]	R <sub>Q</sub> = 5	R <sub>Q</sub> = 10	R <sub>Q</sub> = 15
1610	성동1	54.7 kA	48.7 kA	47.7 kA	47.5 kA
1710	미급1	51.7 kA	39.1 kA	37.6 kA	37.2 kA
1711	미급1S	51.7 kA	39.4 kA	38.0 kA	37.7 kA
1745	휘경	51.7 kA	42.4 kA	41.1 kA	40.8 kA
41711	D미급1	51.7 kA	39.4 kA	38.0 kA	37.7 kA

초전도한류기 적용대상 변전소뿐만 아니라 인근 모선의 고장전류 저감효과까지 고려한 검토결과, CASE (8/9)보다 CASE (6/11)이 조금 더 효과적인 것으로 나타났다.

Quenching 저항크기에 따른 고장전류 크기를 확인해보면 10 [ $\Omega$ ] 이상의 경우는 고장전류 크기감소정도가 상대적으로 매우 작음을 알 수 있다. 따라서, 충분한 고장전류 저감효과를 고려한다면 5 [ $\Omega$ ]보다는 10 [ $\Omega$ ]이 적합하며, 10 [ $\Omega$ ] 이상의 경우는 고장전류 저감정도가 작으므로 미약하므로 Quenching 저항이 10 [ $\Omega$ ]을 초과할 필요는 없을 것으로 판단된다. 따라서 본 사례의 경우, 적정 Quenching 저항 값은 10 [ $\Omega$ ]이 적절할 것으로 사료된다.

4.4.2 (성동1) CASE별 해석결과

1) 자기모선(성동1/성동1S) 고장전류 결과

상기 도출된 각 CASE별 고장전류 결과 중 일부를 요약하면 표 12 ~ 14와 같으며, (CASE TRD-1/2)가 가장 효과적인 방안으로 나타났다. 또한, 본 결과로만 판단할 때, 적정 Quenching 저항의 크기로는 5 [ $\Omega$ ] 이상이 될 것으로 예상된다.

표 12 (CASE 1, 6) 고장전류 결과

Table 12 Fault current results of (CASE 1, 6)

IF [kA]	K / CASE	R <sub>Q</sub> [ $\Omega$ ]	고장전류 [kA]	감소율 [%]
53.4 kA	0.054 (CASE 1)	0	53.4 kA	-
		5	53.0 kA	0.7 %
		10	53.0 kA	0.7 %
		15	53.0 kA	0.7 %
	0.946 (CASE 6)	0	53.4 kA	-
		5	22.5 kA	57.9 %
		10	19.5 kA	63.5 %
		15	18.8 kA	64.8 %

표 13 (CASE 3, 4) 고장전류 결과

Table 13 Fault current results of (CASE 3, 4)

IF [kA]	K / CASE	R <sub>Q</sub> [ $\Omega$ ]	고장전류 [kA]	감소율 [%]
53.4 kA	0.341 (CASE 3)	0	53.4 kA	-
		5	44.7 kA	16.3 %
		10	43.0 kA	19.5 %
		15	42.6 kA	20.2 %
	0.659 (CASE 4)	0	53.4 kA	-
		5	32.0 kA	40.1 %
		10	29.0 kA	45.7 %
		15	28.3 kA	47.0 %

표 14 (CASE TRD-1, 2) 고장전류 결과

Table 14 Fault current results of (CASE TRD-1, 2)

IF [kA]	K / CASE	R <sub>Q</sub> [ $\Omega$ ]	고장전류 [kA]	감소율 [%]
53.4 kA	0.489 (CASE TRD-1)	0	53.4 kA	-
		5	40.0 kA	25.1 %
		10	38.1 kA	28.7 %
		15	38.0 kA	28.8 %
	0.511 (CASE TRD-2)	0	53.4 kA	-
		5	38.5 kA	27.9 %
		10	36.6 kA	31.5 %
		15	36.5 kA	31.6 %

2) (성동1) 인근 모선의 고장전류 결과

상기 도출된 (CASE 3, 4)와 (CASE TRD-1, 2)에서 인근 모선의 고장전류 결과를 확인하면 표 15 및 16과 같으며, 상세 CASE 검토결과에서 변압기 4 Bank의 분리구성으로 고장전류 배분비율을 0.5에 가깝게 구성한 경우인 (CASE TRD-1, 2)가 기타 CASE에 비해서 고장전류 저감효과가 더욱 큰 것을 알 수 있다. 또한, Quenching 저항은 상기 (미금1/미금1S)의 사례와 같이 약 10 [ $\Omega$ ]이 적합할 것으로 판단된다.

표 15 인근모선 고장전류 결과 (CASE 3, 4)

Table 15 Fault current results of nearby buses(CASE 3, 4)

고장발생 모선		고장전류 결과			
모선 번호	모선명	초전도한류기 투입 전	초전도한류기 투입 후 ( R <sub>Q</sub> 크기에 따른 고장전류 )		
		R <sub>Q</sub> = 0 [ $\Omega$ ]	R <sub>Q</sub> = 5	R <sub>Q</sub> = 10	R <sub>Q</sub> = 15
1610	성동1	53.4 kA	44.7 kA	43.0 kA	42.6 kA
1619	성동1S	53.4 kA	32.0 kA	29.0 kA	28.3 kA
1611	왕십리	52.7 kA	31.7 kA	28.7 kA	28.1 kA
1670	마장	52.4 kA	43.9 kA	42.3 kA	41.9 kA
1710	미금1	50.8 kA	36.7 kA	34.1 kA	33.5 kA
1711	미금1S	50.8 kA	36.7 kA	34.1 kA	33.5 kA
1745	휘경	50.7 kA	34.2 kA	31.4 kA	30.8 kA
41711	D미금1	50.8 kA	36.7 kA	34.1 kA	33.5 kA

표 16 인근모선 고장전류 결과 (CASE TRD-1, 2)

Table 16 Fault current results of nearby buses (CASE TRD-1, 2)

고장발생 모선		고장전류 결과			
모선 번호	모선명	초전도한류기 투입 전	초전도한류기 투입 후 ( R <sub>Q</sub> 크기에 따른 고장전류 )		
		R <sub>Q</sub> = 0 [ $\Omega$ ]	R <sub>Q</sub> = 5	R <sub>Q</sub> = 10	R <sub>Q</sub> = 15
1610	성동1	53.4 kA	38.8 kA	37.1 kA	36.9 kA
1619	성동1S	53.4 kA	39.6 kA	37.7 kA	37.5 kA
1611	왕십리	52.7 kA	39.2 kA	37.3 kA	37.1 kA
1670	마장	52.4 kA	38.3 kA	36.5 kA	36.5 kA
1710	미금1	50.8 kA	42.2 kA	40.8 kA	40.8 kA
1711	미금1S	50.8 kA	42.2 kA	40.8 kA	40.8 kA
1745	휘경	50.7 kA	40.4 kA	38.8 kA	38.8 kA
41711	D미금1	50.8 kA	42.2 kA	40.8 kA	40.8 kA

4.5 초전도한류기 최종 투입위치 및 적정 Quenching 저항 결정

(미금1/미금1S)와 (성동1)의 두 모선 모두 초전도한류기 적용이 가능할 것으로 판단된다. 즉, 둘 중 하나의 모선에 초전도한류기를 Bus-Tie에 적용하고 적절히 선로를 배치한다면 인근의 고장전류 문제를 모두 해소할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 적용효과를 비교 검토한 결과, (성동1)에 적용하는 경우가 조금 더 효과가 클 것으로 보이며, 적정

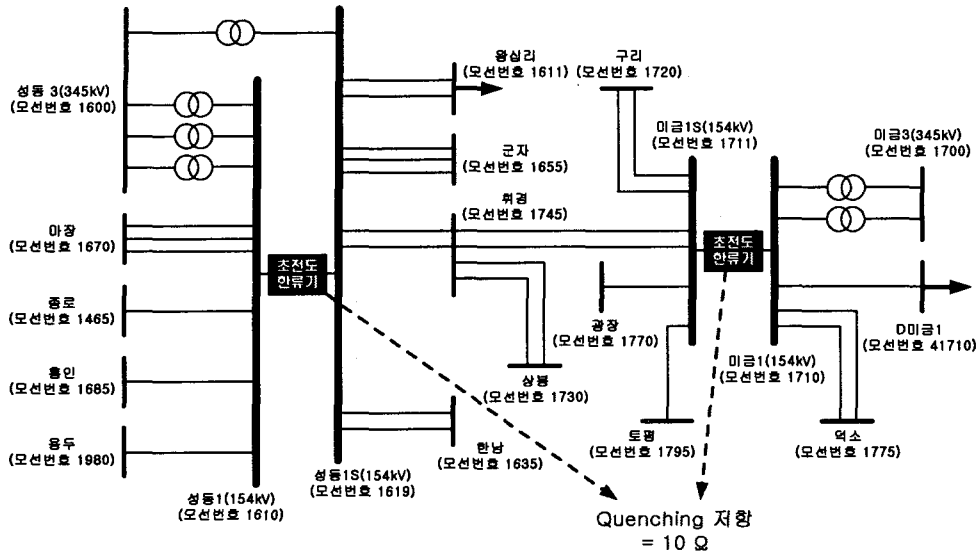


그림 4 154kV 실계통에서의 초전도한류기 적용개념도  
Fig. 4 SFCL application in 154kV practical power system

Quenching 저항은 상기 (미금1/미금1S)와 마찬가지로 약 10 Ω 내외로 나타났다. 각 모선에서의 초전도한류기 적용 개념도 및 선로구성을 나타내면 그림 4와 같다.

5. 결론

본 연구는 실계통에서 초전도한류기를 적용하기 위한 사전연구로서, 154kV 초전도한류기 모선(Bus-Tie)적용시 최적 적용위치와 적정 Quenching 저항을 선정하는 것을 그 목표로 하였다. 초전도한류기 Bus-Tie 적용시 연결선로 최적구성을 위해서 고장전류 유입비율 K의 개념을 도입하여 Quenching 저항크기에 따른 실계통 검토를 하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 국내 154kV 계통의 고장전류 저감효과는 345kV변전소의 154kV 모선에 적용하는 경우가 가장 효과가 높은 것으로 나타났다. 즉, 345kV변전소의 154kV 모선에 초전도한류기 1대를 적용함으로써 인근 모선의 모든 고장전류 문제를 해소할 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 잠정적 적용가능 개소로서 (성동1)과 (미금1) 모선이 도출되었으며, (성동1)에 적용한 경우가 적용효과가 다소 크게 나타났다. 본 연구결과에서 초전도한류기를 적용하기 위한 특정개소는 미래계통 구성과 계통운영에 따라서 가변성이 있다.
- 초전도한류기를 모선에 Bus-Tie 방식으로 적용할 때, 투입위치로서 모선의 고장전류 유입비율 K = 0.5 인근지점이 가장 효과가 클 것으로 판단된다. 이 때, 인근 345kV 변전소 및 전원단 직간접적인 연결선로, 즉, 계통의 구성상태를 고려하여 최적위치를 선정해야 한다.
- 적정 Quenching 저항은 적용방법 및 적용위치에 따라서 고장전류 저감효과의 편차가 있으나, 본 논문의 사례연구에 따르면 실계통 내에서 충분한 고장전류 저감을 위

해서는 10Ω 정도가 적합할 것으로 판단된다.

- 초전도한류기를 실계통에서 적용하는 경우, 고장발생시 나타나는 Quenching 저항에 의해서 기존 계통보호시스템에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 즉, 송전계통의 거리계전기의 동작은 고장임피던스를 측정하여 고장여부를 판단하는데, 초전도한류기가 적용되는 경우 Quenching 저항에 의해서 고장임피던스 크기에 영향을 주게 된다. 이에 따라 거리계전기가 부동작 또는 오동작을 하여 계통고장에 대한 적절한 대처를 할 수 없게 되어 고장이 계통전체로 파급되어 대정전까지 초래할 가능성이 있다. 따라서, 초전도한류기의 실계통 적용을 위해서는 초전도한류기 실계통 운영관점에서 계통보호에 미치는 영향에 대한 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고 문헌

[1] 산업자원부, “제2차 전력수급기본계획(2004년~2017년)”, 2004. 12  
 [2] 한국전력공사, 송변전사업본부, 계통계획실, “2002년 장기 송변전 건설계획(2002년 ~ 2015년)”, 2002. 12  
 [3] 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, June 1999

[4] M. Noe, B. R. Oswald, "Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems," IEEE Transactions on applied superconductivity, 1999.6

[5] M. Sjoström, D. Politano, "Technical and Economical Impacts on a Power System by Introducing an HTS FCL", IEEE Trans on Applied Superconductivity Conference, Sept. 2000

[6] 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

[7] K. Hongesombut, Y. Mitani, K. Tsuji, "Optimal Location Assignment and Design of Superconducting Fault Current Limiters Applied to Loop Power Systems", IEEE Transaction on applied superconductivity, Vol. 13. No. 2, pp. 1828-1831, June 2003

[8] Michael Steurer, Mathias Noe, Frank Breure, "Fault Current Limiters - R&D Status of Two Selected Projects and Emerging Utility Integration Issues", IEEE 2004 General meeting, June 2004

[9] E. Leung et al, "Design & development of a 15 kV, 20 kA HTS fault current limiter", IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 10, pp.832-835, Mar. 2000

[10] Willam V. Hassenzahl, Drew W. Hazelton, Brian K. Johnson, Peter Komarek, Mathias Noe, and Chandra T. Resis, "Electric Power Applications of Superconductivity", Proceedings of the IEEE, Vol. 92, No. 10, October 2004

[11] 과학기술부, 한국전력공사 전력연구원, "저항형 고온초전도한류기 개발", 2004. 7

[12] 과학기술부, 연세대학교, "유도형 고온초전도한류기 개발", 2004. 7

[13] 최효상, 현옥배, 고태국, "초전도 한류기를 포함한 계통의 지락사고에 대한 EMTDC 해석", 전기학회논문지, 48B권 4호, pp161-166, 1999. 4.

[14] 이승제, 이찬주, 고태국, "고온 초전도 한류기가 설치된 전력 시스템의 안정도 해석", 전기학회논문지, 48B권 5호, pp227-232, 1999. 5.

[15] M. Noe, O-B Hyun, Y.-B. Yoon, and H. Jagels "Investigation of the Feasibility of Superconducting Fault Current Limiters in Seoul and Berlin", Pro. of EUCAS2003, 14-18 Sept. 2003, Sorrento, Italy

[16] 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

[17] Jong-Yul Kim, Seung Ryul Lee, Jae-Young Yoon, "Evaluation of the Application Scheme of SFCL in

Power Systems", KIEE International Transactions on PE, Vol. 4-A, No. 4, pp. 221-226, 2004

[18] 이승렬, 김종율, 최홍관, 윤재영, "국내 실계통에서의 154kV 초전도한류기 계통적용 가능성 검토", 전기학회논문지, 53A권 12호, pp661-669, 2004. 12.

[19] 과학기술부, 한국전기연구원, "초전도기기 모델링 및 초전도기기 보호기술 개발", 2004. 7

[20] Jae-Young Yoon, Jong-Yul Kim, Seung-Ryul Lee, "Resistive HTS-FCL EMTDC Modeling by Using Probabilistic Design Methodology", KIEE International Transactions on PE, Vol. 4-A No.2, pp. 69-72, 2004

[21] 윤재영, 김종율, 이승렬, "퀵칭 특성을 고려한 EMTDC 저항형 초전도한류기 모델링", 전기학회논문지, 53A권 2호, pp73-79, 2004. 2.

## 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

### 김 종 율 (金鍾律)



1974년 7월 6일생. 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 ~ 현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력시스템연구그룹(선임연구원)  
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(공학)/ 1987년~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력시스템연구그룹장(책임연구원)  
Tel : 055-280-1316 Fax : 055-280-1390  
E-mail : jyyoon@keri.re.kr