

## 모선 분리 운영중인 전력계통에 초전도 한류기 적용 효과 및 영향에 관한 연구

(A Study on the Effect of Superconducting Fault Current Limiter in Power System with Separated Bus and Superconducting Fault Current Limiter)

김명현\* · 김진석 · 임성훈 · 김재철\*\*

(Myong-Hyon Kim · Jin-Seok Kim · Sung-Hun Lim · Jae-Chul Kim)

### Abstract

Currently, separated buses were increased to limit a fault currents in power transmission system. However, separated buses caused bad influences such as a decrease of reliability and stability. Superconducting fault current limiter (SFCL) was proposed to limit a fault current lately and that has many merits beside any other solutions. Therefore, we proposed the install of Superconducting fault current limiter (SFCL) in power transmission system with separated bus. And our proposal was verified by reliability of power system.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter(SFCL), Power Transmission System, Distance of Relay

### 1. 서 론

지속적인 산업 발전은 전력 수요의 증가를 초래하였고 현 전력계통은 증가하는 전력 수요를 충족시키고 원활한 전력계통 운영을 위해 전력계통의 확장 및 개선을 진행 해왔다. 그러나 전력계통 증대를 위한 모선 연계, 대용량기기로의 교체 등의 다양한 방안들은 전

력계통의 총 임피던스를 감소 시켰고 이로 인해 고장 전류가 증가하는 문제가 발생 하였다. 고장전류의 증가는 다양한 영향을 초래하며 그 중 고장전류가 차단기의 정격차단용량을 초과하는 경우에는 차단기의 부동작을 유발하여 전력계통의 붕괴를 초래할 수 있다. 그러므로 차단기의 정상적인 동작을 유도하기 위하여 다양한 고장 전류 문제 해결 방안들이 제안 되었으며 모선 분리, 대용량 차단기로의 교체, 한류 리액터 설치 등이 해당 된다. 그러나 이들 방안들은 정상시에 손실 발생, 신뢰도 하락, 고비용 발생 등의 부정적인 측면도 수반한다. 반면에 초전도 한류기는 초전도체의 특성을 이용하므로 정상시에는 임피던스를 갖지 않아 손실을 발생하지 않고 고장 발생 시에만 초전도체가 초전도 상태를 벗어나 저항을 발생시킴으로써 이를 통해 고장전류를 제한한다. 그러므로 다른 고장전류 저

\* 주저자 : 송실대 공대 전기공학부 석사과정  
\*\* 교신저자 : 송실대학교 전기공학부 교수  
\* Main author : Masters course of Electrical Engineering at Soong-sil University  
\*\* Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Soong-sil University  
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780  
E-mail : jckim@ssu.ac.kr  
접수일자 : 2012년 10월 31일  
1차심사 : 2012년 11월 2일  
심사완료 : 2012년 11월 26일

감 방안들에 비해 이상적인 방안으로 평가되어 활발한 연구가 진행되고 있다. 현재까지의 초전도 한류기에 관한 연구는 22.9kV 배전계통에 적용 관련 연구가 주로 진행이 되었다. 그러나 전력계통의 증대는 송전계통에서도 진행이 되었고 이로 인한 고장전류 저감 문제 또한 함께 대두되었다. 그러므로 송전 계통에도 초전도 한류기를 적용하기 위한 다양한 연구가 준비 및 진행 중이다[1-7].

본 논문은 향후 송전 계통에 초전도 한류기 적용을 위한 선행 연구로 154kV 송전 계통에 초전도 한류기 적용시 효과와 영향을 확인하였다. 초전도 한류기의 적용점은 고장 전류의 증가 문제로 인하여 모선 분리 운영중인 개소를 대상으로 하였다. 모선 분리 운영은 고장 전류 저감을 위한 방안으로 사용 가능하나 신뢰도 하락과 안정도 저하 등의 많은 단점을 동반한다. 그러므로 모선 분리 운영 개소에 초전도 한류기 적용을 통해 모선 연계 운전 가능성을 검토하고 간략한 신뢰도 평가를 통해 초전도 한류기 적용을 통한 고장전류 저감 방안의 유효성을 검토하였다. 또한 이전에 배전계통에 초전도 한류기 적용 관련 연구 진행시 초전도 한류기 적용으로 인하여 과전류계전기가 영향을 받아 오·부동작하는 문제점이 제안되었고 이에 대한 개선을 위해 다양한 연구가 진행이 되었다. 송전계통 내에는 보호기기 중 거리계전기가 존재하며 고장 발생시 초전도 한류기가 갖는 임피던스로 인해 거리계전기가 인지하는 겉보기 임피던스 변화가 예상되고 이로 인한 오·부동작 발생 가능성이 존재한다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 문제 발생 가능성에 대해서도 검토를 진행하였다.

## 2. 모의 회로 구성

154kV 전력계통 내에 모선 분리 운영중인 개소에 초전도 한류기 적용시 효과와 영향을 확인하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 통해 그림 1과 같이 모델링 회로를 구현하였다.

모델링 회로는 기존의 연계 운전을 하였던 Bus<sub>1</sub>과 Bus<sub>2</sub>가 고장전류의 증가 문제로 인하여 모선 분리 운영 중임을 가정하고 있다. 모의 회로 내에 상정사고는

3상 단락을 발생시켰고 이는 고장유형의 특성으로 인해 가장 큰 고장전류를 갖기 때문이다.

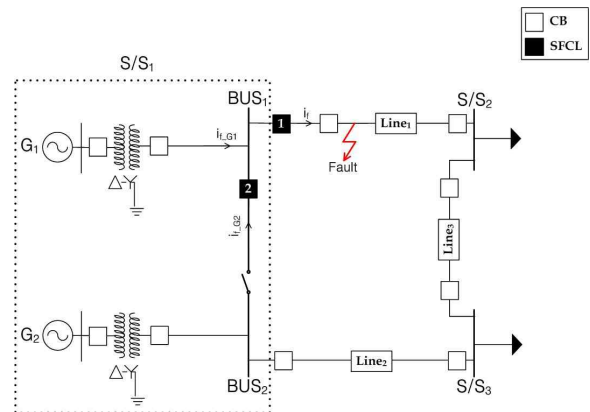


그림 1. 모델링 회로  
Fig. 1. Modeling circuit

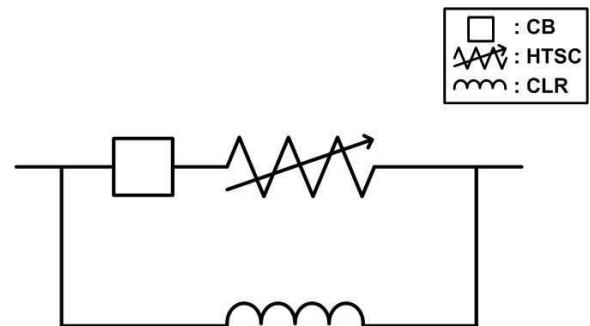


그림 2. 초전도 한류기의 구성  
Fig. 2. Structure of SFCL

이 회로에서 사용된 초전도 한류기는 트리거 형태의 초전도 한류기를 사용 하였으며 초전도 한류기의 구성은 그림 2를 통해 나타내었다. 고장 발생시 초기에는 초전도 소자(HTSC)로 고장전류가 흐르게 되고 초전도 소자가 켜치되어 상전도 저항을 발생 시키면 그 크기에 따라 한류리액터(CLR)와 함께 고장전류를 부담하여 저감 효과를 갖는다. 또한 일정 시간 이후에는 초전도 소자 앞에 설치되어 있는 차단기가 동작하여 초전도 소자로 흐르는 고장전류를 차단하고 이를 통해 초전도 소자를 보호한다. 초전도 한류기의 임피던스 구성은 상전도 저항( $R_{sc}$ ) 0.6 $\Omega$ 과 한류리액터( $Z_{CLR}$ )  $j0.5\Omega$ 을 갖으며 초전도 한류기 적용 위치에 따른 영향

과 효과를 확인하기 위하여 선로 내에 적용되는 1번 위치와 모선에 tie 형태로 적용되는 2번 위치로 나누어 분석을 진행하였다.

초전도 한류기 적용시 거리계전기의 영향을 확인하기 위하여 Line<sub>1</sub>에 거리계전기를 설치하였으며 Line<sub>1</sub>의 총길이는 15km이다. 그러므로 거리계전기는 정정지침에 따라 단락 사고 발생시 Zone<sub>1</sub>의 영역은 Bus<sub>1</sub>로부터 12.725km까지가 된다.

### 3. 초전도 한류기 적용 효과 및 영향

#### 3.1 고장 전류 저감을 통한 모선 연계 가능성 검토

그림 3은 본 논문에서 가정하고 있는 모의 회로 내에서 모선 연계시와 미연계시의 고장전류 크기 결과이다. 또한 그림 3의 고장전류 결과는 앞서 서술하였던 것과 같이 3상단락 고장 발생시 결과이며 가장 큰 고장전류를 유도하기 위하여 모선 근거리 사고시 결과를 나타내었다. 각 사례에 대한 가정 사항은 표 1을 통해 정리하였다.

Case0은 모선 연계 운영중인 전력계통이 고장전류의 증가로 인하여 차단기의 정격차단용량을 초과하는 경우를 가정한 것이다. 본 논문에서는 차단기의 정격차단용량을 40kA로 가정하여 연구를 진행하였다.

표 1. 각 사례별 가정 사항  
Table 1. Situation of each cases

구분	가정 사항	
	모선 연계	초전도 한류기(위치)
Case0	연계	미적용
Case1	분리	미적용
Case2	연계	적용(1)
Case3	연계	적용(2)

Case0의 고장전류 실효치는 약 41kA로 차단기의 정격차단용량을 초과하고 이로 인해 안정적인 전력계통

의 운영이 불가능함을 확인 가능하다. Case1은 이러한 문제를 해결하기 위해 모선 분리 운영 하였을 때를 가정하고 있다. 모선 분리시 고장전류 실효치는 약 25kA의 크기를 보였으며 모선 분리 운영시 고장전류를 차단기의 정격차단용량을 초과하지 않는 수준으로 저감이 가능하여 안정적인 전력계통 운영이 가능해짐을 확인 가능하다.

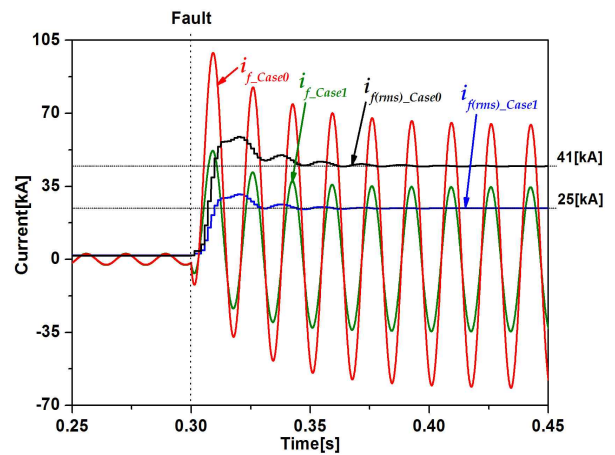


그림 3. Case0과 Case1의 고장 전류  
Fig. 3. Fault current of Case0 and Case1

앞서 모선 연계 운전 중인 전력계통에서 고장전류의 증가 문제를 해결하기 위하여 모선 분리 운영을 하는 경우를 살펴보았다. 하지만 모선 분리는 전력계통의 신뢰도, 안정도 등의 측면에서 부정적인 영향을 초래한다. 이러한 단점들을 보완하기 위해 모선 연계 운영을 유지하며 초전도 한류기 적용을 통해 고장전류를 저감하는 Case2의 경우를 가정 하였다. 초전도 한류기는 1번 위치에 적용 되었으며 이는 Line<sub>1</sub>의 Bus<sub>1</sub> 근거리해 해당된다. 고장전류 결과는 그림 4를 통해 나타내었다. 고장전류는 실효치 약 31kA로 초전도 한류기 적용을 통해서 고장전류를 차단기의 정격차단용량을 초과하지 않는 수준으로 저감 가능하다. 하지만 Line<sub>2</sub>에서의 고장에 대해서는 고장전류 저감 효과를 가지지 못하므로 Line<sub>2</sub>에도 초전도 한류기를 적용해야 모선연계가 가능해진다. Case3은 초전도 한류기를 모선에 tie 형태로 적용 하였을 때이며 위치 2번에 해당한다. 고장전류 결

과는 그림 4에 Case2 결과와 함께 나타내었다. 고장 전류의 실효치는 약 38kA이다. Case3에서도 가정된 차단기의 정격차단용량 이하로 고장전류가 저감되어 모선 연계가 가능해짐을 확인 가능하다.

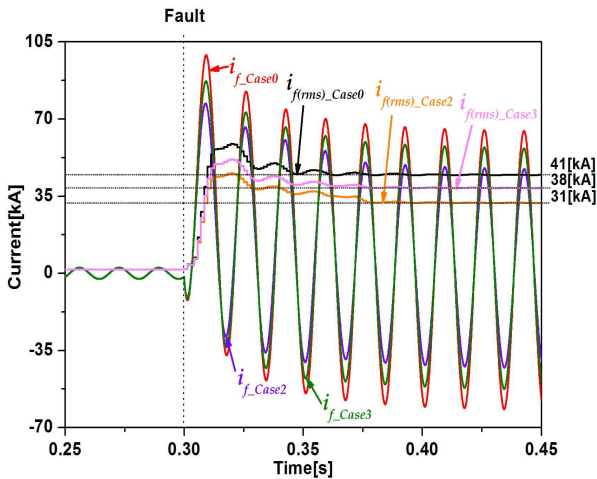


그림 4. Case0, Case2와 Case3의 고장 전류  
Fig. 4. Fault current of Case0, Case2 and Case3

### 3.2 신뢰도 평가를 통한 제안의 유효성 검토

앞서 고장전류 증가 문제로 인하여 모선 분리 운영 중인 전력계통에 초전도 한류기 적용을 통한 모선연계운전 가능성을 확인하였다. 또한 이러한 제안의 유효성을 검토하기 위하여 모의 계통에 대한 간략한 신뢰도 평가를 진행하였다. 평가 결과는 표 2를 통해 나타내었으며 소수점으로 인한 오차는 무시하였다[8].

Case0을 기준으로 Case1과 신뢰도 평가 결과를 비교시 모선 분리 운영으로 인해 신뢰도가 하락됨을 확인 가능하다. Case1의 경우 고장시에도 모선은 분리되어 있는 상황이고 구성 기기의 수리시간이 매우 길어 다른 경우들에 비해 신뢰도 평가 결과가 매우 낮다. Case0을 기준으로 Case2와 Case3의 신뢰도 평가 결과 비교시 앞선 Case1과 같이 신뢰도가 하락함을 확인 가능하다. 하지만 이는 Case1에 비해 매우 적은 수준이며 이는 전력계통에 초전도 한류기 적용으로 인한 결과이다. 초전도 한류기 적용으로 인한 신뢰도 변

표 2. 신뢰도 평가 결과

Table 2. Results of Reliability

구분	신뢰도 지수		
	$\lambda$ f/yr	r hour	U hour
Case0	0.000048	120.6812	0.005861
Case1	0.48361	2078.54	90.290374
Case2	0.000048	120.6947	0.005861
Case3	0.000048	124.2238	0.006066

### 3.3 초전도 한류기 적용시 거리계전기의 영향

거리계전기의 계측 영역 내에 초전도 한류기가 적용되면 초전도 한류기의 임피던스와 고장 전류 저감에 따른 계측 값의 변화로 거리계전기의 결보기 임피던스가 변화하게 된다. 이는 거리계전기가 초전도 한류기 적용으로 인해 받는 영향이 존재함을 예상 가능하다. 그러므로 고장점 변화에 따른 거리계전기의 동작 결과를 분석 하였다. 본 결과의 초전도 한류기 적용 지점은 1번으로 선로 내에 적용되었을 때이며 결과는 그림 5를 통해 나타내었다. Zone1을 기준으로 거리계전기가 받게 되는 영향을 검토하였으며 Zone1의 영역은 앞서 서술하였던 것과 같이 12.725km까지이다. 그림 5의 (a)는 초전도 한류기 미적용 시의 결과이며 12.5km 고장점 까지는 Zone1의 영역이므로 임피던스 궤적이 거리계전기의 동작 영역 내로 도달하여 동작을 하고 13km 고장점부터는 임피던스 궤적이 도달하지 않아 동작을 하지 않으므로 정상적으로 정정되어 있음을 확인 가능하다. 그림 5의 (b)는 초전도 한류기 적용시 결과이다. 앞선 결과와 달리 Zone1의 동작 구간인 12.5km 지점 고장에서 임피던스 궤적이 거리계전기의 동작영역 내에 도달하지 못하여 부동작 함을

확인 가능하다.

이와 같은 결과를 통해 초전도 한류기 적용시 거리계전기의 오·부동작 가능성이 존재함을 확인하였다. 거리계전기의 오·부동작은 고장 발생시 고장 기간과 영역을 확대시킨다. 또한 초전도 한류기의 임피던스의 크기에 따라 오·부동작 영역은 확대될 것이다. 그러므로 송전계통 내의 초전도 한류기 적용시 초전도 한류기의 임피던스를 고려한 거리계전기의 재정정이 필요로 된다.

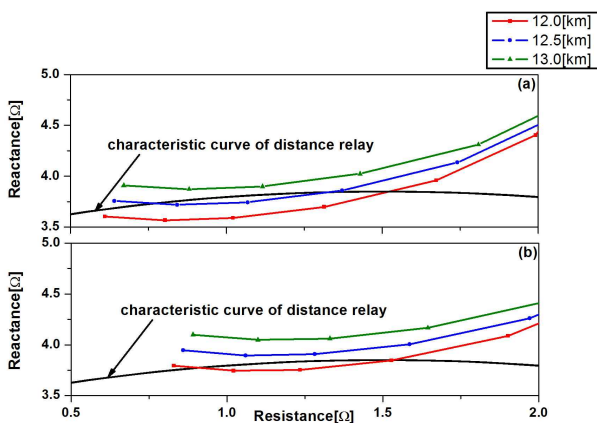


그림 5. 거리계전기의 동작  
 (a) 초전도 한류기 미적용시  
 (b) 초전도 한류기 적용시  
 Fig. 5. Operations of distance relay  
 (a) SFCL not in circuits  
 (b) SFCL in circuits

#### 4. 결 론

본 논문에서는 송전 계통에 초전도 한류기 적용을 위한 선행 연구로 고장전류 증가 문제로 인하여 모선 분리 운영중인 모의 154kV 전력계통을 구성하여 초전도 한류기 적용 효과와 영향을 확인하였다. 초전도 한류기 적용을 통해 고장전류 증가로 인한 차단기의 정격차단용량 초과 문제를 해결 가능하였다. 또한 초전도 한류기를 통한 고장전류 문제의 해결이 모선 분리를 통한 해결 방안보다 신뢰도 측면에서 더 유효하고 이를 간략한 신뢰도 평가를 이용하여 나타내었다. 초전도 한류기가 전력계통 신뢰도에 미치는 영향은 미약하지만 초전도 한류기를 통해 모선연계 운전이 가

능해지는 것이므로 신뢰성이 높은 초전도 한류기가 적용되어야 함을 유의해야 한다. 또한 초전도 한류기 적용시 거리계전기의 동작이 변화되고 이로 인해 차단기가 부동작 하는 구간이 발생함을 확인하였다. 그러므로 송전계통 내에 초전도 한류기 적용 시에는 거리계전기의 재정정이 필요로 된다.

#### 감사의 글

본 과제는 지식경제부에 의해 투자된 전력산업융합원천 기술개발사업의 일환으로 수행되었음.

#### References

- [1] Kim, J. S, "A Study on Application of Superconducting Fault Current Limiter into Large Power Transformer installed in Distribution Substation", Soong-sil Univ, 2009.
- [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 Appl. Power Delivery. vol. 8, no. 1, pp. 188-198, Jan. 1993.
- [3] B. Gromall, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacherm B. Utz, R. Nies, and H.-W. Newmuller, "Resistive fault current limiter with YBCO films-100 kVA functional model", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp. 656-659, June 1999.
- [4] Kim, J. S, Lim, S. H, Moon, J. F, Kim, J. C, Hyun, O. B, "Analysis on the Protective Coordination on Neutral Line of Main Transformer in Power Distribution Substation with Superconducting Fault Current Limiter", Journal of KIEE, Vol. 58, No. 11, pp. 2089-2094, 2009.
- [5] H. Kameda, and H. Taniguchi, "Setting Method of Specific Parameter of a Superconducting Fault Current Limiter Considering the Operation of Power System Protection", IEEE Trans. Appl Supercond., vol. 9, no. 2, pp. 1355-1360, June 1999.
- [6] Kim, M. H, Kim, J. S, You, I. K, Moon, J. F, Lim, S. H, Kim, J. C, "A study of Re-Fuse Coordination Method of Distribution System with SFCL", Journal of KIEE, Vol. 58, No. 10, pp. 1835-1841, 2009.
- [7] Kim, M. H, Kim, J. S, Lim, S. H, Kim, J. C, Choo, D. W, "Analysis of Transmission Power System with Superconducting Fault Current Limiter for Reducing a Fault Current", Vol. 2011, No. 7, pp. 718-719, 2011.
- [8] Bae, I. S, Kim, S. Y, Kim, J. O, "A Study on the Reliability of Superconducting Fault Current Limiter and Adjacent Distribution Equipments", Journal of KIEE, Vol. 58, No. 11, pp. 2122-2127, 2009.

◇ 저자소개 ◇



**김명현 (金銘炫)**

1986년 9월 23일생. 2011년 안양대 전기  
전자공학과 졸업. 현재 숭실대학교 대학원  
전기공학과 석사과정.

E-mail : surfnlead@ssu.ac.kr



**김진석 (金辰碩)**

1983년 1월 26일생. 2007년 서울산업대  
전기공학과 졸업. 2009년 숭실대 대학원  
전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재  
숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료.

E-mail : redwolf832@ssu.ac.kr



**임성훈 (林成勳)**

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대 전기  
공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기  
공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원  
전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기  
공학부 교수.

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr



**김재철 (金載哲)**

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기  
공학과 졸업, 1983년 서울대학교 대학원  
전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원  
전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재  
숭실대 전기공학과 교수. 본 학회 감사.

E-mail : jckim@ssu.ac.kr