

## 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기의 계통 적용에 따른 보호기기간 동작특성 분석

(Analysis on the Operational Characteristic between the Protective devices and Superconducting Fault Current Limiter with a Peak Current Limiting Function in the Power Distribution System)

조용선\* · 김진석 · 김재철 · 임성훈\*\*

(Yong-Sun Cho · Jin-Seok Kim · Jae-Chul Kim · Sung-Hun Lim)

### Abstract

In this paper, the operational characteristics due to the introduction of the superconducting fault current limiter(SFCL) with a peak current limiting function were analyzed in the power distribution system. The parallel structure of the superconducting element can operate the peak current limiting function depending on the transient amplitude of fault current. We studied the operating characteristics of the introduction of the SFCL with a peak current limiting function in the power distribution system. Furthermore, we were analyzed between the SFCL with a peak current limiting function and the protection devices in the power distribution system, through the short circuit experiments.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter(SFCL), Peak-Current, OverCurrent Relay(OCR)

### 1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가로 인해 계통내의 주변압기는 대응량 변압기로의 교체가 불가피하게 되었다. 이것은 계통의 공급측면에서는 긍정적인 부분이지만,

\* 주저자 : 송실대학교 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 : 02-828-7268, Fax : 02-817-7961  
E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr  
접수일자 : 2012년 9월 4일  
1차심사 : 2012년 9월 11일  
심사완료 : 2012년 10월 9일

고장발생시 고장전류의 증가라는 문제점을 초래하고 있다. 이에 따라 기존 설치된 보호기기의 차단용량을 초과하는 문제점이 발생하기 때문에 계통의 효과적인 운영을 위해 고장전류의 크기를 감소시키는 대응책이 제안되어지고 있다. 제안된 대응책으로는 대응량 차단기로의 교체, 고임피던스 기기 사용 또는 직렬리액터 채용 등의 방안들이 있다. 그러나 이러한 방안들은 평시 손실 발생과 전압강하 발생 및 계통의 안정도 저하 등의 문제점을 가지고 있다. 이러한 이유들로 가장 효과적인 고장전류 제한 방안으로 초전도한류기의 적용이 제시되어지고 있다. 초전도한류기는 평시에 전력손실이 없는 초전도특성을 이용하여 기존 고장전류 대책 방안들의 문제점을 해결할 수 있고, 고장발생시

고장전류를 빠르게 감지 및 제한함으로써 최적의 방안으로 연구되어지고 있다[1-3].

초전도한류기는 고장 발생시 고장전류가 초전도한류기의 임계값을 초과 할 때, 켜치 동작으로 인한 저항을 이용하여 고장전류를 제한하는 저항형 초전도한류기가 대표적이다. 이는 구조적으로 간단하고, 소형화가 가능한 장점이 있는 반면에 고장전류가 초전도소자에 크게 흐를 경우에 쉽게 초전도소자가 파손되는 단점이 있다. 이에 대한 보완으로 요즘 많은 연구가 진행되어 지고 있는 하이브리드형 초전도한류기가 있다. 하이브리드형 초전도한류기는 스위치, 리액터와 같은 전류제한요소의 구조를 이용하여 초전도소자의 고장전류에 대한 파손을 절감시킨다. 하지만 하이브리드형 초전도한류기는 스위치를 이용한 동작이기 때문에 스위치 오동작에 따른 문제점과 동작특성이 매우 복잡하다라는 단점이 있다[4-5].

본 논문에서는 이러한 문제점들의 대안으로 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기를 제안하였다. 저항형 초전도한류기의 하나의 초전도소자 용량을 나누어 두 개의 초전도소자로 병렬 구성하여 고장전류에 대한 초전도소자의 파손현상을 상대적 절감을 기대할 수 있다. 그리고 고장전류의 과도성분에 따라 켜치 동작횟수 및 시점을 달리하여 고장전류를 제한하는 동작특성의 단순함과 정확성을 이용하여 하이브리드형 초전도한류기의 단점을 보완하였다[6-8].

본 논문에서는 이러한 특성을 이용한 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기의 모의 계통 적용에 따라 고장 위치별 고장전류의 과도성분 크기에 따른 동작특성과 기존 보호기기와의 적용에 대해 알아보았다.

## 2. 피크전류 제한형 초전도한류기

### 2.1 기본구조 및 동작원리

그림 1은 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기의 구조를 나타낸다. 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기는 저항형 초전도소자  $SC_1$ 과  $SC_2$ 를 병렬 구성하고, 삽입저항  $R_a$ 를 추가하여 하나의 초전도한류기 모델로 구성하였다. 평상시 전류는 삽입저항  $R_a$ 로

인해 전류방향  $i_1$ 으로 흐르게 되고, 고장발생시, 초기 고장전류( $i_{fault}$ ) 역시 전류방향  $i_1$ 으로 흐르게 된다. 이 때,  $i_{fault}$ 의 크기가 첫 번째 초전도소자 ( $SC_1$ )의 설정된 임계 전류값을 넘게 되면  $SC_1$ 은 켜치를 발생하고, 그에 따른 저항  $R_{sc1}$ 의 발생으로 고장전류의 일부는 전류방향  $i_2$ 로 흐르게 된다.  $SC_1$ 의 켜치 발생 이후 두 번째 초전도소자 ( $SC_2$ )에 흐르는 일부 고장전류의 크기가  $SC_2$ 의 임계 전류값을 초과하여  $SC_2$ 의 켜치가 발생하는 경우와 초과하지 못하여 켜치가 발생하지 않는 경우에 따라서 피크전류 제한기능을 갖는 초전도한류기는 두 가지 동작특성을 나타낸다.

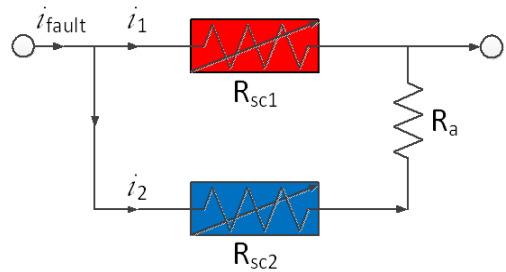


그림 1. 피크전류 제한형 초전도한류기 구조  
Fig. 1. Structure of the FCL with a peak current limiting function

먼저 고장전류가  $SC_2$ 의 임계 전류값을 초과하는 경우를 살펴보면  $SC_1$ 과 마찬가지로  $SC_2$ 도 켜치를 발생하고 그에 따른 저항  $R_{sc2}$ 의 발생으로 고장전류를 제한하는 동작특성을 갖는다. 결과적으로 첫번째 경우의 고장전류는  $SC_1$ 과  $SC_2$ 의 켜치로 인해 발생하는 저항  $R_{sc1}$ 과  $R_{sc2}$ , 그리고 삽입저항  $R_a$ 로 제한되어진다. 두 번째 동작특성으로 고장전류가  $SC_2$ 의 설정된 임계 전류값을 초과하지 못하는 경우에는  $SC_2$ 는 켜치를 발생하지 못하고,  $SC_1$ 만이 켜치를 발생하여 그에 따른 저항  $R_{sc1}$ 과 삽입저항  $R_a$ 로 고장전류를 제한하는 동작특성을 가지고 있다[9].

여기서 초전도소자  $SC_1$ 과  $SC_2$ 가 병렬 구성된 피크전류 제한기능을 갖는 초전도한류기는 저항형 초전도한류기에 비해 고장전류에 대한 초전도소자의 부담을 상대적으로 절감하는 효과를 기대할 수 있다. 또 저항요소만을 이용한 동작특성으로 하이브리드형 초전도한류기에 비해 단순하고 정확한 구조 및 동작특성을

또한 기대할 수 있다.

### 2.2 동작특성 그래프

그림 2 (a)와 (b)는 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기의 동작특성을 알아보기 위한 모의 단락 실험 결과 그래프를 나타낸다. 각 그림 2 (a)와 (b)는 고장발생시 고장각 설정으로 고장전류의 과도성분을 달리할 때, 두 초전도소자(SC<sub>1</sub>, SC<sub>2</sub>)에 흐르는 초전도소자 전류( $i_{sc1}$ ,  $i_{sc2}$ )와 초전도소자의 켄치 동작으로 인한 저항에 따라 발생하는 초전도소자 전압( $v_{sc1}$ ,  $v_{sc2}$ )을 나타내고 있다. 이 때 그림 2 (a)는 고장각 90° 고장으로 그림 2 (b)의 고장각 0° 고장보다 고장전류의 과도성분이 작게 흐르기 때문에 하나의 초전도소자만이 동작하여 켄치저항에 따른  $v_{sc1}$ 을 확인할 수 있다. 그림 2 (b)에서는 고장각의 설정으로 고장전류의 과도성분에 차이에 따라 두 개의 초전도소자가 모두 동작하여 켄치저항에 따른  $v_{sc1}$ 과  $v_{sc2}$ 가 발생한 것을 확인할 수 있다. 이렇게 앞서 살펴본 고장 발생시 고장각의 설정에 따라 피더에 흐르는 고장전류의 과도성분 크기에 따른 초전도소자의 켄치 동작횟수 및 시점을 달리하여 고장전류를 제한하는 동작특성을 모의 단락 실험을 통한 결과에서도 확인할 수 있었다.

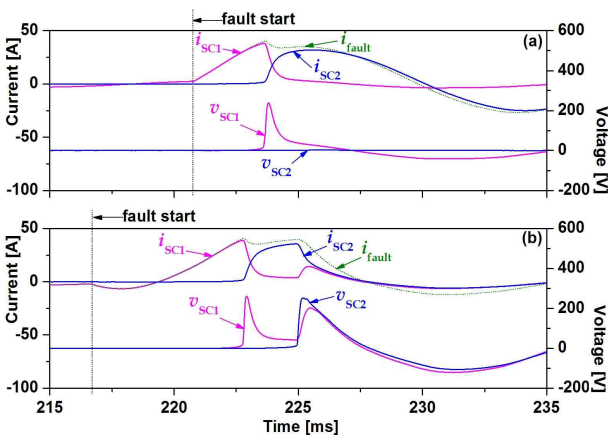


그림 2. 피크전류 제한형 초전도한류기 동작특성  
(a) 고장각 90° (b) 고장각 0°  
Fig. 2. Operation characteristics of the SFCL with a peak current limiting function  
(a) fault angle 90° (b) fault angle 0°

## 3. 모의실험 구성 및 결과 분석

### 3.1 모의실험 구성

피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기의 모의 계통 적용에 따른 보호기간 동작특성을 알아보기 위해 그림 3과 같이 모의회로를 구현하였다. 본 논문에서는 fault<sub>1</sub>과 fault<sub>2</sub>의 고장 위치의 설정을 통해 고장 발생시, 고장전류의 크기변화에 따른 피크전류 제한기능을 갖는 초전도한류기와 과전류계전기 및 리클로저간 동작결과를 비교하기 위한 구성을 하였고, 회로 구성의 설계변수는 표 1에 나타내었다[10-11].

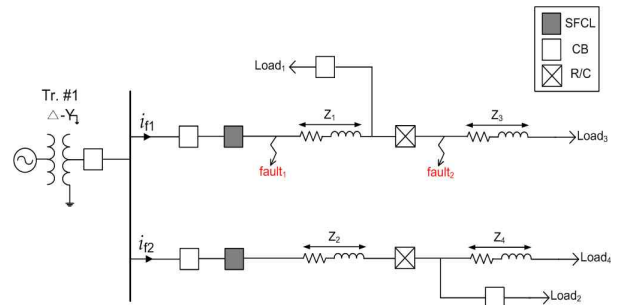


그림 3. 모의 회로 구성도  
Fig. 3. Distribution System Configuration

표 1. 모델링 회로 임피던스  
Table 1. Modeling circuit parameters

| 구성                 | 임피던스<br>(Base 100MVA)                           |
|--------------------|---|
| Tr. #1             | 1kVA, j18%                                      |
| 선로<br>(Z=R+jX)     | Z <sub>1</sub> , Z <sub>2</sub> = 0.42 + j0.66Ω |
|                    | Z <sub>3</sub> , Z <sub>4</sub> = 0.85 + j1.47Ω |
| 부하<br>(p.f. = 95%) | Load <sub>1</sub> , Load <sub>4</sub> = 40Ω     |
|                    | Load <sub>2</sub> = 10Ω                         |
|                    | Load <sub>3</sub> = 5Ω                          |

### 3.2 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기의 모의 회로 적용에 따른 고장위치별 보호기간 동작 결과

그림 4와 5는 그림 3에서 고장위치 fault<sub>1</sub>과 fault<sub>2</sub>에

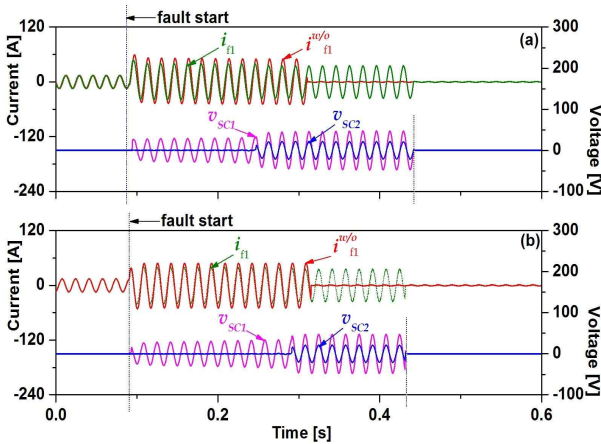


그림 4. 고장위치 fault<sub>1</sub>에서 고장각에 따른 고장전류 및 초전도소자 전압 (a) 고장각 0° (b) 고장각 90°  
 Fig. 4. Fault current and HTSC's element voltage according to the fault angle in the fault<sub>1</sub> (a) fault angle 0° (b) fault angle 90°

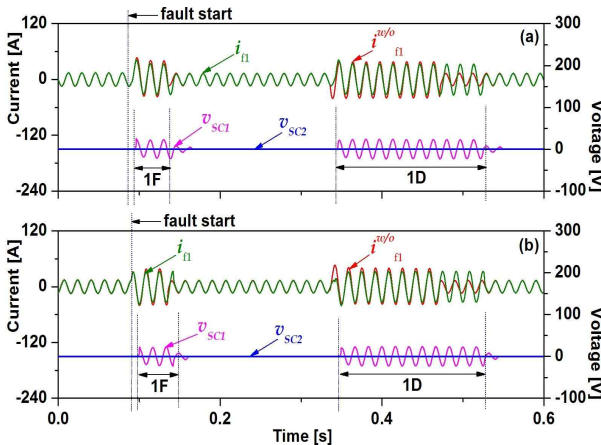


그림 5. 고장위치 fault<sub>2</sub>에서 고장각에 따른 고장전류 및 초전도소자 전압 (a) 고장각 0° (b) 고장각 90°  
 Fig. 5. Fault current and HTSC's element voltage according to the fault angle in the fault<sub>2</sub> (a) fault angle 0° (b) fault angle 90°

서 고장발생시 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기와 보호기기의 동작에 대해 알아보기 위한 단락 실험 결과 그래프이다. 그림 4 (a)와 (b)는 고장위치 fault<sub>1</sub>에서 고장각을 다르게 설정함으로써 고장전류의 과도성분 크기에 대한 피크전류 제한기능을 갖는 초전도한류기와 과전류계전기의 적용에 따른 결과를 나타내고 있다. 이 때 고장각에 따른 고장전류 과도성분

의 크기는 그림 4 (a)가 그림 4 (b)보다 크게 흐르는 경우로 모의하였다. 이에 따라 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기의 적용에 따른 고장전류 절감효과와 두 번째 초전도소자의 켄치 동작시점이 고장전류의 과도성분이 큰 경우인 그림 4 (a)가 그림 4 (b)에 비해 더 빠르게 동작하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기의 고장전류 크기에 따라 켄치 동작시점을 달리하는 동작특성을 확인할 수 있다. 그림 5 (a)와 (b)는 그림 4와 마찬가지로의 고장각 설정으로 고장위치 fault<sub>2</sub>에서 고장 발생시, 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기와 리클로저의 적용에 따른 결과를 나타내고 있다. 그림 5 (a) 역시 그림 5 (b)보다 고장각의 설정을 통하여 고장전류의 과도성분이 크게 흐르는 경우로 모의하였다. 그림 4와 마찬가지로 초전도한류기 적용에 따른 고장전류 절감효과를 확인할 수 있고, 고장위치 fault<sub>2</sub>의 고장전류 크기는 fault<sub>1</sub>의 고장전류 크기보다 작기 때문에 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기가 고장각의 변화에 상관없이 첫 번째 초전도소자에서만 켄치가 동작함을 확인할 수 있다. 이 논문의 리클로저의 동작 순서는 1F1D로 설정되어 있다. 1F는 1번의 순시동작을 의미하고, 1D는 1번의 지연동작을 의미한다. 이 때 고장전류의 과도성분에 따라 리클로저의 1D 시점이 달라져서 첫 번째 초전도소자의 동작시점 또한 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다[12].

그림 6과 그림 7은 각각 그림 4와 그림 5의 같은 고장조건에서 각 초전도소자에 발생된 저항( $R_{sc1}$ ,  $R_{sc2}$ )과 초전도한류기의 전체저항( $R_{total}$ )을 나타내고 있다. 그림 4와 그림 5의 결과와 마찬가지로 고장각에 따른 고장전류의 과도성분에 따라 각 초전도소자의 켄치가 발생하는 시점이 달라지는 것을 초전도소자의 켄치로 인해 나타나게 되는 저항( $R_{sc1}$ ,  $R_{sc2}$ )으로 확인할 수 있다. 그림 6 (b)와 그림 7 (b)의 결과 그래프를 통하여 0° 고장과 90° 고장에 따라 발생하는 각각 초전도한류기의 전체저항( $R_{total}$ )의 크기는 초전도소자의 켄치 시점이 달라 그에 따라 발생하는 초전도소자 저항( $R_{sc1}$ ,  $R_{sc2}$ )의 발생시점 차이는 존재하지만 크기는 큰 차이를 나타내고 있지 않음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 피크전류 제한기능을 갖는 초전도한류기의 계통

적용에 따라 고장 발생시, 고장각에 따른 초전도한류기의 퀘치 동작횟수 및 시점이 다른 동작특성의 변화가 계통의 전체 임피던스에 미치는 영향은 크지 않을 것이라는 예상을 할 수 있다.

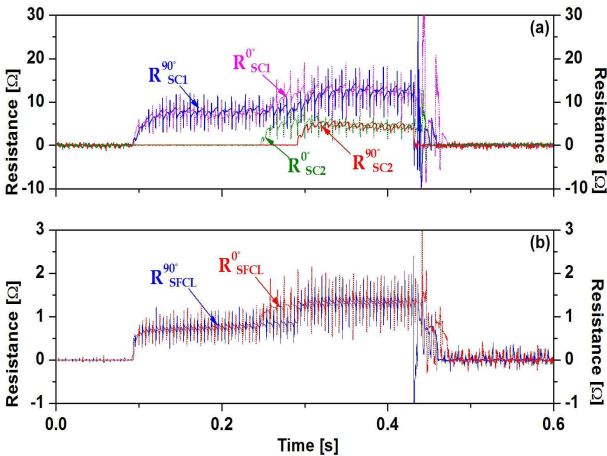


그림 6. 고장위치 fault<sub>1</sub>에서 고장각에 따른 초전도 소자 저항 및 초전도한류기 전체저항  
 (a) 초전도소자 저항 (b) SFCL 저항  
 Fig. 6. HTSC's element resistance and SFCL resistance according to the fault angle in the fault<sub>1</sub> (a) HTSC's element resistance (b) SFCL resistance

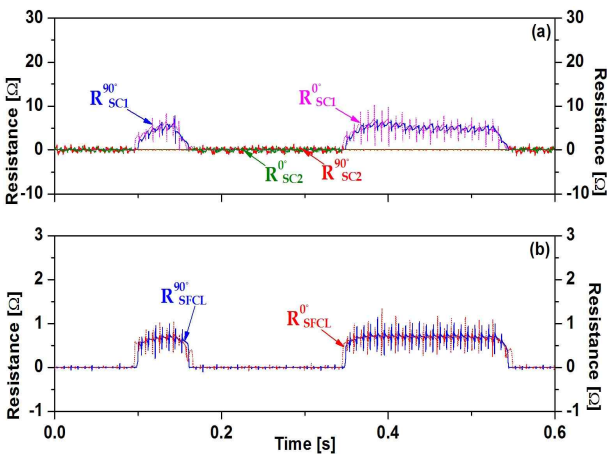


그림 7. 고장위치 fault<sub>2</sub>에서 고장각에 따른 초전도 소자 저항 및 초전도한류기 전체저항  
 (a) 초전도소자 저항 (b) SFCL 저항  
 Fig. 7. HTSC's element resistance and SFCL resistance according to the fault angle in the fault<sub>2</sub> (a) HTSC's element resistance (b) SFCL resistance

#### 4. 결 론

본 논문에서는 모의 단락 실험을 통하여 고장위치와 고장각에 따라 달라지는 고장전류의 과도성분 크기에 대한 피크전류 제한기능을 갖는 초전도한류기의 동작 특성 및 모의 계통 적용에 따른 과전류계전기와 리클로저의 적용에 대한 결과를 알아보았다. 고장발생시, 피더에 흐르는 고장전류의 과도성분 크기에 따라 피크전류 제한 기능을 갖는 초전도한류기의 퀘치 동작 횟수 및 시점을 달리하여 고장전류를 제한하는 동작 특성을 확인할 수 있었다. 모의 단락실험의 결과를 통해 저항형 초전도한류기 구조와는 달리 병렬연결을 이용한 구조적 특성으로 고장전류로 인한 초전도소자가 파손되는 것을 절감하는 효과와 저항요소만을 이용한 동작으로 동작특성의 단순함과 정확성을 이용하여 하이브리드형 초전도한류기의 복잡한 동작특성과 스위치 오동작에 따른 문제점 해결을 기대할 수 있다.

본 결과를 통해 피크전류 제한기능을 갖는 초전도한류기의 계통 도입에 따른 보호기기간 보호협조 분석과 루프형 회로적용에 관한 연구를 진행할 것이다.

#### 감사의 글

본 과제는 지식경제부에 의해 투자된 전력산업융합원천기술 개발사업의 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] You, I. K, "Study on Application of Superconducting Fault Current Limiter for the Fault Current Reduction and the Protective Coordination in a Loop Power Distribution System", Soong-sil Univ, 2011.
- [3] 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", Vol. 8. No. 1, pp. 199-198, 1993.
- [4] Kim, J. S, Lim, S. H, Kim, J. C, Choi, J. S, "Analysis on the Protective Coordination with Hybrid Superconducting Fault Current Limiter", Journal of KIEE, Vol. 60, No. 10, pp. 1832-1837, 2011.
- [5] You, I. K, Kim, J. S, Kim, M. H, Lim, S. H, Kim, J. C,



Choi, J. S, "Analysis on the Protective Coordination of Hybrid Superconducting Fault Current Limiter applied to a Power Distribution System", Vol. 2010, No. 7, pp. 556-557, 2010.

[6] Cho, Y. S, Kim, J. S, Kim, M. H, Lim, S. H, Kim, J. C, "Analysis on the Operational Characteristics in Accordance with the Introduction of SFCL with a Peak Current Limiting Function in a Loop Power Distribution System", Vol. 2012, No. 7, pp. 365-366, 2012.

[7] Cho, Y. S, Kim, J. S, Kim, M. H, Kim, I. K, Noh, S. E, Lim, S. H, Kim, J. C, "Analysis on the Protection Coordination between the Overcurrent Relay(OCR) and Superconducting Fault Current Limiter with a Peak Current Limiting Function", Vol. 2012, No. 5, pp. 51-52, 2012.

[8] Cho, Y. S, Kim, M. H, Kim, J. S, Lim, S. H, Kim, J. C, "Analysis on the characteristic of the Protection Devices due to the introduction of Superconducting Fault Current Limiter with a Peak Current Limiting Function ", Vol. 2011, No. 10, pp. 66-67, 2011.

[9] Lim, S. H, You, I. K, Kim, J. C, "Study on Peak Current Limiting Characteristics of a Flux-Lock Type SFCL Using Its Third Winding," Vol. 21, No.3, pp. 1275-1279, 2011.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

◇ 저자소개 ◇



**조용선 (趙龍先)**  
1985년 11월 20일생. 2011년 안양대 전기 전자공학과 졸업. 현재 송실대 대학원 전기공학과 석사과정.  
E-mail : yscho@ssu.ac.kr



**김진석 (金辰碩)**  
1983년 1월 26일생. 2007년 서울산업대 전기공학과 졸업. 2009년 송실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 송실대 대학원 전기공학과 박사수료.  
E-mail : redwolf832@ssu.ac.kr



**김재철 (金載哲)**  
1955년 7월 12일생. 1979년 송실대 전기 공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 송실대 전기공학과 교수.  
E-mail : jckim@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 송실대 전기 공학부 교수.  
E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr