

## 모의배전계통에 초전도한류기의 도입위치에 따른 전류제한 특성

(Current Limiting Characteristics due to Application Location of a Superconducting Fault Current Limiter in a Simulated Power Distribution System)

유일경\* · 김진석 · 김명후 · 김재철 · 임성훈\*\*

(Il-Kyoung You · Jin-Seok Kim · Myoung-Hoo Kim · Jae-Chul Kim · Sung-Hun Lim)

### 요 약

배전계통에서 전력수요의 증가와 분산전원의 증가로 대용량 변압기의 적용이 불가피하게 되었다. 하지만, 대용량 변압기로 교체할 경우 배전계통에 고장발생시 고장전류의 크기가 증가되어 기존에 설치된 차단기 및 보호기기의 차단용량 초과로 인해 교체에 따른 경제적 비용 상승이 우려된다. 따라서, 대용량 변압기의 교체시 고장전류 증가 문제를 해결하기 위한 방안 중 하나로 초전도한류기를 설치하는 방안을 검토하고 있다. 하지만, 초전도한류기는 도입위치에 따라 퀘칭 발생 시 초전도한류기의 저항 크기가 다르게 되며, 이로 인해 고장전류 제한효과가 다르게 되며 기존의 보호 장치들의 동작에 영향을 주게 된다. 본 논문에서는 모의 배전계통에 초전도한류기를 적용하였을 경우 도입위치에 따라 전류제한효과를 포함하여, 모선 전압강하, 고장제거에 따른 초전도한류기의 회복특성을 실험을 통해 비교 분석하였다.

### Abstract

The application of a large power transformer into a power distribution system was inevitable due to the increase of power demand and distributed generation. However, the decrease of the power transformer's impedance causes the short-circuit current of the power distribution system to increase and thus, the higher short-circuit current exceeds the cut-off ratings of the protective devices such as a circuit breaker. To solve these problems, several countermeasures have been proposed to protect the power system effectively from the higher fault current and the superconducting fault current limiter (SFCL) has been expected to be the promising countermeasure. However, the current limiting effect of SFCL including its bus voltage drop compensation depends on SFCL's application location in a distributed power system. In this paper, the current limiting and the bus-voltage drop compensating characteristics of the SFCL applied into a power distribution system were studied. In addition, the quench and the recovery characteristics of the SFCLs in each location of the power distribution system were compared each other.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter (SFCL), Power Distribution System, Short-Circuit Current, Bus Voltage Drop Compensation

\* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 석사과정

\*\* 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수

Tel : 02-828-7268, Fax : 02-817-7961, E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr

접수일자 : 2009년 7월 27일, 1차심사 : 2009년 7월 30일, 심사완료 : 2009년 8월 18일

## 1. 서 론

전력수요 증가와 다양한 분산전원의 도입은 배전계통내의 주변압기를 대용량 변압기로 교체를 불가피하게 만들었다. 이러한 배전계통 운영의 변화는 공급측면에 긍정적이지만 고장시 고장전류가 증가하게 된다. 이로 인해 고장전류가 기준에 설치된 차단기 및 보호기기의 차단용량을 초과하게 되는 문제가 발생되고 있으며, 따라서 계통의 효과적인 운영을 위하여 고장발생시 고장전류를 자체적으로 감지하여 감소시키고 연계운영에 변화 없이 적용할 수 있는 초전도한류기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-3].

초전도 한류기는 평상시에 초전도 상태로 전력손실이 없고, 고장발생시 고장전류를 빠르게 감지 및 제한함으로써 기준에 설치된 차단기의 차단용량이 하로 감소시켜 줄 뿐만 아니라 계통의 안정도를 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다[4-8].

하지만, 위와 같은 장점을 갖는 초전도한류기를 배전계통에 적용할 경우 도입위치 따라 고장발생시 고장전류크기가 다르게 되며, 이로 인해 초전도한류기의 저항크기가 변함에 따라 전류제한효과가 달라진다. 따라서 적용에 앞서, 배전계통 내에 초전도한류기 도입위치에 따른 전류제한 효과와 이로 인한 기존의 보호기기의 보호협조에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 배전계통에 초전도한류기 적용에 따른 기존보호기기의 보호협조에 미치는 영향에 대한 실험에 앞서 초전도 한류기 도입위치에 따른 모선전압강하 개선을 포함한 전류제한 특성을 모의실험을 통해 비교분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 초전도한류기의 켄치 및 회복 특성

대용량 변압기의 교체시 발생하는 고장전류 증가 문제를 해결하기 위한 방안 중 하나로 차단기를 교체하는 방안이 있지만 많은 비용 상승이 발생하게 되고, 또 다른 방안으로 직렬리액터를 도입하는 방안이

있다. 이 방안은 고장전류를 제한하여 기존 차단기를 사용할 수 있지만 평상시에 전력손실이 발생하고 경우에 따라 과부하상태를 유발하는 단점이 있다.

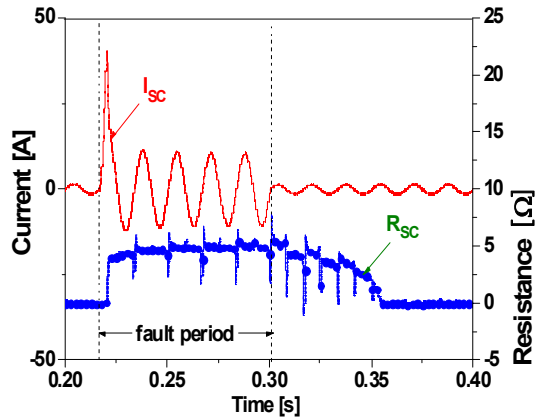


그림 1. 초전도한류기의 전류 및 저항  
Fig. 1. Current and resistance of SFCL

그림 1은 고장시 고장전류의 증가로 인해 초전도한류기의 켄치 및 회복특성을 나타낸다. 고장시 약 40[A]까지 고장전류가 발생하지만 초전도한류기의 켄치로 인한 신속한 저항발생으로 고장전류를 빠르게 제한해준다. 이때, 초전도한류기의 저항은 5[Ω]까지 증가하게 되며, 고장이 제거된 후에는 고장 발생시와는 달리 초전도상태로 회복되기까지 약 3주기가 걸리는 것을 볼 수 있다. 그림 1에서 보는 것처럼 초전도한류기는 고장발생시 반주기 만에 고장전류를 빠르게 감지 및 제한하는 반면 고장제거 후에는 더딘 회복특성을 보여주는 것을 확인할 수 있다.

### 2.2 모의 배전계통 실험 회로도

초전도한류기의 적용 위치에 따른 고장전류제한 특성을 알아보기 위하여 변압기, 차단기 및 연계선로를 이용하여 그림 2와 같이 모의 배전계통을 구성하였다. 선로임피던스를 포함한 모의 배전계통을 구성하는 요소들의 사양은 표 1과 같다.

이 모의 배전계통 단락실험은 초전도한류기를 각각 피더(case 1), 변압기 2차측(case 2), 모선(case 3)에 설치하였을 때 전원에 160[V]를 인가하고 SW<sub>1</sub>을

모의배전계통에 초전도한류기의 도입위치에 따른 전류제한 특성

다음에 SW<sub>2</sub>를 닫고 열어 고장을 5[cycle] 동안 발생시켰으며 초전도한류기의 위치에 따라 피더 전류와 모선전압을 측정하여 비교 분석하였다.

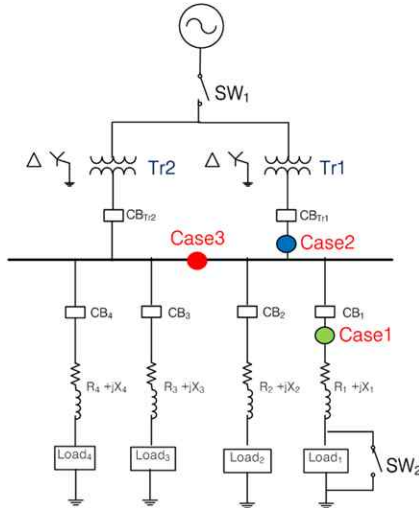


그림 2. 모의 배전계통 실험 회로도  
Fig. 2. Experimental circuit of a simulated power distribution system

표 1. 모의 배전계통의 설계변수  
Table 1. Design parameters of simulated power distribution system

| 변압기 (Tr <sub>1</sub> , Tr <sub>2</sub> ) | Value         | Unit |
|--|---------------|------|
| N1 : N2                                  | 2 : 1         |      |
| %Z                                       | j5            |      |
| 선로                                       | Value         | Unit |
| R1+jX1                                   | 0.097+j0.685  | Ω    |
| R2+jX2                                   | 0.14+j1.048   | Ω    |
| R3+jX3                                   | 0.097+j0.685  | Ω    |
| R4+jX4                                   | 0.14+j1.048   | Ω    |
| 부하                                       | Value         | Unit |
| Load1, Load3                             | 41.2 ∠ 2.62   | Ω    |
| Load2, Load4                             | 10.47 ∠ 10.37 | Ω    |

### 2.3 실험 결과 및 고찰

그림 3은 초전도한류기를 피더에 도입시(Case 1) 두 변압기의 2차측 전류를 보여준다. 이 경우에 고

장 발생 시 초전도한류기가 고장 난 피더에 직접적으로 전류를 제한해주기 때문에 두 변압기의 2차측에 흐르는 전류가 동일한 크기를 갖는 것을 확인할 수 있다.

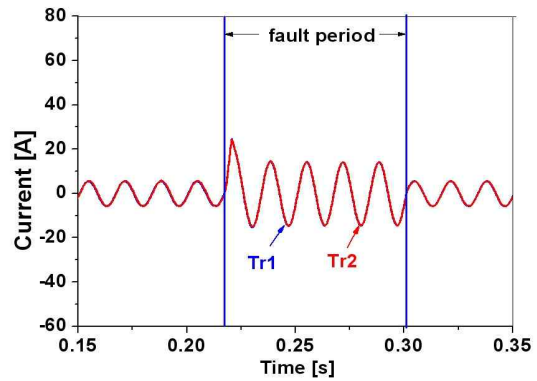


그림 3. 피더(Case 1)에 도입시 두 변압기 2차측 전류  
Fig. 3. Current waveform of secondary side of two transformers installed in a feeder(Case 1)

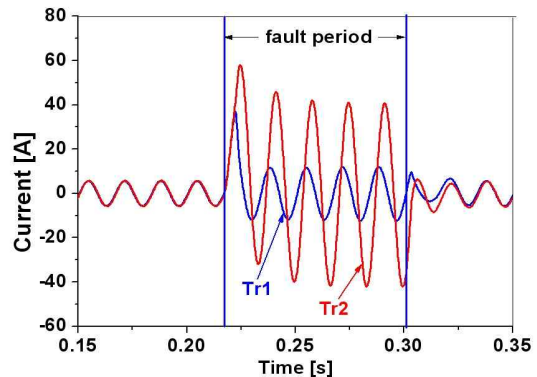


그림 4. Tr<sub>1</sub> 변압기 2차측에 도입시 (Case 2) 두 변압기 2차측 전류  
Fig. 4. Current waveform of secondary side of two transformers installed in a Tr<sub>1</sub> transformer (Case 2)

그림 4는 초전도한류기를 1번 변압기(Tr<sub>1</sub>) 2차측에 도입시(Case 2) 두 변압기(Tr<sub>1</sub>, Tr<sub>2</sub>)의 2차측 전류를 보여준다. 이 경우에 고장발생시 초전도한류기가 Tr<sub>1</sub> 2차측에 흐르는 전류만 제한해주기 때문에 더 많은 전류가 Tr<sub>2</sub>에 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 두 변압기 2차측에 흐르는 전류의 불 평형

이 발생하게 되며,  $Tr_2$ 가 더 많은 전력 부담을 가지게 되는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 초전도한류기를 모선에 도입시(Case 3) 두 변압기의 2차측 전류를 보여준다. 이 경우에는 초전도한류기가  $Tr_2$  2차측에 흐르는 전류만 제한해주기 때문에  $Tr_1$ 에는 더 많은 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 두 변압기 2차측에 흐르는 전류는  $Tr_1$ 에 많이 흐르게 되어  $Tr_1$  변압기의 부담이 커지는 것을 볼 수 있다.

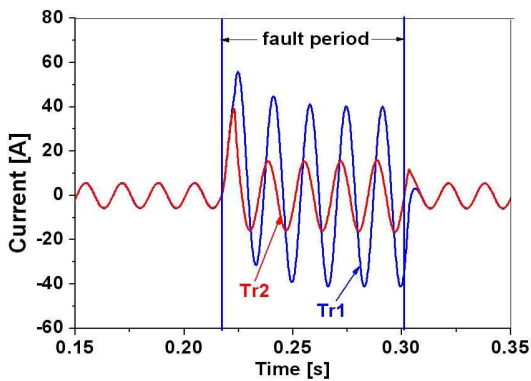


그림 5. 모선에 도입시 (Case 3) 두 변압기 2차측 전류  
Fig. 5. Current waveform of secondary side of two transformers installed in a bus line (Case 3)

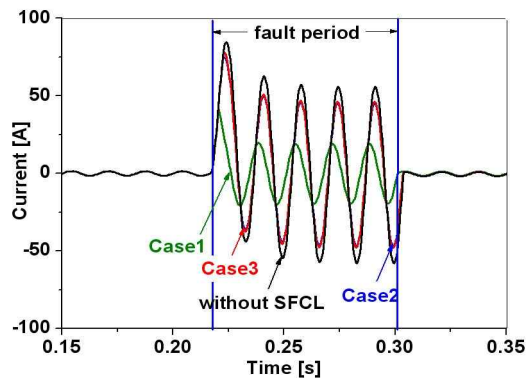


그림 6. 초전도한류기 설치위치에 따른 피더 1의 전류  
Fig. 6. Current waveforms of feeder 1 dependent on SFCL's installation location

그림 6은 초전도한류기를 피더 1, 변압기 2차측, 모선에 각각 설치했을 경우와 초전도한류기 미설치시에 피더 1의 전류를 나타낸다. 초전도한류기를 설

치하지 않을 경우 고장전류는 최대 85[A]까지 증가하였고, 초전도한류기를 피더 1에 설치한 경우에 고장전류 제한이 가장 크게 이루어진 것을 확인할 수 있다. 또한, 피더 1에 설치한 경우 전류위상이 다른 경우에 비해 앞서는 것을 확인할 수 있으며, 이는 고장이 발생한 피더 1의 선로 인덕턴스 성분이 피더 1에 초전도한류기를 설치할 경우에는 초전도한류기의 저항이 다른 경우에 비해 크게 발생한 것에 기인한 것으로 분석할 수 있다.

그림 7은 초전도한류기를 피더 1(Case 1),  $Tr_1$  변압기 2차측(Case 2)에 설치한 경우와 초전도한류기 미설치시 모선전압을 보여준다. 초전도한류기를 설치하지 않은 경우 모선의 전압강하 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 초전도한류기를 피더 1에 설치한 경우에는 모선전압강하를 보상해주는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 변압기 2차측에 초전도한류기를 설치한 경우에는 오히려 더 많은 전압강하가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 고장발생 후 변압기 2차측에 한류기 저항이 발생하더라도 고장전류의 분기회로가 형성되어 전압강하 보상효과가 없는 것으로 분석할 수 있다.

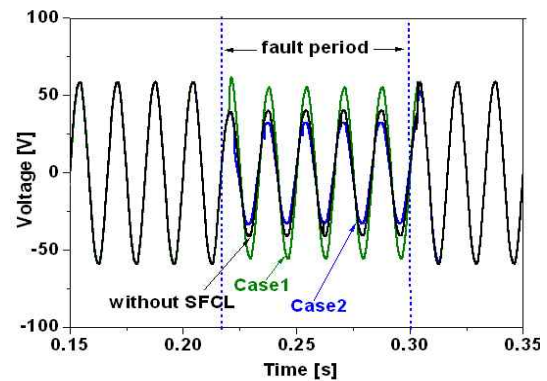


그림 7. 초전도한류기 설치위치에 따른 모선전압  
Fig. 7. Voltage waveform of bus line dependent on SFCL's installation location

그림 8은 초전도한류기를 모선에 설치했을 경우와 초전도한류기 미설치시 모선의 전압변화를 보여준다. 모선에 초전도한류기를 설치한 경우, 초전도한류기를 기점으로 고장이 발생한 피더와 가까운 곳의

모의배전계통에 초전도한류기의 도입위치에 따른 전류제한 특성

모선전압(bus\_PT1)과 먼 곳의 모선전압(bus\_PT2)을 비교하였다. 고장발생시 모선의 전압강하 보상효과가 초전도한류기에 의해 분리된 피더가 연결된 모선에서 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 모선에 초전도한류기를 설치할 경우에는 고장이 발생한 선로와 건전한 선로를 초전도한류기가 분리시켜주는 역할을 수행함을 분석할 수 있다.

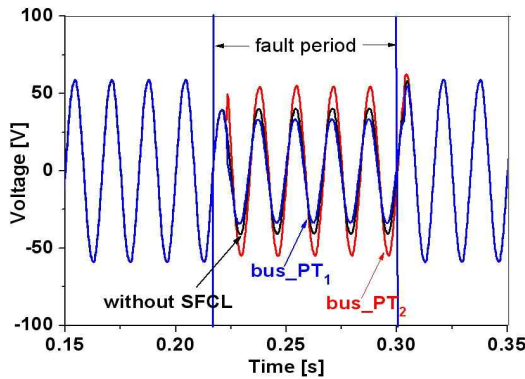


그림 8. 모선에 초전도한류기를 설치한 경우 모선 전압  
Fig. 8. Voltage waveform of bus line in case that SFCL was installed in a bus line

그림 9와 그림 10은 초전도한류기 설치위치에 따른 고장발생시 초전도소자의 저항과 전압을 보여 준다. 고장발생시 Case1의 경우 가장 큰 전류가 흐르기 때문에 가장 큰 저항이 발생하고 초전도소자에 걸리는 전압도 가장 크게 나타나는 것을 비교할 수 있다. 반면에, Case2와 Case3의 경우 한쪽 변압기의 전류만 제한해주기 때문에 Case1의 경우보다 더 적은 전류가 흘러 Case1보다 작은 저항이 발생하고 초전도 소자에 걸리는 전압도 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 고장이 제거될 경우 초전도소자의 회복은 Case1의 경우에 가장 큰 저항이 발생하기 때문에 초전도상태로 회복되는 시간이 다른 설치위치에 비해 가장 길게 나타나는 것을 분석할 수 있다.

앞에서 분석한 모의배전계통에 초전도한류기 설치위치에 따른 모의실험결과를 표 2에 간략히 정리하였다.

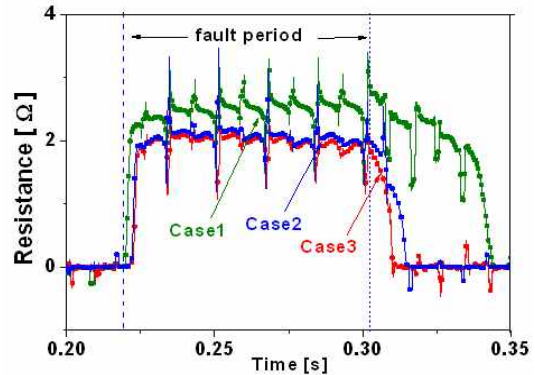


그림 9. 초전도한류기 설치위치에 따른 초전도 한류기 저항 곡선  
Fig. 9. Resistance curves of SFCL dependent on SFCL's installation location

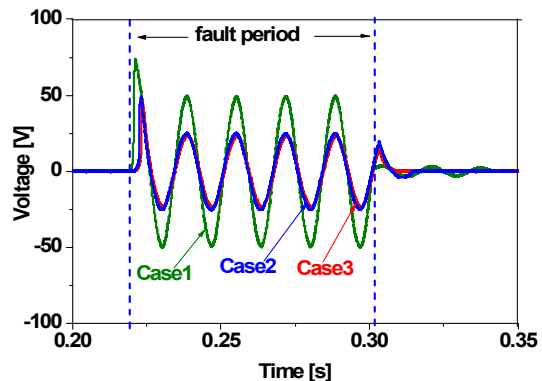


그림 10. 초전도한류기 설치위치에 따른 초전도 한류기 전압  
Fig. 10. Voltage waveform of SFCL dependent on SFCL's installation location

표 2. 모의실험 결과 정리

Table 2. Summary of experimental results

| 설치 위치  | 고장전류 제한효과 | 모선전압강하 보상효과 | 초전도소자 회복시간 | 두변압기 균형부담 |
|--------|-----------|-------------|------------|-----------|
| Case 1 | 우수        | 우수          | 미흡         | 우수        |
| Case 2 | 보통        | 미흡          | 우수         | 미흡        |
| Case 3 | 보통        | 보통          | 우수         | 미흡        |

### 3. 결 론

본 논문에서는 모의 배전계통에 초전도한류기 적용시 초전도한류기의 도입위치에 따른 전류제한 특

성을 분석하였다. 피더에 초전도 한류기를 적용한 경우 모선과 변압기 2차측에 적용한 경우보다 고장 전류 제한효과, 모선전압강하 보상효과가 우수한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 피더에 초전도 한류기를 도입한 경우 두 변압기의 2차측 전류의 차가 없어 변압기의 전력부담이 균일하게 되는 것을 확인할 수 있었다. 반면에, 피더에 초전도한류기를 도입할 경우 초전도한류기의 부담이 가장 큰 것을 확인할 수 있었고, 이로 인해 고장제거시 초전도한류기의 회복속도가 가장 느리게 나타나는 것을 모의실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한, 피더에 초전도한류기를 설치할 경우에는 모선에 설치할 경우에 비해 피더수가 증가할 경우 설치할 초전도한류기의 개수 증가로 인한 비용 상승을 고려해야 하며, 변압기 2차측에 설치할 경우에는 병렬 운전되는 변압기의 불균일한 전력 부담과 용량을 고려하여 선택할 필요가 있을 것으로 사료된다.

본 논문에서 수행한 초전도한류기의 도입위치에 따른 전류제한 특성에 대한 비교분석결과를 기초자료로 활용하여 향후 배전계통에 초전도한류기 적용시 도입위치에 따른 보호기기와 협조관계 분석과 초전도한류기의 회복특성 향상을 위한 다양한 초전도한류기 모델개발에 대한 연구 및 실험을 진행하고자 한다.

**감사의 글**

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2008-38) 주관으로 수행된 과제입니다.

**References**

(1) 김준환, 이강완, "전력계통 고장전류 증대와 대응방안," 전기저널, pp. 19-31, 1998.  
 (2) 조승식, "최신 배전시스템 공학", 북스힐, pp. 396-469, 2006.  
 (3) 김진석, "배전변전소에 대용량 변압기 설치시 초전도 전류제한기 적용방안 연구," 송실대학교 일반대학원, 2009.  
 (4) B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, 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.

(5) T. Hara, T. Okuma, T. Yamamoto, D. Ito K. Tasaki, and K. Tsurunaga, "Development of a new 66kV/1500A class superconducting fault current limiter for electric power system," IEEE Trans Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 182-192, Jan. 1993.  
 (6) 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. Superconduct., Vol. 9, No. 2, pp. June 1999.  
 (7) S. H. Lim, "Operational Characteristics of Flux-Lock Type SFCL With Series Connection of Two Coils," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, pp. 1895-1898, June 2007.  
 (8) S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "Fault Current Limiting Characteristics due to Winding Direction between Coil 1 and Coil 2 in a flux-lock type SFCL," Phys. C, Vol. 416, pp. 34-42, Nov. 2004.

◇ **저자소개** ◇

**유일경 (柳一慶)**

1983년 2월 26일생. 2009년 송실대 전기공학부 졸업. 현재 송실대학교 대학원 전기공학과 석사과정.  
 E-mail : wangkami7@ssu.ac.kr

**김진석 (金辰碩)**

1983년 1월 26일생. 2007년 서울산업대 전기공학과 졸업. 2009년 송실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 ~ 현재 동대 대학원 전기공학과 박사과정.  
 E-mail : redwolf832@nate.com

**김명후 (金明厚)**

1982년 6월 5일생. 2009년 안양대 전기공학과 졸업. 현재 송실대학교 대학원 전기공학과 석사과정.  
 E-mail : kimmh@ssu.ac.kr

**김재철 (金載哲)**

1955년 7월 12일생. 1979년 송실대학교 공대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 송실대학교 전기공학부 교수.  
 E-mail : jckim@ssu.ac.kr

**임성훈 (林成勳)**

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 송실대학교 전기공학부 교수.  
 E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr