

# 초전도 안류기의 전력계통 적용을 위한 연구동향 및 보호협조

김진석 <송실대학교 대학원 전기공학과 박사과정>  
임성훈 · 김재철 <송실대 전기공학과 교수>

## 1 서 론

전력수요가 증가하면서 질적, 양적으로 향상된 고품질의 전력을 공급하기 위한 노력들이 진행되고 있지만, 각종 전력관련 설비들의 공간문제와 최근 들어 기후변화와 환경오염에 대한 높아진 관심은 전력산업의 운영과 기술개발에 커다란 부담이 되고 있다. 이와 같은 환경적인 변화는 초전도체가 갖는 영저항특성을 이용한 초전도 전력응용기술 개발에 또 다른 활력소가 되고 있다.

지금까지 개발된 대부분의 초전도 전력응용기기(케이블, 변압기, 회전기, 한류기 등)는 구리도체보다 단위면적당 전류밀도를 100배 이상으로 증가시킬 수 있는 초전도선이 주요한 구성요소이며 따라서, 기존의 상전도 전력기기에 비하여 저전력 손실과 단일 기기당 대용량화가 가능하기 때문에 설치공간을 최소화할 수 있다는 잇점이 있다. 또한, 상전도기기와 달리 냉각매체로서 오일이나 SF<sub>6</sub> 가스를 사용하지 않으므로 환경오염물질 발생도 없게 된다. 따라서, 친환경적이면서 용량증대를 위한 초전도전력응용기술 개발은 기존의 전력산업의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 큰 기대를 모으고 있다.

현재까지 개발된 초전도 전력응용기기중에서, 초전도한류기는 다른 초전도전력응용기기와 달리 초전도상태에서 상전도상태로 전이되면서 발생하는 저항을 이용하여 고장전류를 제한하는 초전도체가 갖는 고유의 특성을 응용한 초전도 전력응용기기이다. 최근에는, 전력계통의 복잡화와 대용량화, 다양한 분산전원도입 등에 의한 단락전류 증대로 전력계통에 설치된 기존 차단기의 차단용량초과가 발생되면서 이에 따른 교체문제를 해결하기 위한 대안 중 하나로 주목받아 왔다. 하지만, 초전도 전력응용기기 특성상, 초전도한류기 또한, 실계통에 적용하기 위해서는 초전도체 사용증가로 경제적인 부담을 피할 수 없었으나, 고속스위치 기술을 활용, 초전도체 사용을 최소화시켜 경제적인 부담을 대폭 감소시킬 수 있는 하이브리드형 초전도한류기가 순수 국내기술로 개발됨에 따라 초전도 전력응용기기중에서 가장 먼저 세계적인 경쟁력을 갖을 수 있게 되었으며, 이에 따라 국내의 실계통에 적용하기 위한 연구기획이 이루어져 이를 추진하기 위한 연구가 준비되고 있다.

본 특집에서는 현재 한전에서 진행하고 있는 초전도한류기개발 연구현황과 본 연구진이 수행한 배전계

통에 초전도 한류기적용에 따른 보호기기와 보호협조 방안에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 초전도 한류기의 특징 및 연구동향

### 2.1 초전도 한류기의 특징

초전도 한류기는 초전도상태에서 동작을 요하는 다른 초전도 전력응용기기와는 달리 초전도상태에서 상전도로 전이되는 초전도 고유의 켄치현상을 이용한 응용기기이다. 평상시 임계전류이하의 부하전류가 흐를 경우 영저항을 유지하다가, 전력계통에 단락이 발생하여 임계전류 이상의 고장전류가 흐르면 고장감지를 위한 별도장치의 도움없이 초전도체의 켄치발생에 의한 저항을 이용하여 신속하게 고장전류를 제한하게 된다. 또한, 켄치시 발생하는 초전도 한류기의 저항 크기에 따라 제한되는 고장전류의 크기 조절이 가능하며, 차단기를 비롯한 주변설비의 고장전류 저감에 따른 용량증대효과를 기대할 수 있으며, 용량이 초과된 차단기의 경우 교체비용을 절감할 수 있으며, 기존의 고장전류 저감방안이 갖는 평상시 손실발생이 없고 계통에 영향이 없는 잇점이 있으며, 환경오염물질을 발생시키지 않는 친환경 전력기이라 할 수 있다.

### 2.2 초전도한류기의 연구동향

기존에 개발된 초전도 한류기는 크게 저항형, 유도형, 정류형으로 분류할 수 있으며, 실계통적용을 위한 용량증대를 위해 다양한 형태의 한류기모델이 개발되어 왔다. 그 중에서도, 실계통에 적용하기에 구조가 간단하고 공간적인 잇점이 있는 저항형 초전도 한류기가 국내외적으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나, 실계통급의 고장전류를 제한하기 위해서는 수많은 초전도소자들의 직병렬연결에 따른 가격상승과, 켄치발생시 불균일한 전력부담을 해소하기 위한 방안

마련이 요구되고 있다.

국내에서는 2001년도에 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업으로 차세대 초전도 응용 기술 개발 사업단(Development of Advanced Power system by Applied Superconductivity Technologies, DAPAS)이 시작되면서 전력연구원과 LS산전이 공동으로 초전도 한류기개발을 추진하여 왔으며, 실계통급의 초전도한류기개발의 노력에 힘입어 고속스위치 기술을 활용한 하이브리드 초전도한류기(그림 1)가 순수한 국내기술로 개발하는 성과를 거두

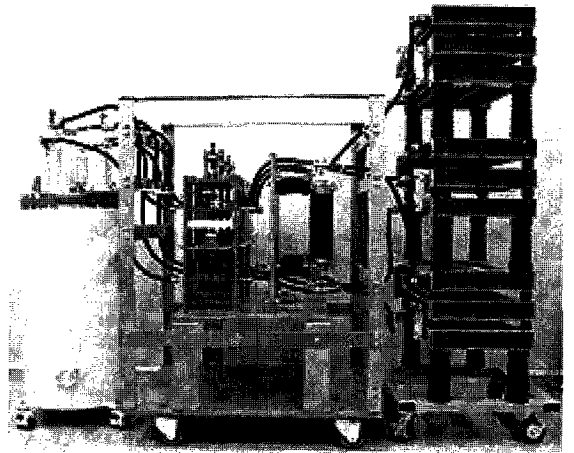


그림 1. 3상 22.9(kV)/630(A)급선로변경식 하이브리드 초전도한류기

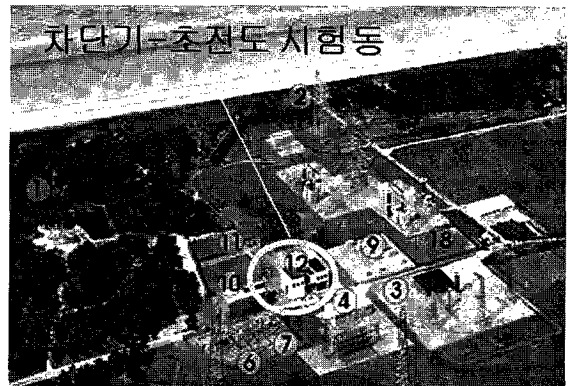


그림 2. 초전도한류기 고압실증시험장

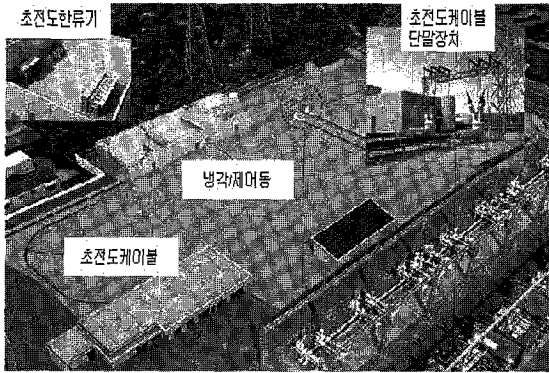


그림 3. 초전도기술시범사업장인 이천변전소

게 되었다. 이를 계기로, 초전도 전력응용기기 분야에 세계적인 기술경쟁력을 확보할 수 있게 되었으며, 초전도체 사용을 최소화시켜 비용부담을 대폭 감소시킬 수 있어 기존의 초전도 한류기보다 경제적인 것뿐 아니라, 고장이 제거되었을 경우 초전도한류기가 초전도 상태로 빠른 회복시간을 갖을 수 있게 되어 전력계통에 설치된 기존의 보호장치와의 재페로동작이 가능하게 되었다.

DAPAS사업으로 개발된 하이브리드 초전도한류기를 향후 실계통에 적용을 위하여 2010년 2월, 현재 고창전력시험장에 설치(그림 2)하여 기기점검과 모니터링 시스템을 구축하여 장기 모의 운전과 무인 운전 및 원격제어·감시를 평가하고 있다. 현재 시험되고 있는 시험용 복합형 초전도한류기는 3상 22.9 [kV], 630[A]로 대용량급 3상 22.9[kV], 3,150 [A]이 개발과정에 있다. 또한, 현재 개발된 하이브리드 초전도한류기의 실계통 운영 기술확보와 초전도한류기의 신뢰성검증을 위한 시범사업으로 경기도 이천변전소(그림 3) 초전도시범사업(GENI Project : Green Superconducting Electric Power Network at Icheon Substation) 착공식이 지난달에 이루어졌으며 KEPCO, LS전선(주), LS산전(주), 한국전기연구원등이 참여하여 2011년 말까지 진행될 예정이다.

### 3. 초전도 한류기 전력계통 적용시 영향

#### 3.1 초전도 한류기의 배전계통 적용위치 영향

초전도 한류기는 전력계통에 있어서 송전급과 배전급에 적용할 수 있지만, 전력계통에 연계되기 전에 초전도 한류기의 성능과 동작 특성 등 선행연구가 진행되어야 한다. 이러한 여건에 DAPAS사업이 현재 초전도 한류기의 개발과 전력계통에 적용하기 위한 실증시험을 수행하고 있다.

또한, 실증시험 과정에서 초전도 한류기가 실계통에 적용되었을 때 발생될 수 있는 전력계통 보호시스템의 문제점에 대하여 하이브리드 초전도 한류기 개발과 더불어 연구가 진행되고 있다.

기본적으로 배전계통에 초전도 한류기가 적용될 수 있는 예상지점으로는 그림 4에 나타난 것과 같이 변압기 고압측 또는 저압측, 각 피더의 인출점, 배전계통의 병렬 운전시 연결되는 모선 연결점이 있다.

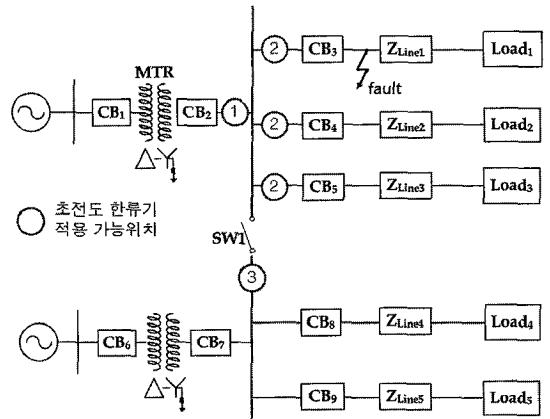


그림 4. 배전계통에 초전도 한류기적용 가능한 위치의 구성도

그림 5부터 그림 7은 각 적용 위치에 따른 고장전류와 모선전압의 변화를 보여준다. 고장발생시 초전도 한류기는 모든 적용위치에 대하여 고장전류를 제

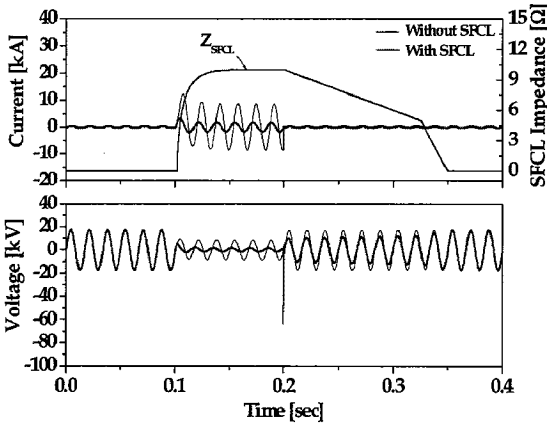


그림 5. 변압기 고압측 또는 저압측에 초전도 한류기 적용시 고장전류 및 모션전압

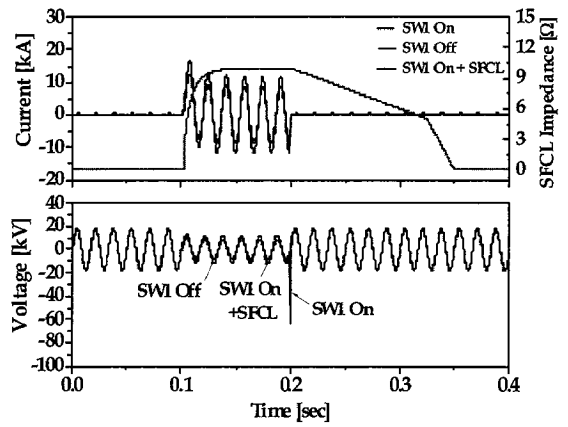


그림 7. 배전계통의 병렬운전시 연결되는 모선 연결점에 초전도 한류기 적용시 고장전류 및 모션전압

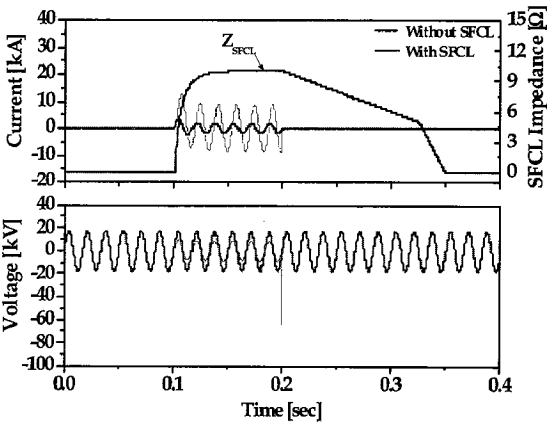


그림 6. 각 피더 인출점에 초전도 한류기 적용시 고장전류 및 모션전압

한하는 특징을 보이지만, 모션전압의 변화에서 각 피더 인출점에 초전도 한류기 적용시만 전압강하에 대한 전압 보상효과를 보이고 다른 두 적용위치에 대해서는 더 큰 전압강하가 발생하도록 영향을 미친다. 이를 정리하면 표 1과 같다.

### 3.2 초전도 한류기의 배전계통 적용시 보호협조 문제점

초전도 한류기를 전력계통에 적용하는 주목적은

표 4. 배전계통 적용위치별 초전도한류기 효과 비교

	변압기 고·저압측	각 피더 인출점	모선 병렬 연결점
고장전류 영향	고장전류 저감	고장전류 저감	고장전류 저감
모션전압 영향	개선효과 없음	개선효과 있음	개선효과 없음

큰 고장전류를 제한함과 동시에 기존의 보호기들과 협조를 이루도록 하는 것이다. 따라서 초전도 한류기의 역할에서 고장전류를 어느 크기까지 제한하는지에 따라서 문제가 발생할 수 있다. 초전도 한류기의 임피던스가 너무 작으면 고장전류 제한의 효과가 작고, 너무 크면 고장전류와 부하전류의 크기를 구분할 수 없는 문제가 발생할 수 있다. 또한, 배전계통의 계전요소 중 전류로 판단하는 기기들은 고장전류의 변화에 의하여 동작시간이 달라지며, 이 영향으로 보호기기 사이에 협조관계가 달라지는 문제가 발생할 수 있다. 이는 배전계통에 고장 발생시 보호동작을 정확히 수행하지 못해 정전범위가 넓어지는 문제를 야기할 수 있다.

그림 8은 배전계통에서 사용하는 대표적인 과전류

계전기의 초전도 한류기적용에 의한 동작변화를 보여 준다. 초전도 한류기 적용전에는 큰 고장전류에 의하여 순시동작을 하는 과전류 계전기가 초전도 한류기의 적용으로 인하여 제한된 고장전류로 동작형태가 순시동작에서 한시동작으로 변하는 동작변화를 그림 8 (a)에서 볼 수 있으며, 그림 8 (b)는 초전도 한류기의 적용 전·후 모두 한시동작의 범위지만 과전류 계전기의 동작시간이 초전도 한류기 적용 전보다 지연되어 불필요한 열적·전기적인 충격이 기기에 부담되는 문제점이 발생하게 된다. 따라서, 초전도 한류기의 배전계통 적용시 배전계통의 구성이나 보호기기의 특징에 따라 협조가 이루어지도록 적절한 초전도한류기 임피던스를 분석한 후 적용하여야 한다.

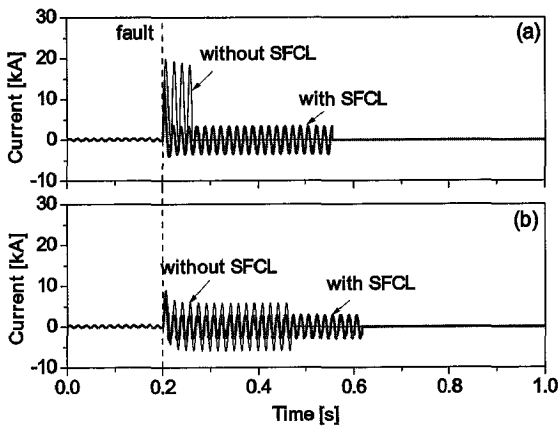


그림 8. 초전도 한류기 적용 전·후 고장전류 분석  
(a) 순시특성 (b) 한시특성

### 3.3 초전도 한류기의 배전계통 적용시 보호협조 해결방안

앞 절에서 설명한 배전계통에 초전도 한류기를 적용하여 기존 보호기기와 협조를 이루게 할 수 있는 방안으로 초전도 한류기를 적용하였을 경우, 고장발생시 나타나는 초전도 한류기의 임피던스가 제한하는 고장전류에 맞추어 기존 보호기기를 재조정하는 방안이 있으나, 이는 많은 보호기기들에 대해 점검해야

하는 비효율적인 방법이다. 다른 방안으로는 초전도 한류기를 적용하였을 경우 기존 보호기기들의 협조동작이 무너지지 않도록 초전도 한류기의 임피던스 크기를 제한하는 것으로 고장전류를 제한하면서 보호기기들이 협조동작을 수행하도록하는 보다 효율적인 방안이다.

배전계통에서 대표적으로 사용하는 계전기는 과전류계전기로 정정지침에 따라 설정되어 설치된다. 따라서, 초전도 한류기를 적용할 때 과전류계전기가 정정지침에서 벗어나지 않도록 임피던스의 크기를 제한하면 기존 보호기기들의 협조동작을 유지할 수 있다. 그림 4의 배전계통 구성도에서 임피던스 분석을 통하여 초전도 한류기의 적용으로 순시동작이 한시동작으로 동작영역이 변하는 임피던스의 크기가 0.95(Ω)인 결과를 얻었다. 이를 확인하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하였고, 그림 9는 과전류계전기의 순시동작이 초전도 한류기의 임피던스 변화에 따라 동작형태가 변경된 결과를 보여준다.

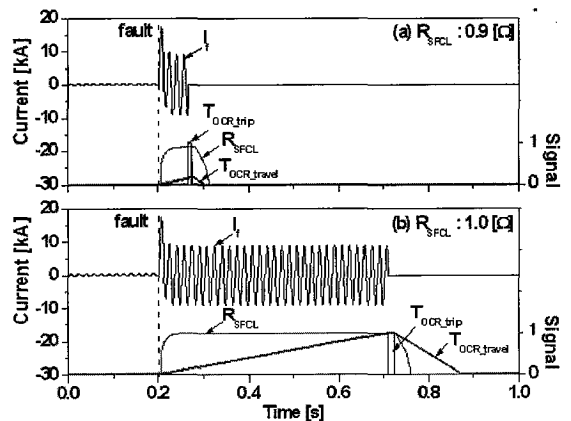


그림 9. 초전도한류기 임피던스에 따른 과전류계전기의 순시동작 특성분석

그림 10은 그림 9의 과전류계전기와 같은 위치에 대하여 순시동작의 협조를 위한 한시동작 특성을 분석한 결과를 보여준다. 한시동작은 정정지침에 따라

변전소 인출점 3상 단락고장에 0.5[s] 이내에 동작하여야 한다. 이 정정지침에 따른 동작을 만족하기 위한 초전도 한류기의 임피던스는 1.02(Ω)임을 분석결과 얻을 수 있었으며, 그림 10에 결과를 나타내었다.

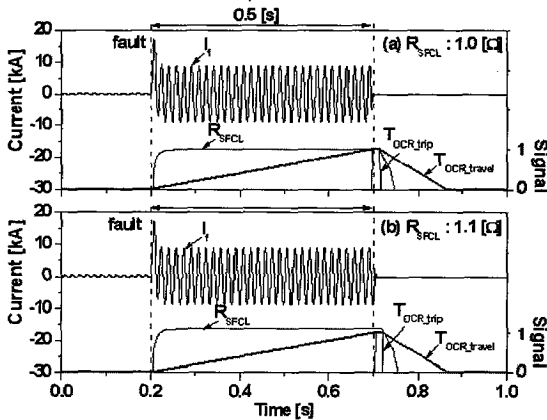


그림 10. 초전도 한류기 임피던스에 따른 과전류계전기의 한시동작 특성분석

위 분석 결과를 통하여 사례분석에 이용한 배전계통의 경우 초전도 한류기 적용시 두 동작영역을 만족하기 위해서는 0.9(Ω) 이하로 선정하여야 하며, 이 임피던스의 크기는 초전도 한류기의 적용 위치 및 배전계통의 임피던스 구성에 따라 달라지므로 각 구성 사례에 맞게 재분석을 통한 적용이 이루어져야 할 것이다.

#### 4. 기대효과 및 활용방안

전력계통의 확장으로 증가되는 고장전류에 대한 해결방안으로 초전도 한류기의 적용이 연구되고 있다. 초전도 한류기는 정상상태 운영에서는 영저항으로 손실없이 운전이 가능하고 고장발생시 임피던스의 발생으로 고장전류를 제한함으로써 증가된 고장전류의 영향으로부터 전력계통에 연결된 각종 전력설비들의 부담을 감소시킬 수 있게 된다. 뿐만 아니

라, 정전의 광역화 방지 및 안정성을 유지하여 전력공급의 신뢰도를 증대시키고 용량초과가 우려되는 차단기의 막대한 교체비용을 절감할 수 있는 특징을 갖는다.

국가적인 사업으로 연구개발된 선로변경식 하이브리드 초전도 한류기는 다른 종류의 초전도 한류기보다 국제적으로 경제적·기술적으로 우위를 가지고 있으며, 상용화에 앞서 장기 운전실험을 추진중에 있다.

이러한 초전도 한류기는 향후 전력수용지역에 연관된 변전소나 대용량 전력계통의 안정성을 위한 고장전류 제한기로 활용할 수 있을 것이며, 기존 차단기에 고속 고장전류 감지기술 및 고속 조작기술을 접목할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 5. 결 론

대규모로 성장하는 전력계통의 보호를 위한 대안으로 초전도 한류기의 개발이 진행되고 있는 상황에서 국제적인 경쟁력을 가진 선로변경식 하이브리드 초전도 한류기가 국내기술로 개발됨에 따라, 초전도체 사용을 최소화하고 전력계통 사용자가 요구하는 재폐로 동작을 만족할 수 있게 되었으며, 경제성과 기술력을 확보할 수 있게 되었다.

실증 시험을 통한 성능 평가를 거쳐 장기 운전의 안정성과 신뢰성을 확보하는 동시에 초전도 한류기의 전력계통적용시 기존 보호기기들과 보호협조를 유지할 수 있는 방안에 대하여 다양한 계통구성과 보호기기에 대한 연구가 보다 활발히 진행될 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 김준환, 이강원, "전력계통 고장전류 증대대응 방안", 전기저널, pp.19-31, April 1998.
- [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. Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 182-192, Jan. 1993.
- (3) Sung-Hun Lim, and Jae-Chul Kim, "Quench and Recovery Characteristics of Series-Connected Resistive Type SFCLs with Magnetically Coupled Shunt-Reactors", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol. 18, no. 2, pp. 729-732, June 2008.
- (4) Ok-Bae Hyun, Kwon-Bae Park, Jungwook Sim, Hye-Rim Kim, Seong-Woo Yim, and Il-Sung Oh, "Introduction of a Hybrid SFCL in KEPCO Grid and Local Points at Issues", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp. 1946-1949, June 2009.
- (5) Gyeong-Ho Lee, Kwon-Bae Park, Jungwook Sim, Young-Ceun Kim, Il-Sung Oh, Ok-Bae Hyun and Bang-Wook Lee, "Hybrid Superconducting Fault Current Limiter of the First Half Cycle Non-Limiting Type", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp.1888-1891, June 2009.
- (6) Sung-Hun Lim, Jin-Seok Kim, Jong-Fil Moon, Jae-Chul Kim, Sang-Bong Rhee, Chul-Hwan Kim, and Ok-Bae Hyun, "Quench and Recovery Characteristics of a SFCL Applied Into Neutral Line of a Three-Phase Power System", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp.1835-1838, June 2009.
- (7) 안재민, 김진석, 문종필, 임성훈, 김재철, 김철환, 현옥배, "배전계통에 초전도전류제한기 적용시 보호협조 분석", 대한전기학회논문지, 57권, 5호, pp.755-760, 2008
- (8) 김진석, 김명후, 유일경, 문종필, 임성훈, 김재철, 안재민, "배전변전소에 대용량변압기로 교체 적용시 보호협조를 위한 초전도 전류제한기의 임피던스 분석", 대한전기학회논문지, 58권, 8호, pp.1479-1484, 2009.
- (9) 유일경, 김진석, 김명후, 김재철, 임성훈, "모의배전계통에 초전도한류기의 도입위치에 따른 전류제한 특성", 한국조명전기설비학회 논문지, 23권, 12호, pp.90-95, 2009.

◇ 저자 소개 ◇



**김진석(金辰碩)**

1983년 1월 26일생. 2007년 서울 산업대 전기공학과 졸업. 2009년 송실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 ~현재 동대 대학원 전기공학과 박사과정.



**임성훈(林成勳)**

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대 전기공학과 졸업. 2003년 동대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2006년~현재 송실대 전기공학과 교수, 본 학회 편수위원.



**김재철(金載哲)**

1955년 7월 22일생. 1979년 송실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년 ~현재 송실대 전기공학과 교수, 본 학회 감사.