

## 국내계통 보호시스템을 고려한 22.9kV 초전도케이블/한류기 설계사양 제안

### Specifications of 22.9kV HTS cables and FCLs considering protection systems in Korean power distribution system

이승렬<sup>1\*</sup>, 박종영<sup>2</sup>, 윤재영<sup>3</sup>, 이병준<sup>4</sup>, 양병모<sup>5</sup>

Seung Ryul Lee<sup>1\*</sup>, Jong-young Park<sup>2</sup>, Jae-young Yoon<sup>3</sup>, Byongjun Lee<sup>4</sup>, Byeong-mo Yang<sup>5</sup>

**Abstract:** In Korea, 22.9kV 50MVA HTS (High Temperature Superconducting) cables and 630A/3kA hybrid SFCLs(Superconducting Fault Current Limiters) have been or are being developed by LS Cable, LS Industrial System, and Korea Electric Power Research Institute. They will be installed at Icheon 154kV Substation for real-power-distribution-system operation in 2010. This paper proposes specification of current limiting resistor/reactor for the SFCL and fault current condition of the HTS cable for applying the superconducting devices to Korean power distribution system, from the viewpoint of power system protection.

**Key Words:** SFCL, HTS cable, CLR, fault current condition, power distribution system.

### 1. 서 론

초전도케이블과 초전도한류기는 부하집중에 따른 전력공급의 대응량화와 고장용량 문제를 해결할 수 있는 대안 중 하나로서 주목받고 있다. 전 세계적으로 송배전용 초전도케이블 및 초전도한류기 개발연구가 활발히 진행되고 있다[1-5]. 국내에서도 DAPAS 사업을 통해서 22.9kV급 초전도케이블은 LS전선과 한국전기연구원, 22.9kV급 초전도한류기는 LS산전과 전력연구원이 주가 되어서 Prototype을 개발하여 고창전력시험센터에서 실증시험 중에 있다[6-10]. 현재는 한국전력공사의 협력 하에 2010년 하반기부터 154kV 이천변전소에 투입하여 실계통 부하를 대상으로 한 시범운용을 계획하고 있다[11,12]. 초전도 전력기기의 실계통 적용을 위해서는 계통관점에서의 설계사양 검토가 매우 중요하다. 특히, 초전도한류기의 한류저항에 의한 고장전류 저감을 및 초전도한류기/케이블의 단락 강도는 전력계통의 보호협조와 직결되는 문제로

서 반드시 실계통을 대상으로한 상세검토가 필요하다.

본 연구에서는 이천변전소 실계통을 대상으로 하여, 보호협조 측면에서 요구되는 22.9kV/50MVA급 초전도케이블의 단락강도와 22.9kV 630A/3kA급 복합형 초전도한류기의 한류저항 종류별 임피던스 크기의 설계사양을 제안하고자 한다.

### 2. 22.9kV 복합형 초전도한류기

#### 2.1. 검토개요

Fig.1은 이천변전소 내의 복합형 초전도한류기 적용장소를 나타낸 것이다. 2010년 하반기에 630A급 한류기를 피더(B 지점)에 설치할 예정이며, 2011년 하반기에는 3kA급 한류기를 주변압기 2차측 모선(A 지점)에 적용할 예정이다. 본 장에서는 상기 두 가지 사례에 대해서 이천변전소 실계통 데이터를 기반으로 하여 계통검토를 수행하였다. 본 검토에서 고려사항은 아래와 같다.

- 초전도한류기 피더 적용시 NGR 동시적용
  - 630A급 초전도한류기를 특정 피더 1회선에 적용하는 경우는 현재 변압기 2차 측에 설치되어 있는 NGR(Neutral Ground reactor)을 생략할 수 없으며, 한류기와 함께 적용해야 한다.
  - 이는 특정 1개 피더에만 초전도한류기를 설치하고 NGR을 생략한다면, 한류기가 설치되지 않은 선로에서 고장이 발생하는 경우에는 고장전류를 제한하지 못하기 때문이다.
- 초전도한류기 변압기 2차측 적용시 NGR 생략
  - 3kA급 초전도한류기를 변압기 2차 측에 적용하는 경우는, 초전도한류기가 NGR의 역할을 대신할 수 있으므로, NGR을 생략하고 한류기만 단독으로 적용할 수 있다.
  - 따라서, 본 연구에서는 한류기를 피더에 적용하는 경우는 반드시 NGR을 함께 적용하고, 변압기 2차 측에 적용하는 경우는 NGR을 생략하는 것을 기본으로 하여 검토하였다.

<sup>1</sup>정 회원 : 한국전기연구원 선임연구원  
<sup>2</sup>정 회원 : 한국전기연구원 선임연구원  
<sup>3</sup>정 회원 : 한국전기연구원 책임연구원  
<sup>4</sup>비 회원 : 고려대학교 전기공학과 교수  
<sup>5</sup>정 회원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원  
 \*교신저자 : srlee@keri.re.kr  
 원고접수 : 2009년 08월 10일  
 심사완료 : 2009년 08월 25일  
 게재확정 : 2009년 08월 25일

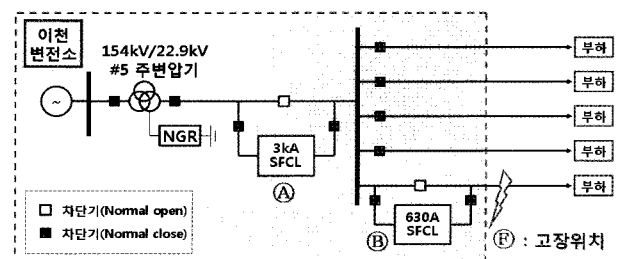


Fig. 1. Installation location of SFCL in Icheon substation.

본 연구에서는 이천변전소를 대상으로 상기 2가지 사례에 대하여 NGR 적용여부 및 한류저항 종류(저항형, 리액터형)에 따른 3상단락 및 1선지락 고장전류를 확인하였다. 여기서, 고장위치는 최대 고장전류가 발생할 수 있는 위치로서, 한류기 적용대상 피더의 인출단(Fig. 1의 ㉔지점)으로 가정하였다.

2.2. 한류저항 선정기준

한류저항 사양을 결정하는 기준은 기기개발 측면에서의 고려사항과 계통조건에 따른 고장전류 크기에 의해 달라질 수 있다. 본 사례는 한류저항 값을 결정하는 기본 기준을 아래와 같이 가정하였다.

- 기기개발 측면 부피, 경제성 관점
  - 한류저항 1Ω 이상 → 저항형 유리
  - 한류저항 1Ω 이하 → 리액터형 유리
- 한류기 적용 전 대비 고장제한 효과 : 15% 이상
- 한류저항에 의해 제한된 고장전류 > 5.5kA
  - 고장전류가 너무 작은 값으로 제한되면 배전선로 전위보호기기와의 보호협조에 어려움이 있다. 참고로 국외 사례를 보면 초전도한류기를 적용함으로써, 고장전류를 약 20~50%정도 감소시키는 수준의 한류저항을 채택하고 있다.
  - 본 연구에서는, 3상단락고장전류 기준으로 약 30%, NGR 적용시 1선지락고장전류 기준 약 20%, NGR 미적용 1선지락고장전류 기준 약 45%를 저감시킨 5.5kA 수준을 최소 고장전류 기준으로 가정하였다. 본 기준은 계통조건 등에 따라서 변동의 여지는 존재한다.

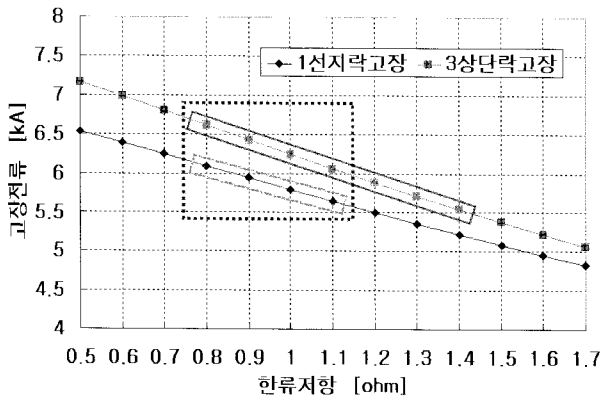
- NGR 미적용시 1선지락고장전류 < 7.1kA (초전도한류기 미적용 및 NGR 적용시의 1선지락전류)
  - NGR을 생략하고 초전도한류기를 적용하는 경우에는, 초전도한류기의 고장전류 제한효과가 최소한 NGR의 효과보다는 커야 한다.
  - 따라서, 본 연구에서는 초전도한류기를 적용하지 않고 NGR을 적용한 현재 계통의 1선지락 고장전류인 7.1kA 이하로 1선지락 고장전류를 제한하는 경우를 기준으로 하였다.

2.3. 초전도한류기 한류저항

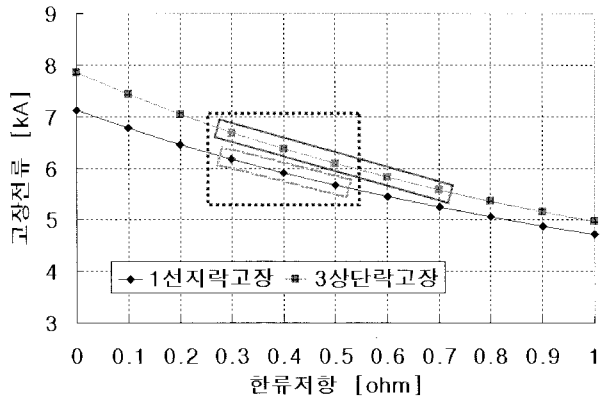
상기 검토 사례별로 고장해석 검토결과를 요약하면 Fig. 2와 같다. 검토결과에서 저항형 보다는 리액터형이 임피던스 크기 대비 효과 면에서는 유리한 측면이 있음을 알 수 있다. 본 검토결과를 기본으로 하여 2.2 절의 한류저항 선정기준에 따라서 각각의 사례별로 초전도한류기의 한류저항 크기를 선정하면 아래와 같다.

- 피더용 한류기 (NGR 현행대로 적용)
  - 저항형 한류저항 : 0.8Ω ~ 1.1Ω  
→ 기기개발 측면을 고려하면 1.0Ω ~ 1.1Ω
  - 리액터형 한류저항 : 0.3Ω ~ 0.5Ω
- 모선용(변압기 2차측 적용) 한류기 (NGR 미적용)
  - 저항형 한류저항 : 1.1Ω ~ 1.4Ω
  - 리액터형 한류저항 : 0.6Ω ~ 0.7Ω

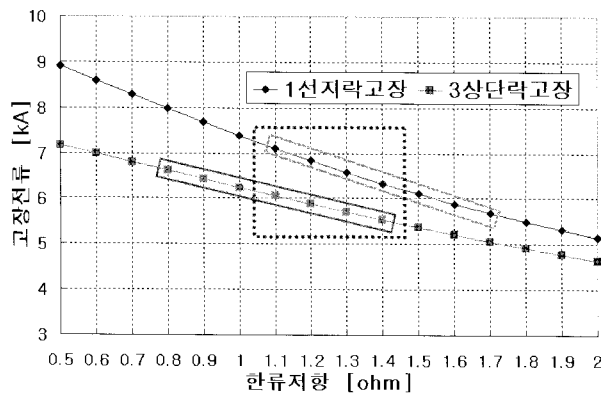
본 결과는 이천변전소에 한정된 검토결과이며, 계통조건에 따라서 상세 수치결과는 달라질 수 있으나, Fig. 2의 결과에서 크게 벗어나지는 않을 것으로 판단된다.



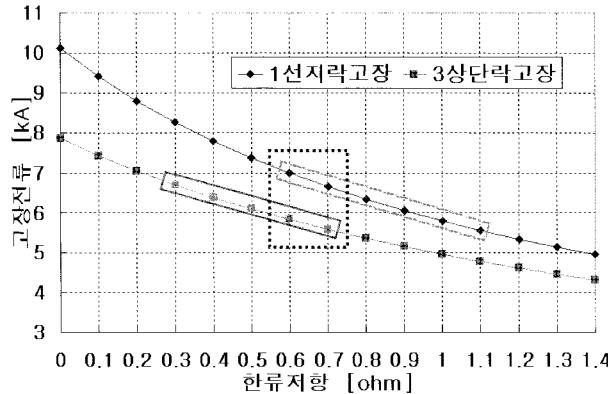
(a) 피더용 한류기 적용결과 (저항형, NGR 적용)



(b) 피더용 한류기 적용결과 (리액터형, NGR 적용)



(c) 모선용 한류기 적용결과 (저항형, NGR 미적용)



(d) 모선용 한류기 적용결과 (리액터형, NGR 미적용)

Fig. 2. Impedance of CLR (Fault location : ㉔ in Fig. 1).

### 3. 22.9kV 초전도케이블 단락강도

#### 3.1. 검토개요

Fig. 3은 이천변전소 내 50MVA 초전도케이블 적용 개념도를 나타낸 것이다. 2010년 하반기에 주변압기 2차측 모선(A지점)에 설치할 예정이다. 본 장에서는 이러한 초전도케이블의 단락강도 검토 필요성을 살펴보고 이에 대한 상세 검토를 수행하였다.

국내 배전계통에서 사용하고 있는 22.9kV 상전도케이블의 단락강도 시험은 수행하지 않고 있다. 이는 22.9kV 상전도케이블의 단락강도가 매우 높기 때문에 시험이 무의미하기 때문이다. 실제로 IEC-60949 규격에 근거하여 단락강도를 계산하면, 25.8kV 차단기의 정격차단전류인 25kA의 고장전류를 수 초간 통전시킬 수 있음을 알 수 있다. 반면에 초전도케이블의 경우 기기 특성상 단락시험의 필요성은 존재한다.

현재 이천변전소에 적용하기 위해서 개발 중인 22.9kV 50MVA급 초전도케이블은 25kA의 고장전류가 15 cycle동안 흐를 수 있도록 설계를 하고 있는데, 이는 계통관점에서 재검토의 필요성이 있다. 본 장에서는 계통관점에서 단락시험 규정전류 및 통전시간 등을 고려한 상세검토를 수행하였다.

#### 3.2. 단락시험 규정전류

고장전류의 통전능력은 단락시험과 관련이 있으므로 현재 배전계통의 전력기기별 단락시험 기준을 살펴보면 아래와 같다.

- 25.8kV 차단기 : 한전 표준규격 “ES-5925-0001 교류차단기”에 따르면, 25kA, 1초
- 154kV/22.9kV 변압기 : 한전 표준규격 “ES-5950-0010 변압기 단락강도 시험규격”에 따르면, 최대 단락전류, 0.25초 5회 + 0.5초 1회  
 \*) 한전 표준규격 “ES-5950-0010 변압기 단락강도 시험규격”에서는 단락시험을 0.25초 5회(대칭전류시험 3회 + 비대칭전류시험 2회), 0.5초 1회(대칭전류시험)으로 명시되어 있으나, “ES-6120-0001 154kV 전력용변압기”에서는 2초로 규정하고 있음. 실제로는 ES-5950-0010을 근거로 하여 시험을 시행하고 있음.

- 22.9kV 상전도케이블 : 단락강도 시험 없음.

상기 단락시험 기준에서 알 수 있듯이, 전력기기별로 단락시험 규정전류를 최대 단락전류 또는 25kA로 적용하고 있다. 현재 이천변전소(S/S)의 경우, 3상단락고장전류는 최대 8kA 정도이며, 1선지락고장전류는 NGR 적용시 7kA, NGR 미적용시 10kA에 달한다. 따라서, 상기 단락시험 기준은 국내 배전계통의 고장전류 수준이 최대 10kA 정도인 것을 감안할 때 합리적인 것으로 판단된다. 최대 초전도케이블의 단락시험 규정전류는 현 배전계통의 고장전류 크기 관점과 향후 미래 배전계통의 고장전류 크기에 기반을 둔 보수적인 관점에서 선정할 수 있다. 각 관점별로 규정전류를 선정하면 아래와 같다.

- 현 배전계통(이천S/S) 고장전류 관점 : 12.5kA  
 (= 현 배전계통 최대 고장전류 + 마진 25%)
- 보수적 관점 : 25kA (= 차단기의 정격차단전류 = 미래계통 고장전류 + 마진 25%)

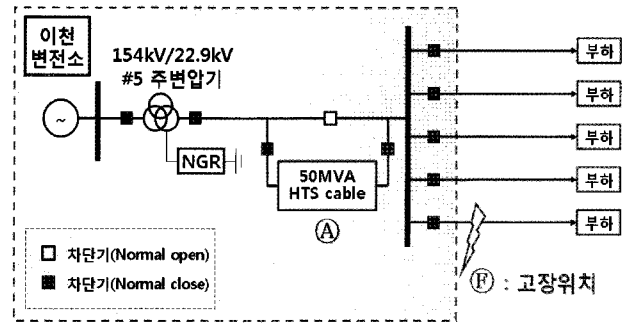


Fig. 3. Installation location of HTS cable in Icheon Substation.

현재 이천변전소 계통에서는 NGR을 고려하지 않는 경우, 고장전류가 최대 10kA 정도이고, 신재생에너지 도입에 따른 고장전류 증가분을 감안한다 하더라도 약간의 마진을 두고 12.5kA 기준으로 시험을 해도 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 그러나, 미래계통에서 100MVA 변압기를 도입하거나, 45/60MVA 변압기를 병렬운전하게 된다면, 고장전류가 최대 20kA를 상회할 가능성이 존재한다. 이러한 경우는 현재 차단기의 정격차단전류인 25kA를 기준으로 해야 한다.

#### 3.3. 단락전류 통전시간

배전선로의 고장전류 통전 관점에서 최악의 시나리오인, 배전선로의 보호기기(또는 차단설비)가 모두 부동작하고 154kV/22.9kV 주 변압기의 후비보호기기가 동작하는 것이다. 이 경우, 주 변압기의 후비보호기기인 과전류계전기 동작시간 70cycle, 차단기 차단시간 5cycle을 고려할 때, 고장전류는 최대 약 75 cycle 동안 흐를 수 있다. 75cycle은 계통관점에서 최소사양이므로 초전도케이블의 단락강도 시험시 단락전류 통전시간은 아래와 같이 약간의 마진을 두고 100cycle 이상으로 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

- 초전도케이블 단락전류 통전시간 = 100cycle  
 = 주변압기 후비보호기기 동작시간 70cycle  
 + 차단기 차단시간 5cycle + 마진 25cycle

#### 3.4. 초전도케이블 단락강도

현재 개발 중인 22.9kV 50MVA급 초전도케이블의 단락강도 설계사양은 25kA, 15cycle이다. 이를 에너지 관점에서 고장전류 크기별로 등가화하면, 아래의 식 (1)과 같다.

$$(I_{\text{fault}=25\text{kA}})^2 \times Z \times T_{\text{fault}=25\text{kA}} = I_{\text{fault}=X\text{kA}}^2 \times Z \times T_{\text{fault}=X\text{kA}} \quad (1)$$

$$T_{\text{fault}=X\text{kA}} = \left( \frac{I_{\text{fault}=25\text{kA}}}{I_{\text{fault}=X\text{kA}}} \right)^2 \times T_{\text{fault}=25\text{kA}} = \left( \frac{25\text{kA}}{I_{\text{fault}=X\text{kA}}} \right)^2 \times 15 \text{ Cycle}$$

아래 식(1)에서 Z는 초전도케이블의 임피던스,  $I_{\text{fault}=25\text{kA}}$ 는 25kA의 고장전류,  $T_{\text{fault}=25\text{kA}}$ 는 25kA 고장전류의 통전시간,  $I_{\text{fault}=X\text{kA}}$ 는 XkA의 고장전류,  $T_{\text{fault}=X\text{kA}}$ 는 XkA 고장전류의 통전시간을 의미한다.

식 (1)을 이용하여 고장전류 크기별 고장전류 통전시간을 계산하면 Table. 1과 같다. 현 이천변전소 계통의 최대 고장전류는 10kA를 약간 넘는 수준이다

(NGR 미적용 기준). Table 1에서 최악의 계통조건에서의 최대 고장전류를 11kA로 가정했을 때, 초전도케이블의 현재 설계사양을 11kA를 기준으로 환산하면 단락전류 통전시간이 약 77.5 cycle이 된다. 이는 3.3절의 고장전류 최소 통전조건인 75cycle을 약간 넘는 수준으로 마진이 거의 없는 사양이며, 결국 현재의 초전도케이블 단락강도 설계사양은 수정의 여지가 있다고 할 수 있다.

초전도케이블의 미래시장을 고려한다면, 50MVA급 초전도케이블은 궁극적으로는 45/60MVA 변압기보다는 100MVA급과 같은 대용량 변압기와 함께 적용될 가능성이 크다. 미래 배전계통에서 100MVA급의 대용량 변압기를 적용하거나, 45/60MVA 변압기를 병렬운전하는 경우에는, 고장전류가 약 20kA까지 증가할 수 있다. 결국, 현재 배전계통조건 뿐만 아니라 향후 계통변화까지 고려한다면 현재 설계사양은 적합하지 못함을 알 수 있다.

본 연구에서는 국내 배전계통 고장전류 수준과 보호협조시간을 고려하고 이에 일정수준의 마진을 감안해서, 22.9kV 초전도케이블의 설계사양을 아래와 같이 계통조건별로 구분해서 제안하고자 한다.

- 현 배전계통(45/60MVA 변압기 단독적용 계통, 예) 이천변전소 계통)  
: 12.5kA/100cycle(≒ 25kA/25cycle)
- 100MVA급 변압기 적용 계통 (또는 45/60MVA급 변압기 병행적용 계통) : 25kA/100cycle

Table 1.  $T_{Ifault=XkA}$  calculation.

$I_{Ifault=XkA}$ (kA)	$T_{Ifault=XkA}$ (cycle)	$T_{Ifault=XkA}$ (초)	비 고
7.0kA	191cycle	3.19 초	현 배전계통에서 NGR 적용시 1선지락 고장 전류 수준
7.5kA	167cycle	2.78 초	현 배전계통의 3상단락 고장전류 수준
8.0kA	146cycle	2.44 초	
10kA	93.8cycle	1.56 초	현 배전계통에서 NGR 생략시 1선지락 고장 전류 수준
11kA	77.5cycle	1.29 초	
12.5kA	60.0cycle	1 초	
15kA	41.7cycle	0.69 초	45/60MVA 주변압기 병렬운전시 3상단락 고장전류 수준
16kA	36.6cycle	0.61 초	100MVA/15% 주변압기 적용시 3상단락고장전류
20kA	23.4cycle	0.39 초	45/60MVA 주변압기 병렬운전 및 NGR 미적용시 1선지락 고장 전류 수준
21kA	21.3cycle	0.35 초	100MVA/15% 주변압기 적용 및 NGR 미적용시 1선지락 고장 전류 수준
25kA	15cycle	0.25 초	50MVA 초전도케이블 현재 설계사양

#### 4. 결 론

본 연구에서는 향후 이천변전소에 적용될 예정인 초전도케이블의 단락강도와 복합형 초전도한류기의 한류저항 설계사양을 고찰하였다. 제안된 설계사양은 계통조건 등의 요인에 의해서 다소 변동의 여지 있으나 변동 폭은 그리 크지 않을 것으로 예상된다. 이천변전소에 22.9kV급 초전도케이블과 초전도한류기를 적용하여 성공적으로 운전하기 위해서는, 기기개발자와 협의하여 계통측면에서의 고려사항을 반영한 초전도기기의 최적 설계사양을 결정하는 것이 매우 중요한 사항이다. 향후, 이천변전소 적용대상인 초전도케이블/한류기의 쉐치 임계전류 등 계통관점에서의 검토가 필요한 다양한 설계사양에 대해서 기기개발자와의 지속적인 연구협력을 통해서 보다 신뢰성 있는 설계사양을 제시할 계획이다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 전력산업연구개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. Yumura, Y. Ashibe, H. Itoh, M. Ohya, M. Watanabe, T. Masuda, and C. S. Weber, "Phase II of the Albany HTS Cable Project", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp. 1698-1701, June 2009.
- [2] James F. Maguire, Frank Schmidt, Shawn Bratt, Tom E. Welsh, and Jie Yuan, "Installation and Testing Results of Long Island Transmission Level HTS Cable", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.19, No.3, pp. 1692-1697, June 2009.
- [3] Songtao Wu, et al, "Recent Main Events in Applied Superconductivity in China", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp. 1-4, June 2009.
- [4] Ndeye K. Fall, et al, "Fault Current Limiter -R&D Status and Testing Issues", IEEE Power System Conference and Exposition, 2009.
- [5] M. Noe, M. Steurer, S. Eckroad, R. Adapa, "Progress on the R&D of Fault Current Limiters for Utility Applications", Power and Energy Society General Meeting, 2008.
- [6] Jeonwook Cho, et al. "Design and Experimental Results of a 3 Phase 30m HTS Power Cable", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, pp.1602-1605, June 2006.
- [7] B.W.Lee, B. W. Lee, J. Sim, K. B. Park, and I. S. Oh, "Practical application issues of superconducting fault current limiters for electric power systems", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, pp. 620-623, 2008.
- [8] B. W. Lee, K. B. Park, J. Sim, I. S. Oh, H. G.

Lee, H. R. Kim, and O. B. Hyun, "Design and experiments of novel hybrid type superconducting fault current limiters", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, pp. 624-627, 2008.

- [9] O.-B. Hyun, et al. "Introduction of a Hybrid SFCL in KEPCO Grid and Local Points at Issue", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp. 1946-1949, June 2009.
- [10] Gyeong-Ho Lee, Kwon-Bae Park, Jungwook Sim, Young-Geun 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.
- [11] 이승엽 외, "22.9kV 초저도케이블/초전도한류기 실계통 운영기술 개발", 대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술대회, 2009.
- [12] 양병모, 이승엽, 원영진, 김병현, 강지원, 윤재영, 이승렬, "초전도전력기기 실계통 적용관련 변전소 선정을 위한 기술적 검토", 대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술대회, 2009.

저 자 소 개



**이승렬(李昇烈)**  
1975년 9월 23일생, 1999년 고려대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동대학원 전기공학과 박사수료, 현재 한국전기연구원 전력시스템연구본부 Smart Grid 연구센터 선임연구원.



**박중영(朴鍾泳)**  
1976년 8월 16일생, 1999년 서울대학교 전기공학부 졸업, 2001년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사), 2007년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사), 현재 한국전기연구원 전력시스템연구본부 Smart Grid 연구센터 선임연구원.



**윤재영(尹在暎)**  
1962년 7월 30일생, 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1994년 기술사 (발송배전), 1998년 동 대학원 전기공학 과 졸업(공학박), 현재 한국전기연구원 전력시스템연구본부 Smart Grid 연구센터 책임연구원.



**이병준(李炳峻)**  
1961년 7월 16일 생, 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업, 1991년 미국 Iowa 주립대 졸업(석사), 1994년 미국 Iowa 주립대 졸업(공학박), 현재 고려대학교 전기공학과 교수.



**양병모(梁炳模)**  
1969년 4월 24일생, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1997년 한전 전력연구원 입사, 현재 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소 선임연구원.