

## 송전급 초전도케이블 신뢰성평가를 위한 시험방법

### Reliability Test Recommendations of Transmission Level HTS Power Cable

박진우<sup>1</sup>, 양병모<sup>2,\*</sup>, 강지원<sup>3</sup>, 조전욱<sup>4</sup>, 이수길<sup>5</sup>, 심기덕<sup>6</sup>, 김성래<sup>7</sup>

J. Park<sup>1</sup>, B. Yang<sup>2,\*</sup>, J. Kang<sup>3</sup>, J. Cho<sup>4</sup>, S. Lee<sup>5</sup>, K. Shim<sup>6</sup>, and S. Kim<sup>7</sup>

**Abstract:** For last 10 years, there are big progress and many efforts in the development of HTS power equipments by some country including South Korea. Especially HTS cable system is the strongest candidate among them from the viewpoint of applying to real grid, because of the feature of it, compact and large capacity. In South Korea, transmission level 154kV, the world top voltage class, HTS cable system was installed and has been tested in KEPCO Gochang Underground Cable Test Field since the early of 2010 in order to meet test requirements made by KEPCO, the only grid company in South Korea. The type test of it will be completed by October 2010 and subsequently long-term load cycle test will be performed during 6 months. Also in the near future, KEPCO has a plan to demonstrate transmission level HTS cable system in real grid, in order to meet practical requirements and confirm the feasibility of it. This paper says the test plan of transmission level 154kV HTS cable system and the way how to test it.

**Key Words:** HTS cable, Superconducting transmission, test.

#### 1. 서 론

기존 전력케이블에 비해 3배~5배 가량의 전력을 공급할 수 있는 초전도케이블은 도심지의 전력수요 증가에 부합할 수 있을 뿐 아니라 전력회사의 전력공급효율을 향상시켜 계통운영효율 및 신뢰성에 크게 기여할 수 있다. 지난 10여년간 여러 종류의 초전도케이블이 개발되어 왔고 그에 대한 실증시험이 이루어 졌다 [1-5]. 국내에서는 22.9kV/50MVA 3상 HTS케이블이 한국전력공사 고장전력시험센터 실증시험장에 설치되

어 성공적으로 시험이 이루어졌다. 배전급 HTS케이블의 성공적인 상용화에 대한 검증을 위해 2010년 까지 서울 인근의 한전 실 계통인 이천변전소에 설치로 세계 최고 전압인 154kV 송전급 HTS케이블 개발이 한국전기연구원(케이블 설계), LS전선(케이블 및 단말 제작), CVE(극저온 냉각 시스템 제작) 그리고 한국전력공사 전력연구원(시험 및 평가)의 협동으로 진행되고 있다[6-8]. 송전급 154kV HTS 케이블은 2010년 상반기 한전 고장전력시험센터 내 지중케이블실증시험장에 설치되어 세계최초로 송전급 초전도 케이블에 대한 규격(안)을 제안하고 제안된 시험규격에 따라서 송전급 초전도 케이블에 대한 신뢰성 시험평가가 진행되고 있다. 본 논문에서는 송전급 154kV HTS 케이블 시험방안 및 방법에 대해 설명하고자 한다. 또한 가까운 미래에 한국전력공사는 송전급 154kV HTS 케이블의 실계통 적용을 위한 시범선로를 구축하여 세계최고의 전압인 154kV 초전도케이블의 실계통 운영을 실시할 예정이다.

#### 2. 송전급 154kV HTS 케이블의 개발

정부 교육과학기술부의 초전도 프론티어사업 지원으로 한국전기연구원, 한국전력공사, LS전선, CVE의 협력과제로 개발된 송전급 154kV HTS 케이블 시스템은 다음과 같다.

##### 2.1. 154kV HTS 케이블의 설계(그림 1)

###### ■ 전기적 특성

- 정격전압 : 154kV
- 정격전류 : 3.75kA
- BIL : 750kV
- 고장전류 : 50kA, 1.7s

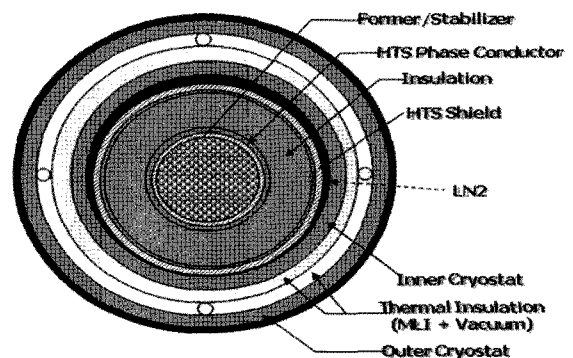


Fig. 1. Design of 154kV 1GVA HTS Cable.

<sup>1</sup>정 회 원 : 한전전력연구원 송배전연구소 연구원  
<sup>2</sup>정 회 원 : 한전전력연구원 송배전연구소 선임연구원  
<sup>3</sup>정 회 원 : 한전전력연구원 송배전연구소 책임연구원  
<sup>4</sup>정 회 원 : 한전전기연구원 책임연구원  
<sup>5</sup>정 회 원 : LS전선 수석연구원  
<sup>6</sup>정 회 원 : 한국전기연구원 선임연구원  
<sup>7</sup>정 회 원 : CVE(주) 부장

\*교신저자 : bmyang@kepri.re.kr  
 원고접수 : 2010년 08월 31일  
 심사완료 : 2010년 09월 09일  
 게재확정 : 2010년 09월 09일

2.2. 극저온 냉각 시스템(그림 2)

154kV 송전급 HTS케이블의 냉각 및 운전을 위해 2대의 스틸링 냉동기(650W@65K)를 설치하였으며 냉각 시스템 자체성능검증을 위해 모의 열부하 인가에 따른 운전제어 상태확인, 유량변화에 따른 운전제어 상태확인, 컨트롤 밸브 개도에 따른 압력 조절범위 산출, 온도별 냉각에 따른 운전조건 산출 등을 실시하였다.

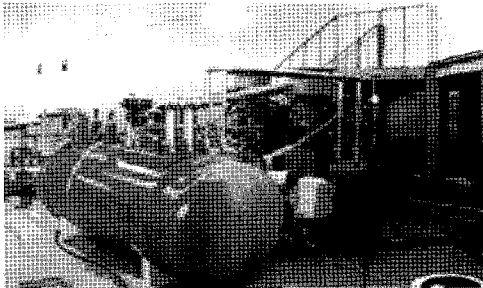


Fig. 2. Cryogenic Cooling System of 154kV 1GVA HTS Cable.

2.3. 가스절연 케이블 단말(그림 3)

154kV 송전급 HTS케이블은 초전도 케이블로서는 세계 최고 전압레벨인 관계로 임펄스 시험 및 상용주파전압 시험등을 포함한 엄격한 조건의 전기 절연 시험을 위한 케이블 단말에 대한 우려가 높았다. 때문에 LS전선에서는 임펄스 및 고전압 Test의 수차례 시행을 통해 단말에 대한 신뢰성을 확인하였다.

154kV HTS케이블 시스템의 성공적인 개발에 이어 Type Test와 장기 Load Cycle Test로 구성되는 154kV HTS케이블 시스템에 대한 시험이 한전 고창 전력시험센터 내 지중실증시험장에서 진행되고 있다. 이 시험장은 정부와 한전 그리고 LS, 대한, 일진 세 케이블 제조사들로부터 투자되어 2005년 3월 착공하여 2009년 말 준공되었으며 여러 종류의 시험기자재 구축, 시험시설을 갖추고 있고 현재 국제공인 시험기관이 되기 위한 노력을 하고 있다(9). Fig. 4와 Fig. 5에

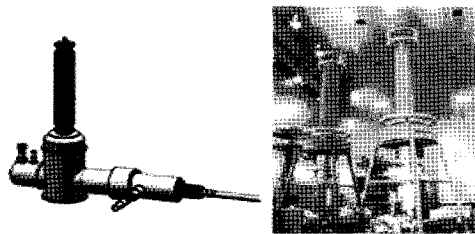


Fig. 3. Termination of 154kV 1GVA HTS Cable.

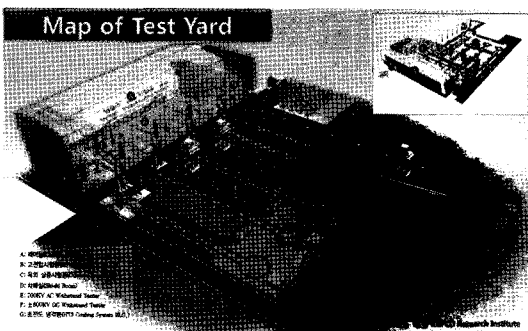


Fig. 4. Map of Gochang Underground Cable Test Field.

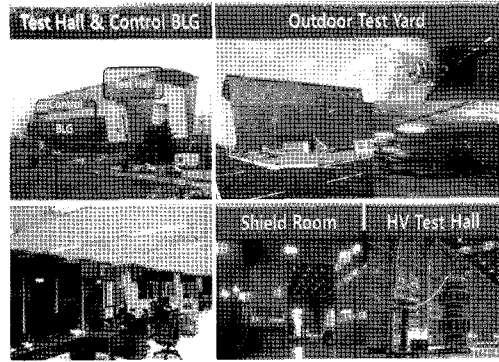


Fig. 5. Sections of KEPCO Gochang Underground Cable Test Field.

나타난 것처럼 이 시험장은 HTS케이블을 비롯한 모든 종류의 케이블 시험을 수행할 수 있다.

송전급 154kV HTS케이블에 대한 Type Test는 2010년 9월경 완료될 예정이며 장기 Load Cycle Test는 2011년에 완료될 계획 이다.

3. 송전급 154kV HTS케이블 시험방안

케이블, 단말, 극저온 냉각시스템으로 구성된 송전급 HTS케이블에 대한 시험은 케이블 시스템, HTS 선재, 극저온 냉각시스템 제작자들의 협력 하에 한전 전력연구원에서 두가지 시험을 시행하게 된다.

먼저 Type Test는 케이블 설계가 규격을 만족하는지 확인하기 위해 수행된다. 이 시험은 보통 현장에 설치된 제품 또는 완성된 시스템에 대한 시험이 아니라 시험장에서 시제품의 일부분 또는 대표적인 구간에 대한, 예를 들면 짧은 길이의 케이블 또는 시험용 단말을 이용해서 수행된다. 일반적으로 이 시험은 생산된 제품이 사용될 조건보다 훨씬 더 엄격한 조건에서 이루어지며 설계 조건이 규격을 만족하는지 검증하기 위함이며 생산된 모든 제품에 대해서 수행되는 것은 아니다. 일반적으로 Type Test는 IEC 60840에 의한 규격을 따르게 되어 있다. 하지만 HTS케이블에 대한 Type Test는 HTS 극저온 장치 및 그 외 다른 장치들을 위한 추가적인 시험을 필요로 한다.

Type Test와는 달리 장기 Load Cycle Test는 기술적, 경제적 타당성을 평가하고 HTS 전력케이블 시스템의 사용자로서 운전 경험을 축적하기 위해 시행된다. 송전급 HTS케이블 시스템에 수행될 주요 시험은 열 부하 시험, 열 주기 시험(6회), v-t 곡선을 고려한 높은 전압에서의 장기 부하 시험(6개월~1년), 임펄스 시험 그리고 상용주파 내전압 시험(BIL 750kVp) 등이 다.

<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Test : 154kV HTS Cable Type Test (30m)</li> <li>&gt; Test period : 2010. 7 - 2011. 9(3 month)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermal Cycle : 1 time</li> </ul> </li> <li>&gt; Place : Gochang Power Testing Field</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Test : 154kV HTS Cable PQ Test (100m)</li> <li>&gt; Test period : 2010. 11 - 2010. 05 (6 month)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermal Cycle : 6 times</li> </ul> </li> <li>&gt; Place : Gochang Power Testing Field</li> </ul>

Fig. 6. Test Plan of 154kV HTS Cable system.

Table 1. Summary of tests recommended.

시험항목	Type Test	Long-term load cycle Test	Source of Requirements
굽힘 시험	○	○	IEC 60840
압력 시험	○	○	Experience
진공 시험	○	○	Experience
냉각 시험	○	○	Experience
열부하 시험	○	○	Experience
초기 유전체 시험	○	○	Experience
임계 전류 시험	○	○	Experience
유전정접 측정	○	○	IEC 60840
부하주기시험	○	○	IEC 60840
부분방전시험	○	○	IEC 60840
임펄스 및 상용주파 내전압 시험	○	○	IEC 60840

3.1. 굽힘 시험

이 시험방법은 IEC 60840(항목 12.3.3.)에 잘 나타나 있다[10]. 이 시험은 케이블 운송, 포설시 작용할 수 있는 영향에 대해 샘플시험을 통해 안전성 및 구조 적합성을 확인하기 위한 시험으로 전기적인 시험에 앞서 정해진 곡률 반경에서 수 차례 양 방향으로 감기와 풀기, 케이블 회전을 하도록 되어 있다.

3.2. 내압 시험

초전도 케이블 시스템은 압력을 받게 되는 파이프 또는 압력 용기를 포함하게 되므로 초전도 케이블 및 부속품에 가압되는 배관 및 용기에 대한 안정성을 확인하기 위해 시행된다. 국부적인 파이프/압력 용기의 내압력 그리고 압력과 관련된 규격등에 대한 시험이 시행된다[11].

3.3. 누설 및 진공 시험

액체 질소를 이용한 냉각을 시작하기 전 케이블 시스템이 상온에 있을 때, 초전도케이블 시스템의 진공 배관의 누설여부 확인 및 기준 진공도를 확립하기 위한 시험이 필요하며 진공 펌프 장치와 연결된 모든 밸브를 잠그고 진공도를 측정하게 된다. 이 시험은 진공 펌프를 이용하여 추기 되었을 때 시스템이 거의 일정한 누기 상태에 도달하는 시점을 알기위해, 그리고 기본적인 누기율을 파악하기 위해 주기적으로 반복 수행 된다.

3.4. 냉각 시험

이 시험은 냉각시스템과 관련하여 상세하게 정의된 시험이다. 이 시험은 케이블과는 무관하게 수행되는 냉각용량 시험으로써 이 시험의 목적은 향후 진행될 시험으로부터 취득된 데이터를 분석하는데 도움이 되도록 기본적인 성능을 평가하고 향후 시험에 앞서 냉각기의 용량을 증명하여 냉각기의 성능을 확립하는데 있다. 또한 이 시험을 통해 측정된 값과 히터의 입력 전력을 비교함으로써 용량과 온도 측정값을 교정할 수도 있다.

3.5. 기준 열 부하 시험

전기적인 시험을 시작하기 전 열량측정법을 이용하여 전체 시스템에 대한 기준 열 부하를 측정해야 한다.

다. 케이블을 통한 유량과 입출구 온도를 측정하고 이로부터 열 부하가 계산된다. 가능하다면 이 시험은 각기 다른 때 각기 다른 값의 상온에서 수행되어야 한다. 이 시험의 목적은 케이블 및 단말이 가압되기 전 준비 상태에서 극저온 열 부하의 기준을 확립하기 위함이다.

3.6. 초기 유전체 시험

시스템 냉각 후(선택적으로 상온에서도 가능) 전기적 시험을 시작하기 전 절연저항을 측정하는 것이 필요하며 간단히 Mega-Ohm meter를 이용하여 각 상과 접지와의 절연저항을 측정함으로써 시험된다. 이 시험의 목적은 복잡하고 케이블에 스트레스를 줄 수 있는 시험을 시작하기 전 케이블 유전체 시스템에 문제가 없음을 확인하기 위함이다.

3.7. 임계 전류 시험(그림 7)

다른 전기적인 시험을 시작하기 전 먼저 초전도 특성에 대한 시험을 할 필요가 있고 이를 위해 DC 임계 전류 시험을 시행하게 된다. DC 전류를 증가시키면서 케이블에 걸리는 전압을 미리 정한 전압 또는 전류치가 될 때까지(HTS 선재의 전계값 또는 1μV/cm) 측정하게 된다. 이 시험의 목적은 초전도케이블 선재의 결함을 확인하고 포설, 굽힘, 설치 과정에 있어서의 각각의 초전도 선재에서의 손상여부를 확인하기 위함이다 [12].

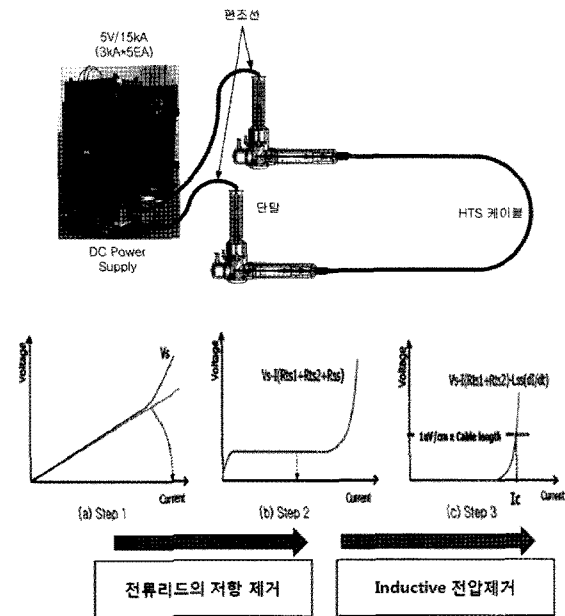


Fig. 7. Measurement method for the DC Critical Current of Superconducting Power Cables.

3.8. 유전정접(Tanδ) 측정

유전정접(Tanδ) 측정방법은 IEC 60840(12.3.5, table 4)에 설명되어 있다. IEC 60840에 설명된 측정법은 시료를 가열하면서 온도를 모니터링 하게 되어 있지만 극저온 환경에서 운전되는 HTS 케이블에 있어 이는 적합하지 않다. 대신에 케이블 온도를 설계된 운전 온도 범위 내에서 측정한다. 그 외의 시험조건에 대해서는 IEC 60840을 따른다.

3.9. 부하주기 시험

이 시험은 IEC 60840(12.3.6, table 4)에 나타나

있다. 이 시험 또한 IEC 60840에 설명된 케이블을 가열하는 방법에 대한 대안으로 케이블의 최소 정격 AC전류 또는 더 높은 전류값을 적용하게 된다. IEC 60840에 나타난 바와 같이 8시간 동안 전류가 인가되고 16시간의 냉각시간을 가지며 총 20cycle동안 시험을 수행한다(최소 20일간 시험). 비록 IEC 60840(온도가 거의 일정할 것)에 비해 약간의 변형이 있기는 하지만 AC 손실 측정과 냉각 및 온도 설계 측면에서 상당히 유효한 시험방법이다.

3.10. 부분방전 측정 시험(그림 8)

인정 시험(Type Test)시의 부분방전 측정 시험은 운전온도에 대한 부분을 제외하고 IEC 60840(항목 12.3.4 및 표 4)에 설명되어 있다. 시험시 전압을 서서히 1.75U<sub>0</sub>까지 상승시켜 10초간 유지한 후 1.5U<sub>0</sub>까지 천천히 내려서 5pC 이하의 측정감도에서 방전신호가 검출되어서는 안 된다(10).

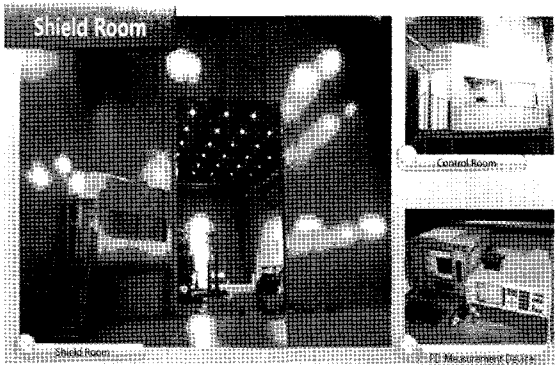


Fig. 8. Shield Room for Partial Discharge Test.

3.11. 뇌 충격 시험 및 상용주파 내전압 시험(그림 8)

이 시험 역시 운전온도에 대한 부분을 제외하고 IEC 60840(12.3.7, table 4)에 잘 나타나 있다. 선간전압 154kV RMS인 HTS케이블에 750kV peak의 임펄스 전압을 인가하고 임펄스 시험 후 2.5U<sub>0</sub>의 전압을 15분간 인가하는 상용주파 내전압시험을 시행하게 된다.

4. 결 론

본 논문에서 송전급 154kV HTS 케이블 시스템의 신뢰성 평가를 위한 시험 방법을 다음과 같이 권고한다.

- 기존 케이블 시스템에 대하여 진행되고 있는 시험 규격을 준용한다.
- 압력, 진공, 냉각, DC 임계전류, cool-down, warm-up 등 초전도 특성시험에 대한 많은 경험 및 방법을 준용한다.
- 케이블의 열적 수축을 체크하기 위해 인정 (Type) 시험의 경우 2번의 cool-down 및 warm-up 사이클이, 장기 부하주기(PQ) 시험은 초전도케이블의 수명과 유지보수기간을 고려하여 6번의 주기를 준용한다.(그림 9과 10)

이 논문에서 권고된 초전도 케이블의 시험방법은 세계 최고의 전압인 송전급 154kV HTS 케이블 시스템 시험에 적용하여 그 결과를 바탕으로 국내외 초전도 케이블 시험규격으로 제안 할 것이다.

이 논문에서 초전도 케이블의 신뢰성 시험평가 방법인 인정 (Type Test) 및 장기신뢰성 시험(PQ Test)으

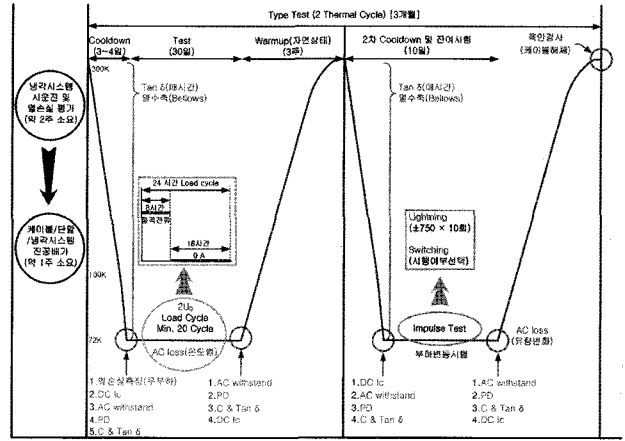


Fig. 9. Type Test Plan for 154kV HTS Cable System.

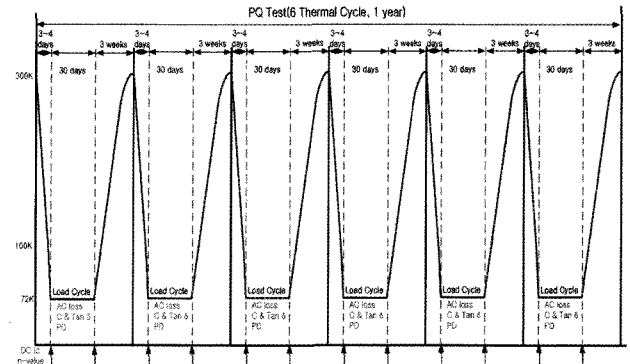


Fig. 10. Long-term load cycle Plan for 154kV HTS Cable System.

로 제안하고자 하는 시험 방법 중에 가장 큰 특이점은 열적 수축에 따른 초전도케이블의 신뢰성 평가를 하기 위하여 열 수축 주기에 대한 시험평가를 추가한 것이다. 새로운 전력설비를 실계에 적용하기 위해서는 보다 엄격한 시험절차가 필요하기 때문에, 초전도 케이블의 상업화를 위해서는 매우 큰 온도변화(약 200K)를 가지는 cool-down 및 warm-up의 절차가 필수적이기 때문에 극적인 온도변화에 따른 초전도 케이블 시스템의 열적 수축에 대한 신뢰성 시험 및 경험을 충분히 할 필요가 있다.

감사의 글

본 과제는 교육과학기술부에 의해 투자된 21세기 프론티어 연구개발 프로그램의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] Mukoyama, S., Ishii, N., Yagi, M., Tanaka, S., Maruyama, S., Sato, O., Kimura, A., "Manufacturing and installation of the world's longest HTS cable in the super ASC project," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 15, no.2, June 2005.

- [2] Ying Xin, Bo Hou, Yanfang Bi, Haixia Xi, Yong Zhang, Ren, A., Xicheng Yang, Zhenghe Han, Songtao Wu, Huaikuang Ding, "Introduction of China's first live grid installed HTS power cable system," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, 2005.
- [3] Masuda, T., Yumura, H., Watanabe, M., Takigawa, H., Ashibe, Y., Suzawa, C., Kato, T., Yamada, Y., Sato, K., Isojima, S., Weber, C., Dada, A., Spadafore, J.R., "Design and experimental results for Albany HTS cable," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, June 2005.
- [4] Masuda, T., Hirose, M., Isojima, S., Honjo, S., Takahashi, Y., Suzuki, H., "Verification test of a 100m high-Tc superconducting cable system for practical use," in CIGRE 2002, 21-202.
- [5] Maguire, J.F., Schmidt, F., Bratt, S., Welsh, T.E., Jie Yuan, "Installation and Testing Results of Long Island Transmission Level HTS Cable," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol 19, no. 3, June 2009.
- [6] Kang-Sik Ryu, "Status of HTS Power Application in Korea", 9th Annual KEPRI-EPRI Superconductivity Conference, November 2009.
- [7] Byeongmo Yang, "Field Demonstration and Test Evaluation of an HTS Cable in South Korea", 9th Annual KEPRI-EPRI Superconductivity Conference, November 2009.
- [8] Sukil Lee, "Development of HTS Cable System for Real Grid Application", 9th Annual KEPRI-EPRI Superconductivity Conference, November 2009.
- [9] H. Yoon, J. Kang, T. Jang, J Shim, and H. Park, "Test-Field Construction for Long-Term Reliability of EHV Underground Transmission Cable", ICEE Hong Kong, 2007.
- [10] IEC 60840, Third Edition, 2004-4, Power Cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30kV (Um=36kV) up to 150kV (Um=170kV)-Test methods and requirements.
- [11] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII and ASME HPS-2003 High Pressure Systems.
- [12] KS C 6111-6, Measurement method for the DC critical current of superconducting power cables, 2009.



**양병모(梁炳模)**  
1969년 4월 24일생, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 동대학원 전기공학과 박사수료, 1997년 한전전력연구원 입사, 현재 한전전력연구원 선임연구원.



**강지원(姜地原)**  
1965년 1월 6일생, 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학 졸업(공학석사), 2003년 동 대학원 전기공학 졸업(공학박사) 현재 한전전력연구원 책임연구원.



**조전욱(趙全旭)**  
1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도연구센터 책임연구원.



**이수길(李秀吉)**  
1970년 2월 2일생, 1992년 광운대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 LS전선 수석연구원.



**심기덕(沈基德)**  
1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 선임연구원.



**김성래(金聖來)**  
1965년 10월 9일생, 1988년 부산대학교 물리학과 졸업, 1993년 동 대학원 물리학과 이학석사, 2007년 한국산업기술대 응용열유체시스템 박사과정 수료, 현재 (주)CVE 부장.

저 자 소 개



**박진우(朴眞佑)**  
1979년 12월 18일생, 2005년 창원대 공대 전자공학과 졸업, 현재 한전 전력연구원 송배전연구소 근무.