

고온초전도 전력케이블 개발동향 및 국내의 연구개발 방향

황시돌, 현옥배, 최효상, 김혜림, 김상준
한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실

The Present Technical Trend and the Future Direction of HTS Power Cable R&D

Si-dole HWANG, Ok-bae HYUN, Hyo-sang CHOI, Hye-rim KIM, Sang-Joon Kim
Power System Laboratory, Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)

Abstract - We surveyed the recent technical trends concerning high-Tc superconducting(HTS) power cable R&D around the world, and proposed the course the HTS power cable R&D in Korea should take. The HTS power cable R&D in Korea need be started as soon as possible with focusing on the development and field test of the economical HTS conductors.

지중 케이블에 대한 고전압화는 기술적인 어려움 때문에 기존의 345 kV 케이블보다 상위전압인 765 kV 급에 대하여는 아직 구체적인 개발이 진행되지 않고 있다.

한편 상전도 케이블의 전류용량은 그 발생손실에 의한 온도상승에 의해 결정되므로 전류용량을 늘이기 위해서는 손실 저감과 냉각이 대단히 중요하다. 손실저감을 위해서는 각종 기술개발 노력이 계속되고 있으며, 손실의 대부분을 점하는 주울 손실 저감을 위해서 도체 크기를 증대시키면 되겠지만 초고압케이블에 있어서는 제작상의 문제, 수송면의 제약 등에 의해 통전부 단면적을 3,500 mm², 통전용량 3,000 A 정도 이상은 곤란하다. 또 통전용량을 증가시키려면 강제냉각에 의하여 도체온도 상승을 억제할 필요가 있지만 도체손실은 용량의 증가와 함께 급속히 증가하게 되므로 그것도 한계가 있다.

1. 서 론

1986년 고온초전도체가 발견된 이후 고온초전도 전력케이블에 대한 연구 및 개발에 선진국을 중심으로 한 여러 나라가 힘을 쏟아온 결과 올해부터는 미국의 Detroit Edison 전력회사가 세계 최초로 실계통에 설치하여 운전 시험을 개시할 정도에 이르렀다. 고온초전도체를 이용한 전력케이블이 실계통에 도입된다는 사실은 전문가들의 예상보다 이 방면의 기술발전이 빠르게 이루어지고 있다는 것을 뜻하며, 초전도 케이블의 실용화가 바로 눈앞에 다가왔다고 판단하여도 무리가 없을 것이다.

인구밀도가 높고 도시과밀화가 극심하여 지중 케이블의 설치공간 확보에 어려움을 겪을 수밖에 없는 우리나라도 저손실 대용량 전력 수송이 가능한 초전도 전력케이블에 관심을 갖고 1995년부터 연구프로젝트를 시작하였다. 그러나 연구목표가 저온초전도 케이블 개발이었다는 점과 저온초전도 케이블 시스템은 유지보수 경비 문제로 경제성이 확보되기 어렵다는 점 때문에 도중에 연구를 중단하고 말았다.

현재 세계적으로 초전도 전력케이블 연구개발은 고온초전도체를 사용하는 방식을 중심으로 진행되어 실용화 직전 단계에까지 도달하였으며 우리나라도 이제는 고온초전도 케이블에 관한 연구개발을 검토할 시점이라고 판단. 본 논문에서는 고온초전도 케이블 개발에 관한 국제동향을 조사하고 그 결과를 바탕으로 우리나라가 나아가야 할 연구개발 방향을 모색하고자 한다.

2. 고온초전도 전력케이블 개발현황

2.1 고온초전도 전력케이블의 필요성 및 이점

대도시 중심부의 송전계통은 주로 지중송전선로로 구성되어 있어서, 외환위기의 여파가 수그러들기 시작하면서부터 급증하리라 예상되는 전력수요를 감당하기 위해서는 지중송전루트의 확충이 필연할 것이지만 지하철, 통신, 상하수도 등 조밀화한 대도시 지하공간에 새로운 동도를 신설하는 것은 쉽지 않으리라 예상된다. 따라서 단면이 적은 관로 속에 고온초전도체를 이용한 손실이 적고 컴팩트한 전력케이블을 설치할 수 있다면 건설비용을 절감할 뿐 아니라 지하공간을 보다 더 효율적으로 활용할 수 있게 된다.

일반적으로 전력케이블의 대용량화를 위해서는 고전압화, 대전류화가 필요하다. 현재 사용되고 있는 상전도

이것에 대하여 전력케이블의 초전도화는 통전전류 밀도의 대폭적인 향상과 손실 저감을 동시에 실현시킬 수 있으므로 큰 기대를 모으고 있다. 상전도의 기존 케이블에 비해 초전도케이블의 가장 중요한 이점은 송전손실이 적고, 좁은 단면적으로 대전력을 보낼 수 있으며 낮은 전압으로도 대용량의 전력을 보낼 수 있다는 점이다.

현재 상전도 전력케이블은 주로 직경 20 cm 정도의 관로에 부설하는 것과 사람이 통과할 수 있을 정도의 터널(통도)에 부설하는 것으로 구분할 수 있는데, 초전도 전력케이블이 실용화된다면 통도부설형으로 5-10 GVA/회선이 실현가능하여 통도 1 루트당 송전용량을 대폭 증대시킬 수 있고 관로부설방식으로도 송전용량을 10 배 정도 증대시킬 수 있어서 관로당 0.5-1 GVA 정도의 송전이 가능하다. 이러한 장점은 대도시에 있어서 전력수요 증가에 따른 송전케이블 건설에 수반되는 용지구득난을 해소하고 통도의 신설을 지연시키는데 큰 역할을 할 수 있을 것이다.

또 초전도 케이블의 도입에 의해 과거에 없었던 새로운 전력수송계통의 구성이 가능하다. 즉, 관로도 대전력 송전이 가능하여 전력공급 루트의 다중화, 다양화가 쉬워지고, 공급신뢰도의 향상이 이룩될 수 있다. 이와 함께 낮은 전압으로 대전력 공급이 가능하므로 송전계통의 전압계급을 통합하고, 변전설비의 대폭적인 삭감을 실현할 수 있다. 전력수요가 많은 대도시에 있어서는 여러 종류의 전압계급이 존재하고, 이것 때문에 변전설비의 총용량은 일반적으로 수요 총전력의 수배로 되어 비경제적인데 만일 초전도 전력케이블의 도입에 의해 전압계급을 축소할 수 있다면 원가 절감, 자원절약 등의 효과를 볼 것이다.

2.2 고온초전도 전력케이블 개발 현황

현재 개발중인 고온초전도 전력케이블은 모두 은 피복의 Bi2223 다심전계 테이프를 사용하고 있다. 고온초전도체 발견 이후 많은 나라들이 액체질소 온도(77°K)에서 운전 가능한 대용량 송전케이블에 대한 연구개발을 진행하고 있으며, 현재는 일본, 미국 및 유럽의 몇 나라에서 실용화에 근접한 케이블을 제작, 상용화에 대

비한 성능시험을 계속하는 중이다.

2.2.1 일본

일본에서 가장 활발히 고온초전도 전력케이블 연구를 추진하는 곳은 동경전력으로서 일본내의 케이블메이커와 공동으로 최근 냉각계통을 포함한 30 m 길이의 프로토타입 전력케이블 시스템을 완성하여 특성 시험을 수행하고 있다. 이 시스템의 초전도 케이블 내에 과냉(subcool) 상태의 액체질소가 순환하는 냉각장치를 설치하고 냉각 특성, 열기계 특성, 전기특성 등을 평가하여 양호한 결과를 얻었으며, 100 MVA 상당의 통전시험(상전압 40 kV, 전류 1 kA)에도 성공하였다.

2.2.2 유럽

고온초전도선재의 장선화 연구와 함께 몇 가지의 초전도 전력케이블 개발 프로젝트가 진행중이다. 덴마크에서는 NST를 중심으로 전력케이블의 개발이 진행되고 있으며 내년(2000년)에는 30 m 길이의 단상케이블(2 kA, 10-60 kV)에 대한 실계통 시험이 이루어질 예정이다. 독일의 Siemens는 초전도케이블 개발계획의 일단계로서 10 m 길이의 전력케이블(Bi2223 테이프 선재, 임계전류 5 kA)을 제작하여 2000 A 통전시에 0.8 W/m의 낮은 교류손실을 실현하였다. 또 프랑스의 EdF와 이탈리아의 Pirelli Cavi가 공동으로 고온초전도 전력케이블 개발 프로젝트(예산 450만 달러)를 시작하였는데, 이 프로젝트의 주목표는 30-50 m 길이의 프로토타입 시스템에 대한 설계·제작 및 특성시험이다.

2.2.3 미국

Southwire사는 DOE 주관의 SPI(Superconducting Partnership Initiative) 계획의 일환으로, 길이 30 m 전압 12.5 kV 전류 1.25 kA의 삼상케이블을 제작하기 위한 케이블설계, 단말설계, 제조설계 등을 완료하였으며, 현재 직류임계전류 1,100 A, 교류임계전류 900 A까지 실현한 상태이다. 또 DOE의 일부 자금지원을 받아 EPRI와 Pirelli사가 공동으로 수행하고 있는 고온초전도 케이블 개발 프로젝트가 최근 주목을 받고 있는데, 금년(1999) 9월 이전에 세계 처음으로 전력회사의 실계통에 고온초전도 케이블을 설치하기로 한 것이 그 이유이다.

미시간주에 있는 Detroit Edison사의 Frisbie 변전소 주변압기와 차단기를 연결하는 120m 길이의 관로식 24 kV, 2.4 kA (100 MVA), 9조의 Cu 케이블을 3조의 고온초전도 케이블로 교체함으로써 관로 6공을 다른 용도로 활용할 수 있게 되었다. Detroit Edison사는 이 프로젝트를 통하여 고온 초전도 케이블의 전기적, 기계적 성능 시험을 계획하고 있을 뿐 아니라 시스템 유지보수비 결정, 안전작업수칙 도출 등 상용화 및 확대 적용에 필요한 기본 자료도 확보할 예정이다.

2.2.4 국내

저온초전도 케이블에 관해서는 1994년에 3 GVA급 초전도 케이블 개발을 목표로 한국전력공사 전력연구원 이 한국전기연구소와 공동으로 “초전도 케이블 및 송전 시스템 개발 연구”를 시작하여, 1998년 케이블 설계서 작성까지 완료하였으나 제작에 들어가기 직전 단계에서 연구과제가 중단되어 초전도 케이블을 제작할 수 있는 기회를 상실하였다.

그 후 한국전기연구소에서 1998년 “고온초전도 송전 케이블 설계기술 및 계통적용 연구”의 수행을 통하여 케이블코어의 개념설계를 시도한 적이 있으며, 현재까지 고온초전도 케이블을 제작한 경험은 국내에 전무한 실정이다.

표 1. 고온초전도 전력케이블 설계에

구분	고온초전도 (일본)	고온초전도 (한국)
정격전압	154 kV	154 kV
정격용량	9 GVA	3 GVA
초전도체 전류밀도	10^5 A/cm ²	10^5 A/cm ²
냉각방식	액체질소 냉각방식	액체질소 냉각방식
케이블 포설수	삼상일괄형 3회선	삼상일괄형 1회선
케이블 최외경	258mm(1회선)	200 mm
송전손실	11.92 W/m	6 W/m
외부열침입량/회 선	2.46 W/m	
전열손실	19.3 W/m	

3. 풀어야할 숙제

앞에서 언급한 대로 세계 여러 나라에서 모델케이블의 시제작과 특성시험을 통해 고온초전도 케이블의 기술적 가능성을 확인하였고 미국에서는 실계통 적용도 바로 시작할 예정으로 있으나, 시스템에 대한 신뢰도를 향상시켜 상용화하는데 있어서는 아직 몇가지 해결해야 할 과제가 남아 있다.

먼저 초전도 도체와 관련해서는 교류손실을 줄이는 문제, 임계전류밀도를 높이는 문제, 길이가 긴 도선을 만드는 문제 등의 기초적 과제가 있다. 또한 저온절연, 냉각시스템 케이블 중단부·접속부 등의 고신뢰화를 포함한 핵심요소기술·시스템기술에 대해서도 몇 가지 개발과제가 있으나 이러한 기술은 이미 다른 분야에서 유사한 기술이 개발되어 활용되고 있으므로 우선은 초전도체에 직접 관련되는 사항에 대해서 연구자원을 집중시키는 것이 바람직하다.

3.1 저교류손실화

도체의 손실이 크면 냉각을 위한 냉매의 유량이 많아 저서 냉각관의 직경이 커지고, 액체질소 냉각장치의 효율은 나빠지므로 고효율, 소형화로 대표되는 초전도케이블의 이점이 줄어든다. 고온초전도케이블의 실용화를 위해서는 삼상일괄 9000 A 송전에서 4.5 W/m 정도로 교류손실을 억제할 필요가 있다. 현재 개발되어 있는 고온 초전도 케이블은 전류용량 1000 A에서 도체 1 선당 0.28 W/m의 손실을 보이고 있으나, 통전전류가 증가하면 교류손실은 급증하므로 현재보다 훨씬 교류손실이 적은 케이블을 개발하지 않으면 안된다(도체의 크기와 임계전류밀도가 동일한 경우 통전전류의 3승에 비례한다). 이것을 위해서는 초전도 도체의 고전류밀도화, 저손실 도체구조의 개발, 케이블 구조의 최적화 등이 이루어져야 하며 교류손실의 메카니즘 해명, 정밀도 높은 측정법 등 기초적 연구도 필요하다.

3.2 고임계전류밀도화 및 장선화

초전도부의 임계전류밀도는 10^5 A/cm² 이상이 바람직하므로 장선화에 전진을 보이고 있는 Bi계 은퍼복 선재도 현재보다 2-3배의 향상이 필요하다. 이트륨(Y)계의 단선재로는 임계전류밀도 10^6 A/cm² 까지 얻고 있으나, 높은 전류밀도를 유지하면서 장선화를 실현하는 것이 앞으로의 개발과제이다. Bi계 은퍼복계 선재로 교류손실 저감과 고임계전류밀도의 요구 조건을 만족시킬 수 있을지, Y계 선재라면 장선화가 가능할 것인지 현재로서

는 확실하지 않다.

4. 고온초전도케이블 연구개발 방향

4.1 케이블 연구개발 및 실계통 실증시험을 병행

SMES, 초전도발전기 등 비록 저온초전도 기기이지만 국내에서 초전도 전력기기에 관한 연구를 시작한 지는 10 여년 이상 되었으나 실계통에 설치되어 운전되는 것은 아직 없다. 이같은 사실과 더불어 최근까지의 국내 경기침체가 가져온 정부와 기업의 R&D신규투자 위축 분위기는 고온초전도에 관한 새로운 연구개발에도 부정적인 영향을 미치고 있다. 초전도 연구개발에 대한 부정적 이미지를 벗어나기 위해서는 한시 바빠 실제의 계통에 직접 설치하여 장점을 확인시켜 주는 것이 필수적이다. 고온초전도 전력케이블의 경우, 연구개발 기간중에는 전라북도 고창군에 있는 전력연구원의 실증시험장을 활용할 수 있을 것이며, 개발 종료 시점에는 한국전력의 기존 송배전 설비에 직접 연결하여 운전시험에 들어갈 수 있어야 한다.

4.2 저가의 선재 개발

초전도 전력케이블의 핵심이라 할 수 있는 고온초전도 선재는 유연하면서도 강한 기계적 특성과 큰 전류를 수송할 수 있는 능력이 있어야만 한다. 따라서 지금까지의 초전도 선재 제조기술 연구는 고온초전도체의 기계적 특성을 향상시키기 위한 피복재 연구와 임계전류밀도를 높이기 위한 제조공정 개발에 집중되었고 그 결과 은 피복을 사용한 PIT(Powder In Tube) 공정이 개발되어 선진국에서는 수 km급의 장선재를 판매하고 있다. PIT 법으로 제조된 은 피복 Bi-계 고온초전도 선재는 실용화에 가장 근접해 있는 고온초전도 케이블에 적용되고 있으나 피복재 은을 사용하기 때문에 제작비용이 비싸다는 단점을 갖고 있다. 이러한 점을 고려하면 단기적으로 은피복 선재의 전력케이블 제작 및 실증시험을 수행함과 동시에, 장기적 안목하에서 저가의 금속피복재(Cu, Ni등)를 이용한 새로운 고온초전도 선재 개발 연구가 병행되는 것이 바람직하다.

4.3 산학연 협동 및 기술분야간 협조

고온초전도 전력케이블 시스템에는 첨단기술과 기존기술이 공존할 뿐 아니라 응용물리학, 재료공학, 전기전자공학, 기계공학 등 여러 분야의 기술이 관련되어 있다. 즉 이 시스템이 성공적으로 개발되어 원활하게 운전되려면 다양한 전공분야의 연구인력이 유기적으로 협력하지 않으면 안될 것이며 선재개발, 전기절연, 케이블코어설계, 냉각시스템, 단말 및 접속, 감시 및 제어, 최적운전기술 확립 등 세부 개발 내용 및 성격에 따라서는 산학연의 합리적 역할 분담이 절대적으로 필요하며, 전력산업 전반 및 그 주변산업에 대한 파급효과를 감안할 때 정부도 지속적인 관심과 지원을 아끼지 말아야 할 것이다.

5. 결론

전력회사의 잠재 수요와 현재 국내외의 연구개발 속도를 고려할 때, 실제 전력계통에 가장 먼저 적용될 것으로 전망되는 고온초전도 응용 기기는 케이블이 아니면 한류기가 될 것이다. 그 중에서도 고온초전도 전력케이블은 저온초전도 케이블과 달리 시스템 유지비용이 적으므로, 개발이 완료됨과 동시에 전력계통에 도입될 수 있어 세계 각국에서 기초연구, 시제품 제작 등의 연구개발을 활발히 진행중이며, 특히 미국에서는 올해 9월 이전 고온초전도 전력케이블을 실선로에 설치하여 운전 및 신뢰성 시험을 시작할 것이다.

우리 나라도 저손실, 대용량 송전을 가능케하는 고

온초전도 케이블의 장점을 최대한 살리면서 나날이 심해져 가는 대도시 전력부하 과밀화에 대응해 나가기 위해서는 세계적인 흐름에 발맞추어 고온초전도 전력케이블 개발을 서둘러야 한다. 거기에 따르는 비용과 시간을 절약하기 위해서는 응용물리학, 재료공학, 전기공학, 기계공학 등 고온초전도 케이블 개발에 관련되는 다양한 분야의 과학기술 인력들이 유기적으로 협조할 필요가 있으며, 개발 단계별로 산학연의 적절한 역할 분담과 정부로부터의 지속적인 관심도 빼놓을 수 없는 중요 인자가 될 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김정부, "전력설비의 절연재료기술", 한국전기전자재료학회 '99 춘계학술대회 논문집, pp. 7-12, 1999
- [2] A.M. Wolsky, "Recent Progress toward HTS Cable", ExCo Meeting of IEA HTS Program, April, 1999, Germany
- [3] Gerry George "Advanced Technologies Lift the Industry to a Higher Level" Transmission & Distribution, Vol. 51, No. 1, 1999
- [4] 한국전력공사 전력연구원, 고임계전류밀도를 갖는 고온초전도 재료연구, 1999
- [5] 한국전력공사 전력연구원, "초전도 케이블 및 송전시스템개발, 1998
- [6] 岩田良浩, "초전도 케이블 연구개발의 현상과 과제", 電氣評論, pp. 30-34, Dec. 1998
- [7] Mujibar M.Rahman & Marco Nassi, "High-Capacity Cable's Role in Once and Future Grids", IEEE Spectrum on Superconductivity in Electric Power, pp. 31-35, July 1997
- [8] Y.Iwata & S. Mukoyama, Research and Development of High-Tc Superconducting Cable", IEA Workshop on High-Tc Superconducting Power Transmission Cables, April 1997, Italy
- [9] 塚本修巳, "초전도 전력케이블", 日本電氣學會誌, Vol. 117, No. 4, pp. 231-234, 1997
- [10] 김진중, 조병기, "고온초전도와 그 응용", 기술개발, 한국전력공사 기술기획처, 제32집, pp. 1-15, 1997
- [11] 한국전력공사 전력연구원, "초전도전력기술개발 기본계획", 1995