

초전도 전력케이블의 개발현황과 전망

김 상 준

한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실
수요관리팀장/공학박사/기술사

1. 머리말

고층건물의 밀집, 빌딩 자동화의 진전, 가전제품의 대형화 등 전력 다소비 사회로의 급속한 진입에 의하여 도심부 전력수요가 날로 증가하고 있다. 이에 대응하기 위해서는 새로운 전력공급 회선을 추가해야 하지만, 도심부에서 설비 건설을 위한 공간 확보가 쉽지 않은 실정이다.

가공 송전선을 통한 전력공급은 경제성이 우수하여 농어촌이나 교외지역에 널리 이용되고 있으나 유도장해, 도시미관 저해 등의 문제로 도심지의 송전선로는 지중화가 불가피하다. 이 경우 가공송전에 비하여 지중선은 전력공급 능력이 떨어지고, 공급능력 증대를 위해 전력케이블 자체손실의 저감, 공급전압의 승압, 강제 냉각 등 몇 가지 방법이 고려되고 있지만, 그 효과에 비하여 투자비와 환경부담 등이 크다는 점이 문제로 되고 있다.

이러한 기존 송전방식의 제한조건과 문제점을 해결할 수 있는 전력케이블이 고온초전도 전력케이블이다. 고온초전도 케이블은 초전도체의 특징 중의 하나인 전기저항이 영인 성질을 이용하여 대전류, 저전압, 장거리 송전을 실현할 수 있는 새로운 차원의 송전방식이다. 또 액체 헬륨(4K)으로 냉각해야 하는 저온초전도와 달리 액체질소(77K) 속에서 동작이 가능하므로, 에너지손실과 운전유지비가 낮아져 1,000MVA급 정도의 대용량 송전의 경우 현재로서도 경제성을 가질 수 있는 것으로 알려지고 있다.

국내의 전력수급 사정을 보아도 대전력 수송의 필요성은 점점 높아지고 있다. 고도 경제성장에 힘입어 지난 10여년간 우리 나라의 전력수요는 세계적으로 그 유례를 찾아보기 힘들 정도로 높은 10%~15%의 성장을 매년 계속해 오고 있다(예외: 외환위기로 인한 경제침체기였던 1998년).

그러나 이에 부응하기 위한 전력설비의 건설은 국토이

용의 한계성 및 자연훼손 등에 대한 주민 반대로 점점 더 어려워져 가고 있다. 예를 들어 중간부하 및 기저성 부하 용인 유연탄발전소와 원자력발전소는 여러 가지 제약으로 수요지역과 멀리 떨어진 곳에 건설될 수밖에 없으며 입지규모도 대형화 추세에 있어 다수의 장거리 송전선로 건설을 불가피하게 하고 있고, 거기에 소요되는 선로경과지 및 건설부지 확보가 극히 어려운 형편이다.

이와 같은 송전선로 경과지 확보난에 대한 대책으로 경과지 소요를 최소화하기 위한 4회선 Tower 건설, 765kV 선로 건설을 통한 가공선로 송전능력의 획기적 향상 등을 추진하고 있으나, 전력수요의 중심지인 도심지역에는 가공송전선로의 건설이 불가능한 경우가 대부분이므로 도심지 공급능력 확보 및 전력공급의 신뢰도 향상과 도시환경의 미화 등을 위해 지중송전선으로 전력을 공급해야 한다.

2. 초전도 전력케이블의 좋은 점

현재의 지중선로를 통한 전력공급 방식은 크고 많은 어려움을 갖고 있으며, 시간이 경과할수록 그 어려움은 더욱 커져 갈 것으로 전망된다. 즉 154kV 지중케이블에만 의존하던 수도권 및 대도시 전력공급용량이 한계에 달하여 앞으로는 345kV 지중선로의 건설이 증가할 것이고, 그에 따른 지하공간의 확보 문제가 심각하게 대두될 것으로 보인다.

또한 현재까지 국내에서 사용되고 있는 345kV 케이블은 냉각용 오일을 사용하고 있으므로 환경오염에 대한 문제도 남아 있다. 이같은 기존케이블의 문제를 해소할 수 있는 대안 중의 하나로 대용량 저전압 송전이 가능한 초전도케이블이 주목받기 시작하였다.

전력케이블의 초전도화는 통전전류 밀도의 대폭적인 향상과 손실 저감을 동시에 실현시킬 수 있으므로 큰 기

대를 모으고 있다. 상전도의 기존 케이블에 비해 초전도 전력케이블의 가장 중요한 이점은 송전손실이 적고, 좁은 단면적으로 대전력을 보낼 수 있으며 낮은 전압으로도 대용량의 전력을 보낼 수 있다는 점이다.

현재 상전도 전력케이블은 주로 직경 20cm 정도의 관로에 부설하는 것과 사람이 통과할 수 있을 정도의 터널(전력구)에 부설하는 것으로 구분할 수 있는데, 초전도 전력케이블이 실용화된다면 전력구 부설형으로 5~10 GVA/회선이 실현가능하여 전력구 1루트당 송전용량을 대폭 증대시킬 수 있고 관로 부설방식으로도 송전용량을 10배 정도 증대시킬 수 있어서 관로당 0.5~1GVA 정도의 송전이 가능하다.

이러한 장점은 대도시에 있어서 전력수요 증가에 따른 송전케이블 건설에 수반되는 용지구득난을 해소하고, 전력구의 신설에 필요한 대규모 투자를 상당기간 유보할 수 있게 하여 경제적 이득을 가져다 준다.

또 초전도 전력케이블의 도입에 의해 과거에 없었던 새로운 전력수송시스템의 구성이 가능하다. 즉, 관로만으로도 대전력 송전이 가능하여 전력공급 루트의 다중화, 다양화가 쉬워지고, 공급신뢰도의 향상이 이룩될 수 있다.

이와 함께 낮은 전압으로도 대전력 공급이 가능하므로 송전시스템의 전압계급을 통합하고, 변전설비의 대폭적인 간소화를 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 전압단계를 축소할 수 있다면 원가절감, 자원절약 등의 효과가 클 것이다.

3. 국내외 기술개발 동향

최근에 완료되었거나 현재 진행중인 주요 고온초전도

〈표 1〉 고온초전도 송전케이블 개발계획(1992~2003)

기 관	국 가	시스템 형태	절연방식	설 계 요 소
Pirelli - DOE SPI	미 국	유연성 부여	상 온	120m, 3상, 24kV, 2.4kA
Pirelli - EPRI	미국, 이태리	유연성 부여	상 온	50m, 1상, 115kV, 2kA
Southwire	미 국	유연성 부여	저 온	30m, 3상, 12.5kV, 1.25kA
동경 전력	일 본	유연성 부여	저 온	100m, 3상, 66kV, 1.25kA
Pirelli - EDF	프랑스	유연성 부여	저 온	50m, 3상, 225kV, 2.6kA
Pirelli - ENEL, Edison Spa	이태리	유연성 부여	저 온	30m, 1상, 132kV, 3kA
NKT Denmark	덴마크	유연성 부여	저 온	30m, 1상/3상, 36kV, 2kA

송전케이블 개발계획은 표 1과 같다. 이러한 계획의 대부분은 공공기관과 사기업체에서 공동으로 비용을 부담하고 있다.

이들 사업은 모두 교류용이며, 고온초전도체로 BSCCO-2223를 사용하고 있다. 이 임계온도는 약 110K이고, 낮은 자장에서 응용하기에는 유용한 온도 범위이며, 송전용 케이블인 경우에는 약 80K 이하이다. 따라서 냉각용으로 액체질소를 사용하기가 매우 편리하다.

세계 최초로 지중 관로에 넣어 운전하게 될 Detroit Edison Energy 사의 개발동향을 자세히 살펴보고, 기타 전력회사는 개괄적으로 언급한다.

가. Detroit Edison Energy, 미국

과연 고온초전도 전력케이블이 전력계통의 운전환경에 적합한가 하는 문제를 검증하기 위하여 미국 에너지성에서는 부하용 변전소에 24kV 100MVA 고온초전도 케이블 시스템을 제작, 설치, 운전하는 SPI(Superconducting Partnership Initiative) 2단계 사업을 1999년부터 시작하였다. 이 실증실험은 2001년 7월부터 실제 전력계통에 넣어 운전중이다(그림 1 참조).

Michigan주, Detroit 중심가에 있는 Detroit Edison 에너지사의 Frisbie 변전소에서 60/100MVA 120-24kV 변압기의 24kV 모선 쪽에 연결하여 실증실험할 계획이다. Frisbie 변전소에는 3대의 변압기가 있는데, 수용



〈그림 1〉 Detroit Edison's Frisbie 변전소의 초전도 전력케이블 설치작업

가 전력공급용으로는 2대만 사용하고, 그리고 1대는 예비용이다.

또한 이 변전소에는 다음과 같은 실증실험에 유리한 여러 가지 이점을 갖고 있다. 대전류 2400A가 필요하며 (14,000 수용가에게 100MVA를 공급하고 있는 기존의 OF케이블 1,100mm² 3상 3회선을 고온초전도 전력케이블 3상 1회선으로 대체하게 된다), 케이블 제조능력과 현장 설치조건들을 검증하는데 충분한 120m 길이를 갖고 있고, 케이블의 현장 설치시 예상 문제점들을 사전에 검

토할 수 있는 50년된 관로를 갖고 있고, 실험에 필요하다면 전력계통으로부터 분리할 수 있는 회선을 갖고 있다는 점이다.

이 변전소를 선정할 때, 상업운전 목적보다는 도심지에서 보다 더 큰 용량으로 케이블을 교체할 때 있을지도 모르는 여러 제약조건들을 검증하는데 더 큰 의도가 있다.

이 실증실험 시스템은 옥외 단말장치와 옥내 단말장치, 중간 접속재, 무인 운전에 적합한 냉동장치를 갖추고 있으며, 지중 전력계통에 연결 설치하는 최초의 고온초전도 전력케이블이다.

(1) 케이블 시스템

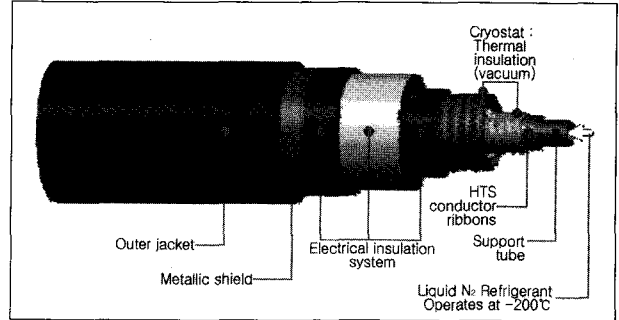
설치 현장에서 주어진 케이블 설계 필요조건들은 다음과 같다.

- 송전용량 24kV 100MVA
- 102mm(4인치) 관로에 포설할 수 있어야 한다
- 120m 연속 포설 공장
- 최소 굽힘 반경 0.94m

이를 충족하기 위해서는 크기가 작고 유연성이 큰 상온 절연방식 전력케이블(Warm Dielectric Cable)이 필요하다. WD 초전도 전력케이블의 측면도는 그림 2와 같고, 단면도는 그림 3과 같다. WD 초전도 전력케이블의 설계 요점은 유연성이 큰 저온유지장치(Cryostat)로 된 극저온 환경으로부터 절연시스템을 분리한다는 것이다.

24kV로 100MVA를 송전하기 위해서는 교류 2,400A의 도체 용량이 필요하다. 이 용량을 충족하기 위하여 BiCaSrCuO 테이프를 4개 층으로 조합한 도체를 만들었다. 직류 임계전류가 평균 118A인 테이프를 사용하여 유연성이 있는 형틀 위에 감았다.

재래식 절연재료를 사용하기 위하여 이번 실증시스템에서는 EPR 고무를 절연재료로 사용하고 있다. 재래식 절연재료를 사용함으로써 새로운 절연시스템을 개발하고

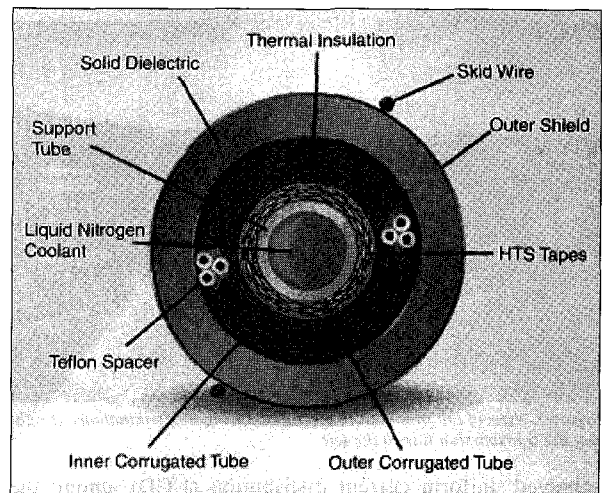


<그림 2> 상온 절연 24kV 고온초전도 전력케이블의 측면도

검증하여야 하는 불편을 없앨 수 있으며, 재래식 시스템에 사용하였던 접속재들을 이용할 수 있다.

이번 실증실험 시스템에 적용한 절연시스템은 재래식 24kV 전력케이블과 유사하며, 도체 차폐층, 절연층, 절연 차폐층과 외부 피복층으로 되어 있다. 절연체는 3중 압출 기술을 적용하였다.

저온유지장치의 상대적인 유연성 때문에 전력케이블 정도는 절연체가 좌우하고 있으며, 동일 크기와 전압의 재래식 전력케이블처럼 취급할 수 있다.



<그림 3> 상온 절연 24kV 고온초전도 전력케이블의 단면도

(2) 냉동 시스템

고온초전도 재료를 사용하려면 시스템의 운전온도를 -196°C (77K) 이하로 유지할 필요가 있다. 고온초전도 도체는 전력케이블을 열적으로 절연시키는 진공절연 저온유지장치 안에 들어 있다. 그러나, 특수 설계한 냉동시스템을 이용하여, 저온유지장치를 통하여 침입하는 열과 전력케이블 내의 손실 때문에 발생하는 열을 제거시켜 적정 운전온도를 유지하여야 한다.

냉동장치는 전력케이블 시스템 안에서 발생하는 모든 열량을 제거하여 시스템의 출구 온도를 항상 최소 값으로 유지할 수 있는 충분한 용량이어야 한다.

전력케이블 시스템을 실제로 운전할 때에는 단기 과부하라든가 고장전류와 같은 비정상적인 운전시 그 크기와 지속시간 특성들을 고려하여 냉동 시스템에 필요한 최대 입력을 결정하여야 한다.

실증실험 시스템의 정상적인 입력 용량은 약 4kW이다. 이 규격은 전력케이블 시스템의 교류손실 거동과 열적 절연시스템 등에서 얻은 Pirelli의 경험적이고 이론적인 연구를 통하여 결정되었다.

열을 제거하고 온도를 적정하게 유지하기 위하여, 작용유체로 헬륨을 사용하는 밀폐형 역 Brayton 사이클 냉동장치를 이용한다. 완성 시스템은 Pirelli에서 제정한 규격에 의하여 Lotepro회사에서 설계하고 제작하였다. 단기간 과부하 운전시에도 감당할 수 있도록 냉동용량을 30% 증대시켰다.

Frisbie 변전소는 대부분의 극저온 냉동장치 설비와는 달리 사람이 상주하고 있지 않다. 따라서 냉동시스템에는 원격 제어감시 장치와 사전에 설정한 한계치를 초과하는 여러 제한요소들에 대하여 운전자에게 경보하는 경보시스템을 갖추게 된다.

또한 냉동장치를 설계할 때에는 증발식 냉각시스템을 통하여 100% 냉각 여분이 갖추어지도록 반영한다. 이러

한 부가 시스템은 주 냉동장치가 계획정지 또는 고장으로 정지하더라도 전체 시스템 용량을 유지하도록 부가시킨 것이다.

또한 주 냉각장치와 예비 냉각장치, 액체질소 펌프와 제어설비들에 공급하는 전원을 별도로 분리하였다.

예비 시스템은 보조 액체질소 탱크를 이용하며, 예비 시스템이 그리 빈번하게 사용되지는 않는다고 할지라도 외부에서 들어오는 열침입 때문에 한 달에 한 번 정도는 저장탱크를 재충전할 필요가 있다. 이러한 시스템은 불편하기 때문에 상용 운전에서는 바람직하지는 않다.

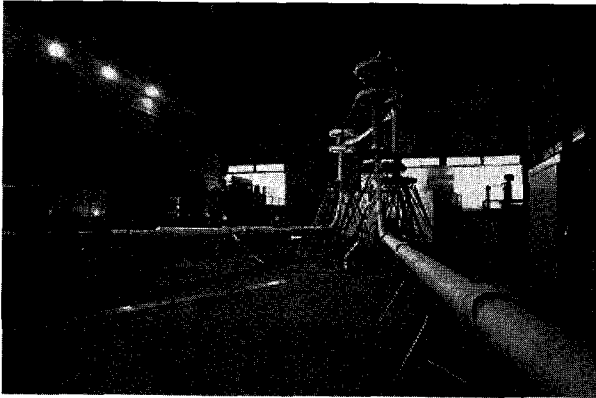
냉동 시스템의 위치는 냉동장치와 전력케이블 사이의 거리가 최소가 되도록 선정하여야 한다.

나. Pirelli Cable and Systems, 미국

Pirelli케이블시스템은 미국에서 고온초전도 송전케이블 기술을 개발하고 있다. 고압 OFP 전력케이블을 교체함으로써 기존 덕트에 있는 송전 용량을 증대시키고자 하는 방안으로서 1990년대 초반에 EPRI와 Pirelli에 의하여 상온 절연 고온초전도 전력케이블(Warm Dielectric HTS Cable)이 처음으로 제안되었다. 이는 전력회사의 중요한 현안과제를 해결해주는 하나의 방안이다.

상온 절연설계는 저온 절연설계에 비하여 훨씬 간편하며, 기존 관로에 쉽게 설치할 수 있다. 또한 기존의 상세하게 규명된 절연재료를 사용할 수 있으며, 초전도 재료는 많이 소요되지 않는다.

1992년에 Pirelli에서는 115kV, 3상 400MVA 급의 상온 절연 초전도 전력케이블에 대한 상세 설계서를 만들었다. 이 설계서를 근거로 하여 Pirelli, EPRI, DOE에서는 접속재, 단말장치, 냉각시스템을 포함한 50m 길이의 프로토타입을 만들어 내기 위한 SPI(Superconductivity Partnership Initiative) 프로그램을 진행시켰다.



〈그림 4〉 Milan에 있는 Pirelli/EPRI 50m 초전도 전력케이블 시험장치

Pirelli와 ASC(American Superconductor Corporation)는 표준형 전력케이블 제조에 사용할 수 있는 Bi-2223 테이프를 공동으로 개발하였다.

두 개의 제대로 된 도체가 1995-1996년에 만들어졌다. 하나의 접속재를 갖는 완전한 전력케이블 시스템은 임계 전류 2.8kA인 최소 성능기준을 넘었다. 고전압 시험을 훌륭하게 통과하였으며, 교류 손실은 짧은 프로토타입 도체에서 측정된 것과 일치하였다. 그림 4는 Milan에 있는 Pirelli에서 시험중인 초전도 전력케이블을 보여 주고 있다. 이 프로젝트는 1998년에 성공적으로 마쳤다.

현재 북미 대륙의 경우 2200마일에 달하는 지중 송전케이블이 한계 수명에 다다르고 있으므로 이러한 노후 전력케이블의 대체에 목표를 맞추고 있는 것으로 보인다.

다. Southwire, 미국

현재 DOE에서는 고온초전도 송전케이블을 개발하기 위하여 두 개의 다른 SPI 사업을 지원하고 있다. 이 사업의 첫번째 것은 Georgia 주 Carrollton에 있는 재래식 송전케이블의 주요 제조회사인 Southwire가 주도하고 있다.

협동 연구기관으로서 설계 및 시험기술을 제공하는

ORNL(Oak Ridge National Laboratory), 초전도 선재 제조회사인 IGC(Intermagetics General Corporation)가 주된 관련사이다.

이 시범사업은 30m(100피트) 길이의 3상 고온초전도 전력케이블을 개발하여 Southwire 케이블 제조회사 구 내에 설치하고 시험하는 것이다. 1.25kA, 12.4kV에서 운전하는 동축 외부 고온초전도 차폐층을 갖는 저온 절연방식이다.

이 사업은 1997년 하반기에 5m 길이의 프로토타입 초전도 전력케이블을 제조하고 시험을 시작하였다. 30m 길이의 3상 케이블은 1999년 이른 가을에 제조하고 시험한 후 그 해 말에 설치하였다.

Southwire와 IGC는 고온초전도 전력케이블을 이용하여 2000년 1월초부터 Southwire의 3개 제조공장에 전력을 공급하고 있다. 현재 초전도 전력케이블과 전체 시스템 성능에 대한 시험을 계속하고 있다.

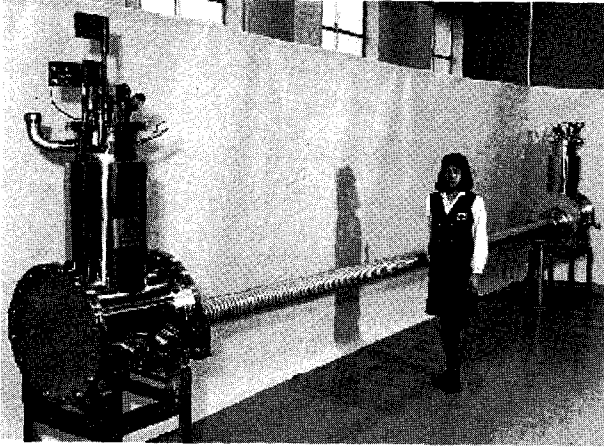
라. 도쿄전력, 일본

도쿄전력은 일본에서 수행하고 있는 대부분의 고온초전도 전력케이블 사업을 공동으로 개발하고 있다. 일본에 있는 큰 제조회사인 Furugawa와 Sumitomo는 각각 Bi-2223 도체와 프로토타입 초전도 전력케이블을 제공하고 있다.

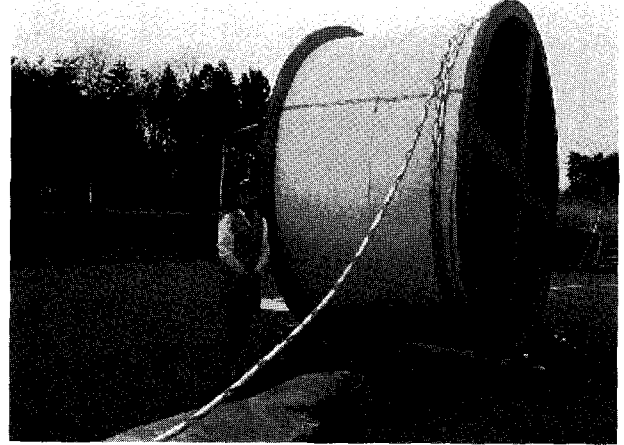
이 사업의 목적은 기존 150mm 덕트에 있는 66kV 송전케이블을 작은 직경의 고온초전도 전력케이블로 교체함으로써 현재의 송전용량을 2배로 증대하는 것이다.

이 사업은 Sumitomo에서 7m 길이의 3상 66kV 1,000A 114MVA 초전도 전력케이블을 제조함으로써 1995년에 시작하였다. 이 고온초전도 전력케이블은 동일 크기의 재래식 66kV 케이블에 비하여 2배의 송전 용량 효과를 거둘 수 있다(그림 5 참조).

각 상 초전도 전력케이블은 4층으로 된 Bi-2223 테이



〈그림 5〉 3상 66kV 1,000A 114MVA 초전도 전력케이블 외관(도쿄전력/Sumitomo 제작)



〈그림 6〉 3상 66kV 2000A 230MVA 초전도 전력케이블 외관(도쿄전력/Furugawa 제작)

프를 유연성을 갖는 형틀(Former) 위에 나선형으로 감고, 저온 절연 테이프를 처리한 후, 추가로 자계 차폐층의 역할을 하도록 2층으로 된 Bi-2223 테이프를 감았다.

세 개의 케이블 코어는 고리 띠 내에 열 절연 성능과 진공 공간을 갖고 있는 두 개의 동축 알루미늄 파형관 내에 설치된다.

Furugawa는 1996년에 50m 길이의 단상 도체를 제조하였는데, 전류가 각 층 사이에서 균일하게 흐르도록 함으로써 교류 손실을 6분의 1로 저감시키는 획기적인 발전을 이룩하였다.

다층(4층 이상) 도체에서는, 각 층들의 인덕턴스가 작용하여, 가장 바깥 층의 임계전류가 초과할 때까지, 대부분의 전류가 가장 바깥 층으로 흐르도록 작용하며 결국 가장 바깥 층에서 매우 큰 손실이 발생한다.

Furugawa에서는 모든 층 사이의 임피던스를 균일하게 하기 위하여 외부 저항을 사용하고 있으며, 이로써 전류를 균등하게 하고 있다(그림 6 참조).

1999년 말에 도쿄전력과 스미토모는 100m 길이, 3상, 66kV, 114MVA, 1000A인 저온 절연방식의 초전도 전

력케이블 시스템 시작품을 제작하는 공동연구를 시작하였다. 이 사업은 2001년 3월까지 초전도 전력케이블을 제조하여 건설하고, 2002년 중반까지 시험을 완료할 계획이다.

동경 서쪽에 있는 CRIEPI에 설치하여 장기신뢰성 시험을 할 예정이다.

직경 150mm인 덕트 내에 맞도록 초전도 전력케이블을 설계하였으며, U자형 굽힘과 대기압에 가까운 액체 질소를 이용하는 폐회로 냉각시스템을 갖추게 된다.

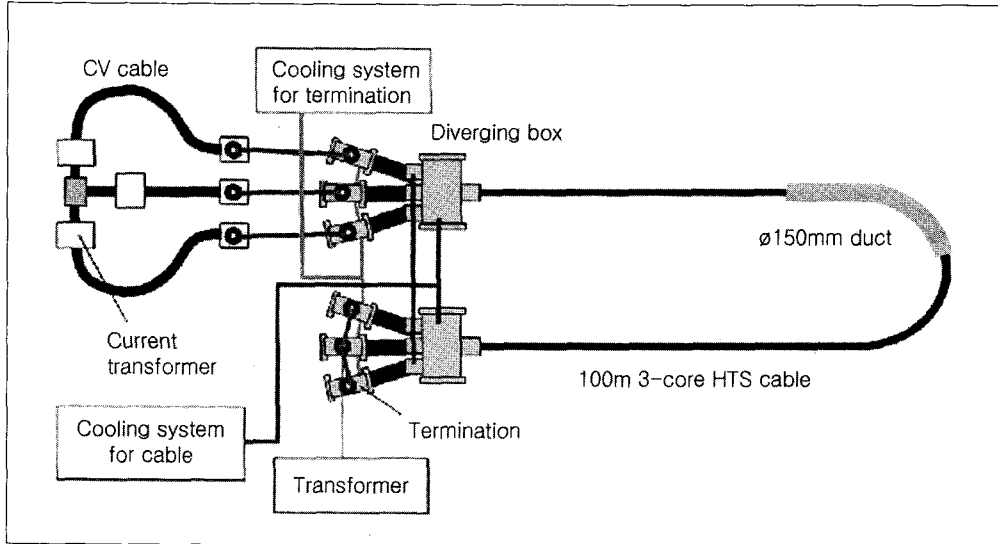
이 사업의 주목적과 향후 계획은 다음과 같다.

최종목표

- 케이블 시스템의 제조능력과 현장 적용성 검증
- 상용화에 필요한 문제점 도출

케이블 시스템의 주요 규격

- 66kV 1,000A 114MVA, 100m
- 3상 저온 절연방식
- 기존 150mm 관로에 포설할 수 있을 것
- 액체 질소 순환 냉각



〈그림 7〉 66kV 3상 1,000A 114MVA, 100m 초전도 전력케이블 시험 개요도
(도쿄전력/Furugawa 제작)

주요 시험항목

- 제조, 준공 시험, 초기 냉각시험
- 장기 전부하 시험
- 부하변동 및 히트사이클 시험
- 과부하 및 과전압 시험

주요 연구 내용은 초전도 전력케이블 제조 및 설치, 초기 냉각 시험, 장기 정격전류 전압 부하시험, 부하 변동 시험, 히트사이클 시험, 과전류 과전압 시험이다. 이 연구의 전체적인 목표는 고온초전도 전력케이블 시스템의 제조가능성과 적용 가능성을 증명하는 것이다(그림 7 참조).

마. Siemens/Pirelli, 독일

독일 Siemens Corporate Technology Group와 Siemens Power Transmission and Distribution Group에서 1994년에 단상, 110kV, 400MVA 저온 절연형 초전도 전력케이블 개발사업이 시작되었으며, 부분적으로는 정부로부터 지원을 받는다.

지멘스는 4개 층 모두에 걸쳐 균일한 임피던스가 얻

어지도록 Layer Pitch Angle의 계산된 순서를 이용하여 1998년에 10m 길이의 프로토타입 초전도 전력케이블의 균일한 전류분포(UCD : Uniform Current Distribution)를 달성하였다. 손실은 2000A에서 0.8W/m이었는데, 이는 송전용으로 받아들일 수 있는 수준이며, 균일한 Pitch Angle로 감은 다른 초전도 전력케이블에 대하여 예상되는 값의 약 절반에 불과하다고 계산되었다.

본격적인 초전도 전력케이블은 유연성이 있고, 저온 절연방식이며, 100m 길이이다. 절연재료는 종이처럼 생긴 PE 테이프이며, 자체 차폐층은 2개의 층으로 된 Bi-2223 테이프이다.

초전도 전력케이블 코어의 외경은 64mm이며, 외부 직경이 170mm이고 내부 직경이 100mm인 유연성이 있는 냉각관에 맞도록 사이즈를 정하였다.

절연체의 절연강도 시험과 충격 파괴전압 시험을 훌륭하게 통과하였다. 그러나, 1상 초전도 전력케이블 시스템의 손실은 전류가 영인 상태(예 : 케이블에 열 침입)에서

약 1.5W/m로, 전부하에서는 5W/m로 계산되었다. 이러한 값들은 상업용으로서 너무 높은 값이며, 열절연을 향상시키고 고온초전도체 내에 있는 교류손실을 저감시킬 필요가 있었다.

1998년 말에 Pirelli Cavi e Sistemi 에서 지멘스의 송배전 그룹을 사들이고, 작업을 계속 진행시키면서 이탈리아 밀라노와 미국에서 Pirelli 초전도 전력케이블 개발 사업을 공동으로 수행하고 있다.

바. Pirelli, 프랑스, 이태리

1997년 말에 EDF에서 225kV 저온 절연방식의 초전도 전력케이블을 개발하고자 하는 사업이 시작되었다. 최종 목적은 전체 길이 10km인 4개 병렬 회로로 구성하는 3,000MVA 시스템이다. 대용량 전력 밀도이고 외부 자계장이 거의 영인 저온 절연방식을 선정하였는데, 이는 루트 선정 계획을 쉽게 해 준다. 이러한 연구 과정을 통하여 많은 기술적인 관점과 경제적인 관점들이 검토될 것이다.

2000년 초에 Pirelli에서는 1상 225kV 20m 길이의 프로토타입 초전도 전력케이블을 제조하였다고 발표하였는데, 초전도 손실 1W/m 이하로 교류 2.6kA까지 흘릴 수 있다.

1999년 중반에 Pirelli는 이태리 전력회사 ENEL과 Edison Spa 회사와 함께 새로운 사업을 시작하였는데, 132kV 3kA에서 운전할 수 있는 저온 절연방식초전도 전력케이블이 개발 목표이다. 30m 길이의 완전한 1상 초전도 전력케이블 시스템을 완성한 후 2003년까지 시험할 예정이다.

사. NKT, NST, ELTEK, DEFU, 전력회사, 덴마크

NKT, NST, ELTEK(덴마크 기술대학교), DEFU(덴마크 연구원), 덴마크 전력회사들은 공동으로 덴마크 송전에 대한 미래 개발 필요성을 역설하는 활발한 움직임

을 가졌다.

주요 도시에 대한 단거리 배전선로로부터 덴마크 내에 있는 400kV 간선망을 확장하고, 근접한 국가들에게까지 확장하여 장래에 해안가 풍력발전소로부터 전력을 수송하고, 도시들에 대한 CO₂ 방출을 감소시키는 방안으로서 적용연구를 시작하였다.

이러한 목적에 적합한 방식으로 고온초전도 전력케이블을 고려하게 되었는데, 이는 대용량 전력 밀도 때문이다. 이 그룹에서는 10m 길이의 저손실 도체를 만들었으며, 30m 길이의 36kV 2kA 1상 초전도 전력케이블을 만들고 있는 중이다. 2000~2001년에 3상 초전도 전력케이블 시스템을 만들어 현장시험을 할 계획이다.

아. 국내 기술개발 현황

지금까지 국내에서의 고온초전도 전력케이블 시스템 연구는 대학이나 연구소, 한전 등에서 주로 초전도 전력케이블 개발의 바탕이 되는 도체 연구 등 기반기술 개발 위주로 진행되었다.

1997년 기계연구원은 임계전류밀도 $2 \times 10^4 \text{A/cm}^2$, 테이프 당 7A의 임계전류를 갖는 길이 100m, 은 피복재 다심선재를 개발하였다.

이어서 1998년 한국전기연구원은 은 피복재에 361개의 초전도 필라멘트를 갖는 임계전류 $2.3 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 급의 고온초전도 테이프를 제작한 바 있으며 제조 가능한 길이는 200m에 달하고 있다.

지금까지 초전도 전력케이블시스템 전체에 대한 연구나 제작 경험이 부족하지만 본격적인 연구의 수행에 필요한 기반은 구축되어 있다고 볼 수 있다.

이를 바탕으로 한국전력은 2001년부터 3년간 “초전도 전력케이블 개발 연구”과제를 추진할 예정이며, 과학기술부도 21세기 프론티어 연구사업에 초전도 전력케이블 개발연구를 포함시켜 대규모로 지원할 계획을 갖고 있다.

4. 초전도케이블의 장래 전망

가. 초전도 전력케이블의 실계통 적용 연구방향

전력회사에서 초전도의 미래는 짧은 2~3년 안에 보다 명확해질 것이다.

초전도 전력케이블을 실제 전력계통에 연결하여 운전하는 실증프로그램에는 고온초전도 케이블을 기존 전력계통망에 부가할 때의 영향 평가뿐만 아니라 전력환경에서 운전하는 고온초전도 케이블의 운전특성도 평가하는 전력계통 모델링 연구가 포함되어야 한다.

여러 재래식 송전시스템 설계기술, 신뢰도 기준, 부하 조류 해석과 시스템 신뢰도 영향을 평가하는데 초점을 맞추어야 하고, 특히 유의할 사항은 병렬 계통망과 고온초전도 전력케이블 사이의 부하 분담, 고장전류 상태, 전반적인 시스템 신뢰도와 보호 방안이다.

매일 또는 계절적 변동부하를 모델링하는 부하 조류 연구로 시스템에 미치는 영향을 평가하기 위하여 조류의 경로를 바꿀 수 있는 여러 시나리오를 분석하여야 한다. 적정 초전도 전력케이블 설계와 적정 보호방안을 검증하기 위하여 매 설치 사안별로 시스템 고장전류 해석을 실시하여야 한다.

이러한 시스템 연구를 통하여 전력계통에 연계할 고온초전도 전력케이블의 적정 설치위치에 대한 통찰력과 고온초전도 전력케이블의 응용 가능분야와 기여도에 대한 아이디어를 얻을 수 있다.

나. 초전도 전력케이블의 전력회사 전망

고온초전도 전력케이블 시스템은 엄청난 용량과 특별한 운전특성으로 인하여 전력회사에 새로운 도전의 기회를 제공하고 있다.

재래식 케이블을 고온초전도 전력케이블로 바로 교체함으로써 송전용량을 크게 증대시킬 수 있다.

고온초전도 전력케이블은 주위에 포설되어 있는 케이블에 대하여 열적 영향을 주지 않을 뿐만 아니라 다른 케이블로부터 열적 영향을 받아 용량이 저감되지도 않는 특성을 갖고 있다.

도심지 재개발로 부하수요가 늘어남에 따라서 전력케이블을 교체할 경우 기반시설 파괴는 최소화되어야 한다.

미래 시스템 계획시 새로운 대용량 전력계통망을 구성하는 근간시설로 고온초전도 전력케이블을 사용할 수 있다.

이렇게 고온초전도 전력케이블 시스템 기술은 기존의 기술로서는 경제적으로 사회적으로 별 흥미를 끌지 못하는 전력시스템 계획 문제를 해결하는데 큰 잠재력을 갖고 있다.

고온초전도 전력케이블 시스템 기술을 실제 전력계통에 광범위하게 적용하기 이전에 현장 적용연구와 실제 운전경험을 얻을 필요가 있다.

고온초전도 전력케이블 실증실험으로 시스템 계획, 변전소 설계, 장비 설치, 운전과 유지정비에 새로운 도전의 기회를 가질 수 있다.

재래식 기술로는 불가능하였던 전력계통 배치계획에 대하여 대용량의 이점을 갖고 있는 고온초전도 전력케이블 시스템은 가능성을 제공한다. 일례로 고온초전도 전력케이블을 이용하여 도심지 부하 중심까지 대전력을 송전함으로써 변전소 변압기를 도심지에서 먼 곳에 설치할 수도 있다.

표준화된 시스템 설계에 냉동 시스템과 부가적인 원격 감시제어 요구조건들을 통합시킬 필요가 있다.

실계통 연결 실증실험으로 전력회사 경영자들, 기술자들, 케이블 접속재 시공자들과 현재 전력시스템에서 쓰고 있지 않는 설비를 운전할 운전자들에게 좋은 경험이 될 것이다.

고온초전도 전력케이블 시스템은 미래 전력회사의 설비투자비와 운전비용에 상당히 긍정적인 영향을 미칠 것

이며, 송전계통의 혼잡성을 완화시켜 줄 수 있는 대안이 될 수 있다.

Detroit Edison사는 이 사업에 EPRI, Pirelli, ASC 와 미국 에너지성과 같이 동반자로서 참여하고 있으며, 전력계통의 송전용량을 증대시키고, 신뢰도를 높이며, 전력품질을 향상시키기 위하여 고온초전도 전력케이블 시스템 개발을 위한 전략연구를 수행하고 있다.

5. 맺음말

전력회사의 잠재 수요와 현재 국내외의 연구개발 속도를 고려할 때, 실제 계통에 가장 먼저 적용될 것으로 전망되는 고온초전도 응용 기기는 전력용케이블이 될 것이다.

고온초전도 전력케이블은 저온초전도 전력케이블과 달리 시스템 유지비용이 적으므로, 개발이 완료됨과 동시에 전력계통에 도입될 수 있어 세계 각국에서 기초연구와 시제품 제작 등의 연구개발을 활발히 진행하고 있으며, 특

히 미국에서는 2000년 1월부터 고온초전도 전력케이블을 실제 전력계통에 설치하여 운전 및 신뢰성 자료를 축적하고 있다.

우리 나라도 공간을 적게 차지하면서 저손실, 대용량 송전이 가능한 초전도 전력케이블의 장점을 최대한 살리면서, 날이 심해져 가는 대도시 전력부하 과밀화에 대응해 나가기 위해서는 세계적인 흐름에 발맞추어 장기적인 관점에서 초전도 전력케이블 개발을 서둘러야 할 것이다.

특히 전력산업구조개편이 진행되고 있는 시점에서 향후 더욱 거세어질 송전효율 및 경제성 향상 요구에 대비하고, 매년 증대하고 있는 전력공급을 원활하게 한다는 점에서 고온초전도 전력케이블 연구의 필요성이 절실해진다.

그러나 전력회사에서 고온초전도 전력케이블 기술을 활용하기 위해서는, 시스템이 갖고 있는 기술적 우월성과 더불어 전력계통 환경에 알맞은 건설공사와 운전의 적합

한국전력기술인협회 이전 안내

이전일자 : 2001. 8. 25(토)

우(151-811)
서울시 관악구 봉천 10동 32-8
동진빌딩 6, 7F

TEL : 02-888-4224
FAX : 02-888-4474

송실대방면
 관악프라자
 한국전력기술인협회
 동진빌딩 6, 7F
 (1층 주택은행)
 북개천도로
 공항방면
 신철역 봉천역
 서울대입구역(2호선)
 6번출구 350M 지점
 사당방면
 서울대방면

성을 확인할 필요가 있다.

초전도 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 선재 개발, 케이블코어 설계, 전기 절연, 냉각시스템, 단말 및 접속, 감시 및 제어, 최적운전 기술 확립 등 세부 개발 내용과 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.

초기에는 최종 수요자인 한국전력이 중심이 되어 정부, 관련 학계 및 산업계가 협력하여 개발을 추진하고, 중반 이후부터는 케이블 생산업체가 개발주체가 되는 것이 연구에서 생산까지의 시간적 격차를 줄여나갈 수 있는 전략

이 될 것이다.

연구개발의 최종목표는 154kV 1GVA급 고온초전도 전력케이블의 상용화 개발이 적합하고, 주요 연구내용에는 케이블 시스템 설계기술 확립, 초전도 도체의 장척화, 극저온 단말 및 접속재 개발, 극저온 고전압 절연기술, 시스템 경제성 분석 등이 포함되어야 한다.

10년 동안의 총 연구예산은 300억 정도가 소요될 것으로 전망하고 있으며, 개발 성공시 국가경제에 미칠 파급효과를 생각한다면 총 예산의 50% 이상을 정부에서 부담하고 그 나머지 부분을 한국전력과 관련기업이 부담하는 것이 바람직할 것이다.

정부에서도 초전도 전력케이블 시스템 개발산업을 “21세기 뉴 프론티어사업”에 포함시켜 금년부터 집중적인 지원을 계획하고 있기 때문에 산·학·연이 이 기회를 잘 활용하여 모든 지혜와 능력을 집중한다면 보다 효과적인 큰 연구성과를 올릴 수 있을 것으로 전망된다. ■

[참 고 문 헌]

- (1) 김상준, 황시돌 “초전도 전력케이블 개발동향”, 기술개발 45집(2000 겨울호), 한국전력공사 전력연구원, 2000
- (2) 김상준, 현옥배, 황시돌, 김혜림, 최효상 “고온초전도 선재를 이용한 전력케이블 개발의 타당성 평가 및 중장기 개발계획 수립”, 한국전력공사 전력연구원, '00전력연-단358, June 2000
- (3) “Model Spec. for HTS Cable System”, CIGRE, WG 21~20, Feb. 2001
- (4) Jeffrey O. Willis, “Superconducting Transmission Cables”, IEEE Power Engineering Review, pp. 10~14, August 2000
- (5) Nathan J. Kelly, etc., “Field Demonstration of a 24kV Warm Dielectric HTS Cable”, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 2461~2466, March 2001
- (6) S. Honjo, etc., “Present status of the development of superconducting power cable”, Physica C 335, pp. 11~14, 2000
- (7) 한국전력공사 전력연구원, “초전도 케이블 및 송전시스템개발, 1998
- (8) A.M. Wolsky, “Recent Progress toward HTS Cable”, ExCo Meeting of IEA HTS Program, April, 1999, Germany
- (9) Gerry George “Advanced Technologies Lift the Industry to a Higher Level” Transmission & Distribution, Vol. 51, No. 1, 1999
- (10) 岩田良浩, “초전도 케이블 연구개발의 현상과 과제”, 電氣評論, pp. 30~34, Dec. 1998