

고온초전도 케이블 시스템 개발에 관한 타당성 조사

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

Feasibility Study on the Development of High-T<sub>c</sub> Superconducting Power Cable System

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** - This paper summarizes the feasibility study of HTS power cables in Korea, including the conceptual design of a 154 kV 1000 MVA class HTS cable system, and the relative economic evaluations between conventional and HTS cable systems in Seoul area. According to the results of the economic evaluations, the HTS cable system can reduce the construction work for 168km of underground transmission lines, saving 700 million USD of construction cost in 2010.

과 전력케이블의 대용량화 등 기존 전력케이블의 한계를 극복할 수 있는 기술의 개발이 요구된다. (현재 계통용량은 500 MVA/Route 이지만 향후에는 2000 MVA/Route 이상 필요할 것으로 예상)

2.2 송전선로 경과지의 확보문제

이용가능 국토면적의 점차적 감소와 송전선로 경과지 근처 주민의 반대 등으로 신규선로 경과지의 확보가 극히 어려운 실정이므로 기존 판로나 전력구의 효율적 활용이 절실하다.

1. 서 론

1980년대 후반에 액체질소로 냉각이 가능한 고온초전도체가 발견되면서 미국, 일본을 비롯한 선진국의 전력회사와 케이블제조회사들은 고온초전도케이블의 연구개발을 계속하여 지금은 실선로에 적용을 시작하는 단계에 도달하였다. 이러한 다른 나라들의 움직임에 비해 국내의 연구개발은 미미하여 고온초전도케이블 기술에 있어 선진국에의 기술종속이 예상된다.

또한 국내의 전력수급 사정을 보아도 대전력 수송이 가능한 송전기술의 개발 필요성은 점차 높아지고 있다. 고도 경제성장에 힘입어 지난 10 여년간 우리나라의 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 국토이용의 한계성 및 자연훼손 등에 대한 주민반대로 점점 더 어려워져 가고 있다.

앞서 기술한 국제적인 동향과 국내의 전력수급 사정 그리고 기존 송전방식의 문제점 등을 고려할 때 우리나라 특히 전력케이블의 최대 수요처인 한전도 고온초전도 전력케이블 개발을 서둘러야 할 시점에 도달하였다. 그러나 고온초전도 전력케이블은 여러 가지 장점이 많은 반면 실용화를 위하여 해결해야 할 과제도 적지 않다. 우선 길이 1 km 정도의 선재에서 임계전류밀도 향상, 교류손실 저감 등의 전기적 특성 향상과 함께 전력케이블 제조 및 포설시의 변형에 충분히 견딜 수 있는 기계적 특성 향상을 들 수 있다. 이같은 전기적 기계적 문제를 해결하여 실용화 가능한 고온초전도 전력케이블을 개발하는데는 여러 분야의 첨단기술 및 신기술의 도움이 필요하고, 개발기간도 길게 소요될 것이며, 많은 연구자원이 투입되어야 할 것으로 예상됨과 아울러 개발에 실패할 가능성도 비교적 높다. 이러한 프로젝트일수록 보다 철저한 사전조사와 완벽한 추진계획 수립을 통하여 연구수행단계에서의 시행착오를 줄이고 프로젝트의 성공 가능성을 높여야 한다.

2. 고온초전도 전력케이블의 필요성

2.1 송전용량의 부족 문제

전력의 안정적인 공급을 위해 대용량 송전계통의 확충

2.3. 전기의 품질저하 문제

전원설비의 대용량화, 지역적인 편재화, 전력수송의 장거리화에 따른 전력계통의 안정도와 전압안정성의 저하가 우려되는데 비해 컴퓨터, 통신, 정밀 제조업 등과 같은 고품질의 전기를 요구하는 부하가 급증하고 있으므로 전력계통의 안정도 향상을 위한 신기술이 필요하다.

2.4. 고효율 전력전송과 환경오염 문제

송전선로에서의 전력손실 발생으로 인하여 수요전력보다 많은 양의 전력을 생산해야 하며, 석탄이나 석유 등 화석연료를 사용한 발전방식은 필연적으로 이산화탄소를 배출하게 되므로 지구환경의 오염문제를 야기시킨다. 따라서 송전손실을 줄이는 것은 그 차체로서 에너지 절약의 효과가 클 뿐만 아니라 간접적으로 환경문제를 해결하는 방안도 된다. 자원절약과 환경보호를 위하여 저손실 전력전송 기술의 개발이 필요한 실정이다.

3. 고온초전도 케이블 시스템의 개념설계

3.1 개념 설계 조건

고온초전도 케이블코아의 설계는 케이블의 구조, 구성 방식 등에 따라 차이가 있겠지만 본 연구에서 대상으로 한 고온초전도 케이블코아는 그림 1과 같이 내부에 통전용 초전도 도체와 전기절연 및 외부에 차폐용 초전도도체를 나선형으로 감아 유연성을 갖는 저온절연 방식으로 설계하였다.

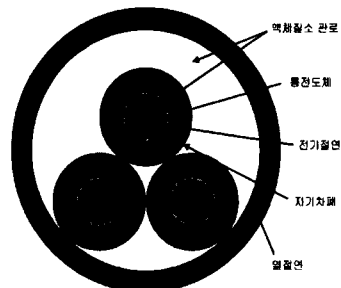


그림1. 고온초전도 케이블 단면도

냉각시스템은 그림 2와 같이 냉동기와 펌프 등을 설치하여 액체질소를 강제 순환시키는 closed-loop 형태의 시스템으로 검토하였다.

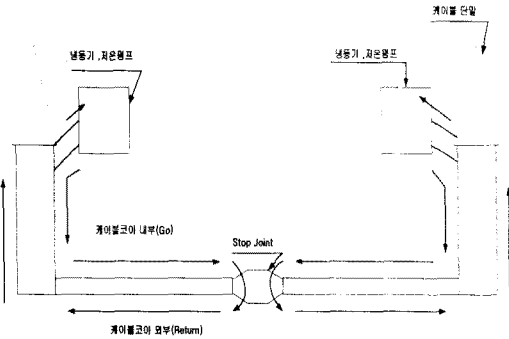


그림 2. 초전도케이블 냉각시스템의 개념도

또 송전전압을 154 kV로 설정하고 국내에 포설된 관로의 직경인 200 mm  $\phi$  내에 설치 가능한 케이블의 사이즈와 용량을 검토하였으며 개념설계조건을 요약하면 표 1과 같다.

표 1. 주요 설계 조건

항목	내용
기본구조	3상일괄형
송전전압	154 kV
선재	Ag sheath Bi2223 테이프 $J_c = 1 \times 10^5$ A/cm <sup>2</sup>
도체설계전류	정격전류 $\times 1.5$
내전압레벨	기준충격전압 : 750 kV 설계스트레스 55 kV/mm
절연 (저온절연방식)	액체질소함침 복합절연 PPLP + LN <sub>2</sub>
단열방식	초열절연방식
냉각거리	2.5 km (OF cable 참조)
최대온도상승	15 K (65 K $\rightarrow$ 80 K)
허용압력손실	14 atm (20 atm $\rightarrow$ 6 atm)
단열관로의 최대외경	국내 포설 관로 기준이하 (200 mm $\phi$ )

### 3.2 고온초전도케이블 설계

#### 3.2.1 케이블코어 설계

케이블의 정격용량  $P_B$ , 정격전압  $V_B$ 를 정하면 정격전류  $I_B (= P_B / \sqrt{3} V_B)$ 가 정해진다. 통전도체의 외경  $D_1$ 은 전류밀도를  $J$ 로 하면,  $D_1 = I_B / \pi J$ 로 주어진다. 실드도체의 내경  $D_2$ 는 절연설계에 의해 정해진다. 즉 통전도체의 외경  $D_1$ 에 절연층의 두께를 더한 값이다. 여기에, 실드도체 및 skid wire의 값을 합한 것이 케이블코어 외경  $D_0$ 가 된다. Go pipe에서 나온 냉매가 되돌아가는 return pipe의 내경  $D_R$ 은  $D_R = D_0 \times 2.3$  (Jam ratio = 2.3)이 된다.

#### 3.2.2 케이블의 인덕턴스 및 캐패시턴스

초전도 케이블에서 도체전류가 만드는 자계는 외부로 누설되지 않도록 실드도체를 이용해 차폐하므로, 각 상간의 상호인덕턴스는 고려하지 않아도 된다. 따라서 인덕턴스는 통전도체와 실드도체와의 상호인덕턴스로서 주어진다. 또한 캐패시턴스는 OF 케이블과 동일한 식으로

주어진다. 인덕턴스  $L$ 과 캐패시턴스  $C$ 는

$$L = 0.2 \times \ln(D_2/D_1) [\mu H/m] \quad (1)$$

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_s}{\ln(D_2/D_1)} \times 10^6 [\mu F/m] \quad (2)$$

여기에서,  $\epsilon_s$ : 유전체의 비유전율로 2.3으로 한다.

#### 3.2.3 초전도 케이블의 열부하

초전도 케이블에서 발생하는 열은 각 상의 통전도체 및 실드도체에서 발생하는 교류손실과 유전체손실 및 단열관로를 통해 침입하는 침입열로 이루어진다. 이들 중에서 교류손실은 식(3)에 의해 계산할 수 있다.

$$W = \frac{4\sqrt{2} \mu_0 I^3 f}{3 P_e^2 J_c} [W/m] \quad (3)$$

여기에서,  $I$ : 통전전류[A<sub>rms</sub>],  $f$ : 계통주파수[Hz],  $P_e$ : 도체 외주길이[m],  $J_c$ : 임계전류밀도[A/m<sup>2</sup>]이다. 위 식으로부터 임계전류밀도  $J_c$ 가 큰 초전도체가 교류손실이 적어 유리함을 알 수 있다.

전기절연층에서 발생하는 유전손은 상전도 케이블의 유전손 계산식을 적용할 수 있으며, 식(4)로 표현된다.

$$W_{DI} = 2\pi f C \frac{V_B^2}{3} \tan \delta [W/m] \quad (4)$$

여기에서,  $V_B$ 는 정격전압[kV],  $\tan \delta$ 는 유전체의 유전정접으로서  $10^{-3}$ 으로 한다.

단열관로를 통한 침입열은 상온공간으로부터 return pipe의 냉매로 침입하는 것으로, 이 양을 적게 하여야 한다. 침입열을 일정한 이하로 하기 위한 열절연층의 열전도율은 식(5)로 계산할 수 있다.

$$\lambda = \frac{W \ln(D_o/D_r)}{2\pi \Delta T_2} [W/mK] \quad (5)$$

여기서  $\lambda$ : 열절연층의 열전도율[W/mK],  $W$ : 열절연층을 통한 침입열[W/m],  $D_o$ : 열절연층의 외경[m],  $D_r$ : Return pipe 외경[m],  $\Delta T$ : 액체질소와 return pipe와의 온도차[K]이다.

### 3.3 개념설계 결과

그림 1에 표현한 케이블의 기본구조를 대상으로 154 kV 고온초전도 전력케이블을 설계하였다. 액체질소의 온도와 압력 조건에 따라 케이블의 크기와 손실을 계산한 결과를 그림 3에 나타내었다. 이 결과에 의하면 현재 전력계통에 사용중인 관로의 크기를 기준으로 할 때 200mm  $\phi$ 의 관로에 적용 가능한 케이블은 1~3GVA급이며 교류손실은 0.8~6[W/m]이다

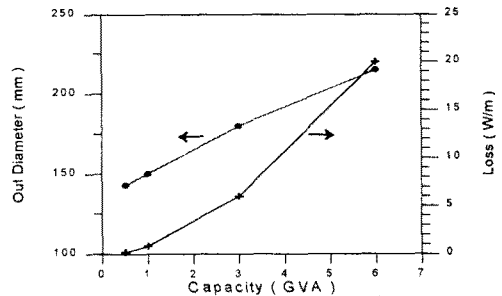


그림 3. 케이블 용량과 외경, 손실과의 관계

#### 4. 기존 및 초전도 송전시스템의 경제성 비교

##### 4.1 기존 확장안

검토 대상연도인 2015년, 2025년 및 2035년 서울지역의 확장안(기존의 확장방법 : 선로 및 변압기가 자기용량의 80%를 초과할 경우 동일지역간을 동중선로로 신설을 가정)을 분석한 결과, 서울 외곽의 남동부에 위치한 345kV 변전소와 중심지역 간 선로에 보다 많은 선로확장이 필요하며 중앙부에 위치한 345kV/154kV 변전소와 도심지역에 위치한 변전소 간을 연결하는 선로의 확장이 필요한 것을 알 수 있었다.

표 2. 검토연도별 서울지역 선로수(기존확장안)

연도	2005년	2015년	2025년	2035년
선로수	286	348	428	549
증가율	-	21.7%	23%	28.3%

##### 4.2 초전도케이블을 포함한 확장안

동부↔중심지역 간에 대해 초전도케이블을 적용한 경우 및 중부↔중심지역 간에 대해 초전도케이블을 적용한 경우의 결과를 정리하면 표 5-4와 같다. 이 표에서 알 수 있듯이 초전도케이블 적용시 두가지 방안(동부↔중심 및 중부↔중심)을 비교한 결과 중부↔중심 지역간이 확장선로수 측면에서 다소 유리한 것으로 나타났다. 이러한 원인은 중부↔중심 지역간이 위치적으로 거리가 가까워 상대적인 임피던스가 작기 때문으로 분석된다.

표 3. 검토연도별 선로수(초전도케이블 적용시)

항목	연도	2005	2015	2025	2035
		선로수	-	308	350
동부↔중심	증가율	-	-	13.6%	26.6%
	선로수	-	291	341	422
중부↔중심	증가율	-	-	17.2%	23.8

#### 4.3 선로손실 비교분석

##### 4.3.1 비교분석 방법

기존의 확장(안)의 경우와 초전도케이블을 포함한 확장(안)의 경우를 선로손실과 투자효과 측면에서 상호 비교하였다. 검토 과정을 흐름도로 나타내면 다음의 그림4와 같다.

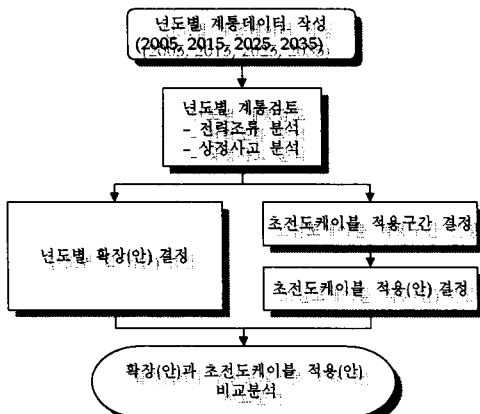


그림 4. 계통구성 비교검토방법의 흐름도

#### 4.3.2 선로손실 비교 결과

이상의 계통구성 비교검토 결과를 선로손실측면에서 정리하면 표 4와 같다.

표 4. 검토연도별 서울지역 선로손실

항목	연도	2005	2015	2025	2035
		선로 손실 [MW]	54	89	130
기존 확장안	동부↔중심	-	86	126	201
	중부↔중심	-	85	125	199

##### 4.4 투자회피 효과

장기전력 수급계획에 따라 분석한 결과 2010년부터 동부 지역과 도심부에 고온초전도 전력케이블을 도입하였을 경우 선로 감소량과 이에 따른 투자회피 금액은 다음 표 5와 같다.

표 5. 고온초전도케이블 도입에 따른 투자회피 효과

구분	연도	2010년	2015년	2020년	2025년	2030년
		선로감소량	42	52	70	82
길이 (km/년)	168	208	280	330	450	
	투자회피 금액(원)	8,500억	1조5백억	1조4천억	1조6천억	2조2천억

## 5. 결론

본 연구에서는 국내에서 아직 개발되지 않았고 세계적으로도 아직 개발이 진행중인 고온초전도 전력케이블 시스템에 대하여, 본격적인 연구개발을 추진하기에 앞서 사전 타당성 조사를 수행하였다. 개발에 성공할 경우 전력산업 뿐 아니라 우리 나라 경제 전반에 커다란 파급효과를 가져올 수 있을 것으로 예상되는 154kV 1000 MVA급 고온초전도 전력케이블 시스템에 대한 개념설계를 시도한 결과, 삼상일괄형으로 설계할 경우 최대의경이 150mm 정도이어서 국내 기존 지중관로인 직경 200mm 관로를 활용하여 신증설 공사가 가능한 것으로 나타났다. 한편 초전도 송전 시스템의 경제성을 평가하기 위하여 기존 케이블 확장안의 경우와 초전도 케이블을 포함한 확장안의 경우를 소요선로수 및 송전손실 측면에서 비교하였다. 그 결과는 선로 절감효과가 30% 정도였고, 송전손실은 약 3.5%의 절감효과를 보였다. 또한 장기전력 수급계획에 따라 분석한 결과 2010년부터 경인 지역에 고온초전도 전력케이블을 도입할 경우 선로 감소량과 이에 따른 투자회피 금액은 각각 168km와 8,500억원 규모에 이르렀다. 이러한 결과는 우리나라도 고온초전도 케이블 연구개발을 서둘러야 한다는 사실을 뒷받침해 주고 있다.

#### [참고 문헌]

- [1] Jeonwook Cho, Ki-Chul Seong, Kang-Sik Ryu, Tae-Kuk Ko, "A Design and Tests of HTS Power Cables and Feasibility Study of HTS Power Transmission System in Korea, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp1150-1153, 2000
- [2] 한국전력공사 전력연구원, "고온초전도 선재를 이용한 전력케이블 개발의 타당성평가 및 중장기 개발계획 수립", 2000
- [3] A.M. Wolsky, "Recent Progress toward HTS Cable", ExCo Meeting of IEA HTS Program, April, 1999, Germany
- [4] 한국전력공사 전력연구원, "초전도 케이블 및 송전 시스템 개발, 1998
- [5] 岩田良浩, "초전도 케이블 연구개발의 현상과 과제", 電氣評論, pp. 30-34, Dec. 1998