

고온초전도 전력케이블 설계 및 계통적용

조전욱, 성기철, 김해종, 이언용, 류강식, 박종수
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, *에너지관리공단

Conceptual Design and Application of HTS Power Transmission Cable

J.W.Cho, K.C.Seong, H.J.Kim, E.Y.Lee, K.S.Ryu, J.S.Park
Korea Electrotechnology Research Institute, Applied Superconductivity Lab.
* Korea Energy Management Corporation

jwcho@keri.re.kr

Abstract - In recent years, there is a growing needs for large capacity underground power transmission lines with the increasing demand of electric power in the urban area, where various environmental limitations are imposed on the overhead transmission lines. But it is difficult to get the space for the underground power transmission cables because of complicated distributions of underground public facilities such as subway, water pipes, gas etc. As the superconducting power cables have the large power transmission capacity, the high power transmission density, and low loss characteristics in comparison with a conventional cable, it would be a solution to meet the increased power demand. In this paper, the results of the conceptual design and analysis of power system of HTS power transmission cable is described.

케이블 용량증대가 연구되고 있으나 이러한 종래의 기술로는 한계가 있을 수밖에 없다. 따라서 가장 이상적인 신송전방식으로서, 위에서 언급한 전력수요 문제해결 및 고밀도 전력수송이 가능한 고온초전도 전력케이블 개발이 시급하다.

고온초전도케이블은 현재의 Cu케이블에 비해 대전류를 흘릴 수 있을 뿐 만 아니라, 교류손실이 종래 케이블에 비하여 1/20로 극히 작으며 송전용량 또한 현재보다 수배이상 증가시킬 수 있어 일본, 미국 등의 외국에서 많은 연구개발이 진행되어⁽²⁾ 1GVA의 송전용량에서도 기존의 케이블과 비교하여 경제성이 있는 것으로 예측하기도 한다. 특히 Pirelli Cables & Systems 주관으로 2000년에 미국의 Detroit Edison사의 변전소지하에 고온초전도 전력케이블을 설치하여 2000년 중반부터 실운전을 실시하여 2001년부터 상업화를 추진할 계획으로 이의 실용화가 가까웠음을 알 수 있다.⁽³⁾

본 논문에서는 이와 같은 고온초전도 전력케이블의 개념설계 및 계통적용 연구결과에 대하여 기술한다.

2. 본 론

1. 서 론

우리 나라의 전력수요는 1997년 35.8GW에서 10년 후인 2010년경에는 67.4GW로 현재의 약 2배정도 증가할 것으로 예상되고 있으며,⁽¹⁾ 특히 대도시에서는 빌딩의 집중, 도시기능의 고도화에 따라 전력 수요가 도심부에 대량 집중되는 현상이 발생되고 있다. 따라서 이와 같은 전력수요의 고밀도화에 대한 대책으로 지중케이블을 대용량화하거나, 복수회선을 신·증설하고 있으나, 도심부에는 지하철, 통신, 수도, GAS 및 빌딩 등에 의해 점유되어 지중케이블용 관로 및 전력구 등을 확보하는데는 어려운 문제가 매우 많다.

또한 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방법으로 고전압화와 강제냉각방식 등의 적용에 의한

2.1 고온초전도 전력케이블 개념

2.1.1 초전도케이블의 기본구조

본 개념설계에서 대상으로 한 고온초전도케이블의 기본구조는 3상 케이블코어를 하나의 극저온 단열관로에 넣는 구조로 POF 케이블과 유사한 구조를 갖는다. 케이블코어는 형상을 유지하며 냉매의 통로역할을 하는 former (go pipe)와 전류를 흘리는 통전도체층(고온초전도 도체) 및 전기절연층, 자기차폐를 위한 차폐층(고온초전도 도체)으로 구성되며 그 기본구조를 그림1에 나타내었다.

2.1.2 초전도케이블용 도체

초전도케이블용 도체는 임계전류밀도가 높고, 장치화가 가능하고 기계적 특성이 우수하여야 하

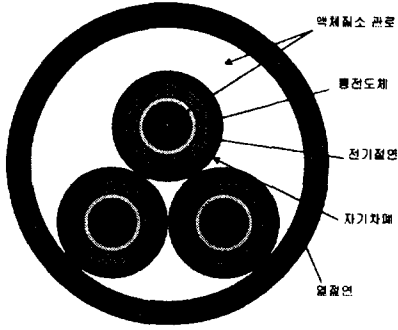


Fig.1. Cross-section of HTS power transmission cable

며 전기적, 화학적으로 안정하여야 한다. 초전도 케이블용 도체로서 제일 유력한 선재는 Bi계 2223 Ag sheath 도체로서, 현재 임계전류밀도가 $\sim 10^4 \text{A/cm}^2$ 수준이지만 조만간 임계전류밀도가 10^5A/cm^2 이상 도달할 것으로 예상하고 설계를 하였으며, Bean Model을 이용하여⁽⁴⁾ 손실을 계산하였다.

$$W = \frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{\mu_0 I^3 f}{P_e^2 J_c} \text{ [W/m]} \quad (1)$$

여기서 I 는 통전전류[A], f 는 계통주파수[Hz], P_e 는 도체주위길이[m], J_c 는 임계전류밀도 [A/m^2]이다.

2.1.3 전기절연

고온초전도 케이블의 전기절연방식은 액체질소와 절연지에 의한 복합절연방식을 가정하였다. 본 설계에서는 전기절연층의 두께를 계산하기 위하여 설계최대전계는 77K, $1 \text{kg/cm}^2 \text{G}$ 에서 케이블의 부분방전소멸전계값에 마진을 두고 다음 식에 의해 계산하였다.

$$E_{\max} = \frac{V}{r \ln(R/r)} \text{ [kV/mm]} \quad (2)$$

E_{\max} : 최대전계(kV/mm), V :인가전압(kV), r :절연내반경(mm), R :절연외반경(mm)

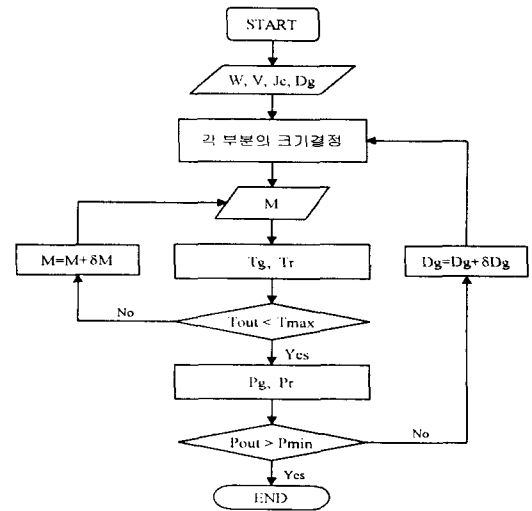
2.1.4 자기차폐

초전도체의 임계전류는 자장에 대하여 이방성으로 C축에 평행방향의 자장이 인가되면 임계전류가 저하된다. 고온초전도 케이블코아의 도체배열은 SZ배열로 도체의 자기자장은 C축에 수직이기 때문에 임계전류의 저하는 작지만 3상의 경우는 다른 상에서 유기되는 자장에는 C축성분이 포함되어 있기 때문에 임계전류를 크게 저하시킨다. 또한 초전도케이블은 대전류를 통전시키기 때문에 단열관로에서의 와전류가 발생하여 열손실이 커지게 된다. 이와 같은 이유로 각각의 케이블코아에 차폐도체층을 두어 케이블코아 밖으로의 누설자계를 차폐하여야 한다.

2.2 케이블코아의 설계

2.2.1 개념설계 조건

고온초전도 케이블코아의 설계는 케이블의 구조, 구성방식 등에 따라 차이가 있겠지만 본 논문에서 대상으로 한 고온초전도 케이블코아는 내부에 통전용 초전도도체와 외부에 shield용 초전도도체를 나선형으로 감아 유연성을 갖는 구조로 설계하였으며, 케이블시스템은 냉동기와 펌프 등을 설치하여 액체질소를 강제 순환시키는 closed-loop형태의 시스템으로 검토하였다. 케이블코아의 설계를 위한 Flow chart는 그림2와 같다.



W :정격용량, V :정격전압, J_c :임계전류밀도, D_g :go pipe 직경, M :액체질소유량 T_g :go pipe의 온도, T_r :Return pipe의 온도, T_{\max} :허용최고온도, P_g :go pipe의 압력 P_r :Return pipe의 압력, P_{\min} :허용최저압력

Fig.2. Flow chart of cable design

케이블시스템이 운전되는 온도와 압력에 대해서는 허용최고온도를 T_{\max} , 허용최저압력을 P_{\min} 이라고 설정하고 냉동시스템에서 나와 케이블시스템을 순환한 액체질소는 도체의 교류손실 및 외부의 열침입 등에 의해 온도상승(ΔT)하며 냉매의 유로길이에 비례하여 ΔP 의 압력손실이 발생한다. 즉 냉동시스템 시작점에서의 온도와 압력을 T_{in} , P_{in} , 냉동시스템으로 돌아온 액체질소의 온도와 압력을 T_{out} , P_{out} 이라고 하면 식(3)이 성립한다.

$$\begin{aligned} T_{out} &= T_{in} + \Delta T \\ P_{out} &= P_{in} - \Delta P \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 액체질소의 상태에 대한 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{out} &< T_{\max} \\ P_{out} &> P_{\min} \end{aligned} \quad (4)$$

이상의 액체질소의 조건과 함께 송전전압을 154kV로 설정하고 국내에 포설된 관로의 직경인 200mm ϕ 내에 설치 가능한 케이블의 사이즈

와 용량을 검토하였다. 기본구조는 그림1과 같이 3상일괄형으로 하고 도체는 Ag sheath 테이프 선재를 나선형으로 감고 임계전류밀도는 직류에서 $1 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 로 가정하고 임계전류가 정격전류의 1.5배 이상으로 하였으며 개념설계조건을 요약하면 표1과 같다.

표1. 주요설계조건

항 목	내 용
기본구조	3상일괄형
송전전압	154kV
선재	Ag sheath 테이프 $J_c = 1 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
도체설계전류	정격전류 x 1.5
내전압레벨 (15)	기준충격전압 : 750kV 설계스트레스 55kV/mm
절연	액체질소함침 복합절연 PPLP + LN ₂
단열방식	초열절연방식
냉각거리	2.5km (OF cable 참조) ⁽⁶⁾
최대온도상승	15K (65K → 80K)
허용압력손실	14atm(20atm→6atm)
단열관로의 최대외경	국내포설관로 기준이하 (200mm ϕ) ⁽⁷⁾

2.2.2 개념설계 결과

그림1에 표현한 케이블의 기본구조를 대상으로 154kV 고온초전도 전력케이블을 설계하였다. 액체질소의 온도와 압력 조건에 따라 케이블의 크기와 손실을 계산한 결과를 그림3에 나타내었다. 개념설계 결과와 같이 현재의 전력계통에 사용중인 관로의 크기를 기준으로 할 때 200mm ϕ 의 관로에 적용 가능한 케이블은 1~3GVA급이며 교류손실은 0.8~6(W/m)이다

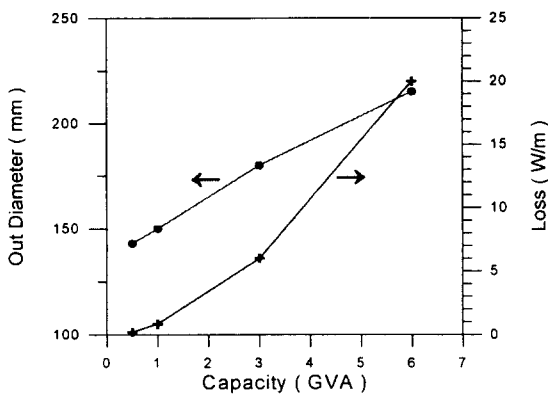


Fig.3. Results of conceptual design

2.3 계통검토

초전도케이블이 가지고 있는 기술적 우수성인 고밀도·대용량송전의 장점을 살리기 위하여 본 논문에서는 다음 사항을 고려한 구성방안을 검토하였다.

- (1) 기존 전력계통과 연계구성 방법

초전도케이블로 대용량의 전력수송이 이루어지고, 이와 연계된 기존 전력계통의 확충이 최소가 되도록 구성

- (2) 적용시기 검토방법

향후 전력수요가 포화될 것으로 예측되는 2030년까지 검토

2.3.1 장기전력수급 시나리오

서울지역의 최대전력수요를 예측하면 표2에서와 같이 지속적인 성장이 예측되고 있다⁽¹⁾.

표2. 장기 최대전력수요 예측(단위:GW)

구분 \ 년도	2000년	2005년	2010년	2015년
전국수요	40,438	55,426	67,398	76,036
서울수요	8,938	12,138	14,626	16,498
점유율[%]	22.1	21.9	21.7	21.7

경인지역의 전력수급을 전망하면 그림4와 같이 영동 및 중부지역의 발전단지로부터 765kV 송전선로로 대규모 전력이 유입되고, 이와 함께 서해안 도서지역의 대규모 발전단지로부터 대규모 전력이 유입될 것으로 예견되고 있다.⁽⁸⁾

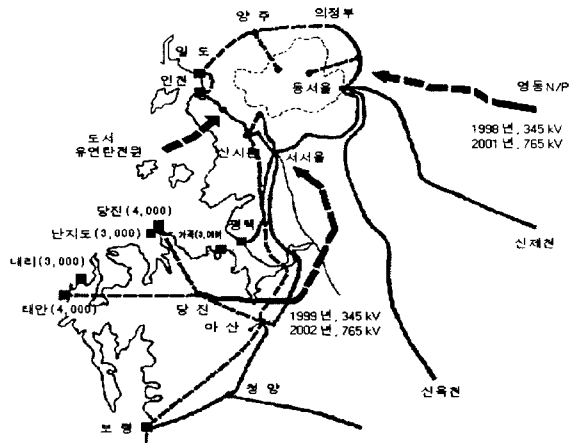


Fig.4. Power system planning in Kyung-In area near the future.

이에 따라 지중케이블도 확충되고 있으나 중장기적으로는 지하철·통신·수도·Gas 등 조밀화된 지하공간에 새로운 관로 및 전력구를 건설하는 것은 곤란하리라고 예측되고 있다. 따라서 유입전력을 도심부로 분산 수송하는 문제는 향후 해결해야할 중요한 문제가 되고 있다.

2.3.2 계통검토 전제조건

계통검토를 위해 현재 실 계통에서 운전 중인 계통데이터⁽⁹⁾를 참조하여 향후 확장설비들에 대한 설비정수를 결정하였으며, 본 검토를 위한 전력수급 전제조건은 다음과 같이 가정하였다.

(1) 전력기기 정수

① 발전기정수

운전중인 계통데이터를 참조한 100MVA기준 %Z를 사용하였으며, 발전단의 Step-up변압기의 %Z는 5%로 한다.

② 변압기정수

종류	용량	%Z
345/154kV변압기	500MVA	10%
154/22.9kV변압기	60MVA	10%

③ 송전선로정수

전압 (kV)	종류	정상분[%/km]			영상분[%/km]		
		R ₁	L ₁	C ₁	R ₀	L ₀	C ₀
345	가공선 483'x4	0.002	0.026	0.627	0.012	0.074	0.218
154	케이블 1,200'	0.007	0.054	4.5	0.03	0.024	1.762
	초전도케이블	0.0	0.015	2.504			

(2) 전력수급 전제조건

① 부하배분은 발전소내 소비 및 손실을 고려하여 발전단 부하의 92%를 고려하고, 역률은 90%로 가정함.

② 변전소의 표준 Bank용량 및 수는 다음과 같이 설정함.

- 345kV변전소 : 500MVA x 4뱅크
- 154kV변전소 : 60MVA x 4뱅크

③ 송전선로 확장 기준은 전력조류가 선로용량을 100%초과할 경우 동종의 선로를 동일구간에 병렬로 증설하고, 1회선 사고를 고려함.

2.3.3 계통검토 방법

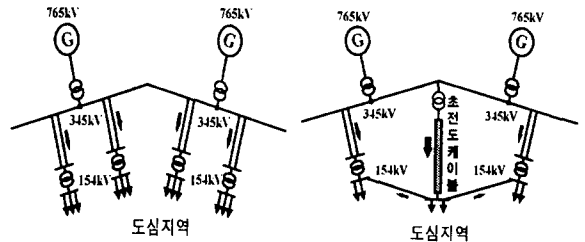
본 연구에서는 초전도케이블의 적용가능성 검토가 목적이기 때문에 향후 전력수급전망에 따른 발전 및 부하배분을 한 후, 정상운전시와 상정사고시 선로 과부하가 발생하지 않도록 계

통을 구성하여 기존의 확장에 의한 방법과 초전도케이블을 적용할 경우를 상호 비교함으로써 적용 타당성을 검토하였다.

2.3.4 결과 분석

초전도케이블이 가지는 우수한 기술적 속성을 최대한 활용하며 동시에 기존의 송전계통과의 연계성을 고려하면 그림6과 같은 계통구성이 검토될 수 있다.

즉, 초전도케이블에 의한 대규모 유입전력은 도심에서 필요한 전력수요를 공급함으로써 변두리 지역으로부터 도심지역까지의 송전선을 절감할 수 있다.⁽¹⁰⁾



a) 기존 확장안 b) 초전도케이블 도입안

Fig.6. Conceptual planning of power system

장기전력수급 시나리오에서와 같이 대규모 전력이 유입되는 지역과 도심간 즉, 동부지역⇒도심지역간, 남부지역⇒도심지역간, 서해도서지역⇒도심지역간의 세 가지의 경우가 상정될 수 있으나, 본 검토에서는 이 중에서 가장 유력할 것으로 예상되는 동부지역⇒도심지역간의 경우를 검토한 결과는 표3과 같다.

표3. 검토결과

(동부⇒도심간 초전도케이블 포설의 경우)

검토 년도	경인지역 송전선로수	선로	감소량 [%]
	기존확장안	초전도도입안	
2010	325	308	17
2015	353	332	21
2020	375	347	28
2025	408	375	33
2030	461	416	45

즉, 10년 후인 2010경 동부지역과 도심지역 간에 초전도케이블을 설치할 경우, 설치후 연간 20km 이상의 지중 송전선로 억제효과는 물론 부지 및 건설비용을 제외하고도 연간 천억원 이상의 비용을 절감할 수 있으며, 송전손실도 2.9% 감소되는 것으로 분석되었다. 따라서 송전에 필요한 부지문제를 해결할 수 있고, 손실이 적어 향후 도심지역에서의 전기에너지의 안정적 공급을 위한 대용량 고밀도 송전기술임을 확인할

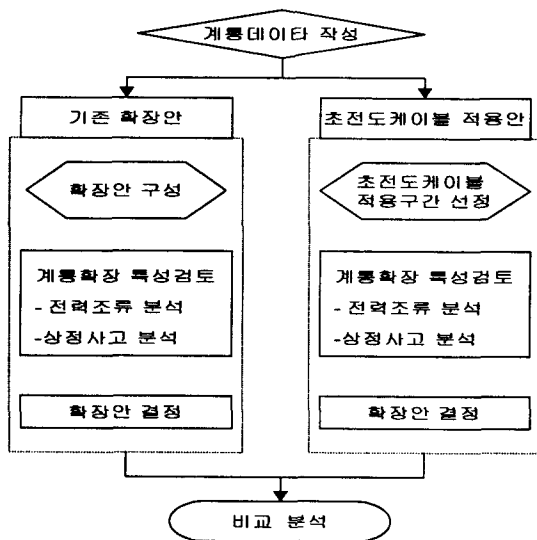


Fig.5. Flow chart of analysis power system

수 있었다.

3. 결 론

고온초전도 전력케이블의 개념설계 결과 현재의 전력계통에 사용중인 관로의 크기를 기준으로 하여 200mm ϕ 이내에 적용 가능한 케이블은 1~3GVA급 규모임을 확인하였다.

2010경 동부지역과 도심지역간에 초전도케이블을 설치할 경우, 설치후 연간 20km 이상의 지중 송전선로 억제효과는 물론 부지 및 건설비용을 제외하고도 연간 천억원 이상의 비용을 절감할 수 있으며, 송전손실도 2.9% 감소되는 것으로 분석되었다.

현재 한국전기연구소에서 고온초전도케이블의 상세설계 및 요소기술 연구를 진행하고 있으나 향후 국내에서도 케이블코아 및 단말, 접속부 등 고온초전도 전력케이블 개발에 필요한 기술을 확립하여 실 계통적용과 미래의 전력수요증가에 대비하여야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] "전력분야통계", 산업자원부, 1998
- [2] International Workshop on High-Tc Superconducting Power Transmission Cables, IEA Workshop, April 1997
- [3] "Super cool in Detroit", Modern Power Systems, 46, December 1998
- [4] T.Hara, et al., "Feasibility study of compact high-Tc superconducting cables", IEEE Tran. on Power Delivery, Vol.7, No.4, 1745, 1992
- [5] 電氣協同研究會, 絶縁設計合理化専門委員會 : 絶縁設計の合理化, 電氣協同研究, 第44卷 第3號, 225-258, 1988
- [6] 飯塚喜八郎 電力ケーブル技術ハンドブック, 543, 1989
- [7] 한국전력공사, 지중송전선 설계기준-1610, 1997
- [8] "向後 大電力輸送을 爲한 長期系統 構成對策에 關한 研究", 韓國電力公社 報告書, 1991
- [9] "系統運用資料集", 韓國電力公社, 1993
- [10] "超電導케이블 및 送電시스템 開發研究", 韓國電力公社 報告書, 1996