

고온초전도케이블의 계통적용을 위한 개념설계

최상봉*, 김대경*, 정성환*, 문영환* 성기철* 김학만*
한국전기연구원*

Review of the Conceptual Design for the use of the HTS Cable to Power System

Choi Sang Bong*, Kim Dae Kyeong*, Jeong Seong Hwan*, Young Hwan Moon* Seong Ki Chul*
Hak-Man Kim*
KERI*

Abstract - The necessity of compact high temperature super conducting cables is more keenly felt in densely populated metropolitan areas. As the compact high temperature superconducting cables that can be installed in ducts and tunnels can reduce construction cost and make the use of underground space more effective, the effect of introducing it to power system will be huge. For this study, Seoul, Korea is selected as a review model. the loads are estimated by scenario based on a survey and analysis of 345kV and 154kV power supply networks in this area. Based on this, the following items on urban transmission system are examined.

- (1) A method of constructing a model system to introduce high temperature superconducting cables to metropolitan areas is presented.
- (2) A case study through the analysis of power demand is conducted, and the amount of high temperature superconducting cable to be introduced by scenario is examined.
- (3) The economy involved in expanding existing cables and introducing high temperature superconducting cables(ducts or tunnels) following load increase in urban areas is examined and compared.
- (4) The maximum external diameter of HTS cable to accommodate exiting ducts based on the design standards for current cable ducts is calculated.
- (5) The voltage level that can be accommodated by existing ducts is examined.

1. 서 론

최근 들어 대도시의 정보화 및 인텔리전트화가 추진 되어 향후 전력수요의 증대가 예상된다. 한편 대도시 중심부의 전력공급은 경관의 향상 및 지상공간의 확보 곤란으로 인해 지하 송전선이 주류를 이루고 있다. 따라서 도시내에 전력공급 선로의 확충을 위해 지중송전선의 건설이 필요하다. 그러나 대도시내의 지하공간은 기존의 지하철, 통신, 수도, 빌딩 등으로 과밀화되어 있어 지중 송전선을 포설하기 위한 관로와 전력구를 건설하기 곤란할 것으로 예상된다. 또한, 현재 상황을 고려하면 지중 케이블 신설비용의 대부분을 전력구 건설과 같은 토목비가 차지하고 있는데 향후 토목비의 증가가 예상되어 송전비용이 동반 상승하게 될 것이다. 이와 같은 송전비용을 저감하기 위해서는 기설 관로를 대체하여 신설비용을 줄일 수 있는 소형 대용량 송전케이블의 필요성이 제고되고 있다.[1][2] [3][4] 이와 같은 면에서 고온 초전도 선재는 비교적 저렴한 액체질소로 초전도 상태를 유

지할 수 있을 뿐만 아니라 선재의 단위 면적 당 흐르는 전류(임계 전류밀도)를 구리와 같은 상전도 금속 선재와 비교하여 약 1,000배 이상 크게 흘릴 수 있는 장점이 있다. 이와 같은 고온 초전도 선재를 도체로 이용한 고온 초전도 송전 케이블은 대용량 송전을 소형화한 케이블로 실현할 가능성이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 고온 초전도 송전 케이블을 대도시 계통에 적용할 경우에 필요한 계통 모델링과 송전용량 그리고 전압계급에 대하여 구체적으로 검토하였다.

2. 본 론

2.1 현용 케이블 관로의 설계 기준

지중 케이블 종류별, 포설 방식별로 우리나라 지중 관로에 적용하기 위한 관 내경 설계 기준은 다음과 같다. 이때 관 내경은 케이블의 최대 외경, 장래의 용량증가, 경제성 등을 고려하여 선정한다.

- (1) 1공 1조 포설
 $D \geq 1.3 d, D \geq d + 30mm$ 를 동시에 만족해야 한다.
- (2) 1공 3조 포설
 $2.16d + 30mm \leq D \leq 2.85d$ 또는 $D \geq 3.15d$ 를 만족해야 한다.
즉, $2.85d < D < 3.15d$ 의 범위의 내경을 갖는 관을 사용하면 안된다.
단, D:관 내경(mm), d:케이블 최대 외경(mm)
- (3) 케이블 종류별 사용 관 내경은 다음 표 1를 표준으로 한다.

따라서 이와 같은 설계기준에 근거하여 3상 일괄형 HTS 초전도 케이블을 1공 1조로 기준 관로 200mmΦ에 수납하기 위한 케이블 최대 외경은 앞서 설명한 1공 1조 관로 설계 기준에 따라 최대 153mm로 산정된다.

표 1 케이블 종류별 표준사용 관 내경

선 종	도체규격	인 입 방식	관로내경	비 고
66kV 단심 XLPE케이블	400mm ²	1공1조	100mm	OF:유입 케이블
154kV 단심 OF케이블	2,000m ² 이하	1공1조 1공3조	200mm 300mm	
154kV 단심 XLPE케이블	1,200m ² 이하	1공1조	200mm	XLPE:가교 폴리에틸렌 전력케이블
	2,000m ² 이하	1공3조	300mm	
		1공1조	200mm	

2.2 콤팩트형 고온초전도 케이블의 개념설계

- (1) 케이블 송전용량의 검토

우리나라 기존의 계통의 경우, 345kV 변전소가 도심의 외곽에서 환상망으로 구축되어 이 변전소에서 도심의 154kV 변전소를 거쳐 320MW로 송전하고 있다. 그러나 이와 같은 시스템의 경우 매년 전력 수요의 증가율을 3.8%로 가정하면 30년 후에 현재의 3배의 용량을 송전할 필요가 발생된다. 그러나 대도시의 지하 공간은 지하철과 가스 그리고 수도·통신선 등 공공 매설물로 인해 지금도 과밀화된 상태이다. 따라서 향후 미래에 증가되는 부하에 대처하기 위해 현재의 상태에서 새로운 지중 케이블의 관로나 전력구를 확보하는 것은 기술적으로나 경제적인 측면에서 곤란할 것으로 예상된다. 한편, 기설 관로나 전력구에 GW급의 상전도 케이블과 금속제 초전도 케이블을 포설하기 위해서는 발열과 설계 면에서 냉각·단열 등에 대한 특별한 공법을 도입하지 않는 한 곤란할 것으로 예상된다. 이와 같은 면에서 고온 초전도 도체가 케이블용 선재로 실용화되면 발열이 거의 없고 단열층도 간단한 구조로 설계될 수 있기 때문에 기존 상전도 케이블과 금속제 초전도 케이블에 비해 케이블 외경을 줄일 수 있다. 이렇게 되면 기설 관로나 전력구를 이용하여 현재 사용중인 상전도 케이블을 고온 초전도 케이블로 교체하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 대도시에서는 계통의 신뢰도를 고려하여 통상 복수 루트의 케이블 계통으로 전력을 공급하는데 우리나라의 154kV의 경우, 통상적으로 1 루트 당 송전전력은 330MW 정도로 볼 수 있으며 전력 수요의 증가율을 3.8%로 가정할 경우 30년 후의 루트 당 증가는 약 690 MW로 볼 수 있다. (5) 또한 통상적으로 수요의 예측이 최대 20~30년인 경우를 고려하면 미래에 1루트 당 송전전력은 최대 1GW가 된다. 이 정도의 전력을 송전하려면 개발중인 400kV CV 케이블로도 송전이 가능하지만 케이블 외경이 365mm정도가 되어 200mmΦ의 기설 관로에 포설이 곤란하여 새로운 루트를 확보할 필요가 있다.

이상의 검토에서 알 수 있는바와 같이 고온 초전도 도체에 의해 소형화된 케이블이 개발되면 부하 증가에 따른 송전용량 증대시 다른 케이블로는 불가능한 기존 관로나 전력구를 이용한 교환이 가능하여 비용절감이 기대될 뿐만 아니라 도시 형성의 관점에서 지하 공간을 효율적으로 도모할 수 있는 장점이 있다.

(2) 케이블 계통 전압의 검토

모델 계통은 고온 초전도 케이블이 기존 관로에 포설하는 것을 전제로 하였기 때문에 이를 고려하여 케이블 계통 전압을 결정하여야 한다. 즉, 전압을 낮추면 절연층이 얇아지지만 전류가 증가하여 교류손실이 증대되기 때문에 이를 보상하기 위한 냉매 환경은 크게 된다. 역으로 전압을 높이면 냉매 환경은 작아지지만 절연층이 두꺼워진다. 결국, 초전도 케이블의 외경을 결정하는 요인은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 냉각관점에서는 전압이 낮을수록 더 많은 전류를 흘려 보내야 하기 때문에 교류손실이 증대되어 단열판을 크게 해야 한다.
- ② 절연관점에서는 전압이 낮을수록 케이블 외경이 작다.

따라서, 1GW의 송전용량에 다음 그림 1에서 도시한 바와 같이 66kV의 전압에서 케이블 외경이 130mmΦ로 가장 적고 그 다음으로 154kV의 전압에서 150mmΦ로 양쪽 모두 기존 관로 200mmΦ에 포설이 가능하다. 이때 필요한 J_c 는 $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 이다. 이상의 검토 결과 및 기존 계통의 전압계급에 154kV가 존재하는 것을 고려하여 케이블 전압계급은 154kV로 설정하는 것이 타당하다고 판단된다.

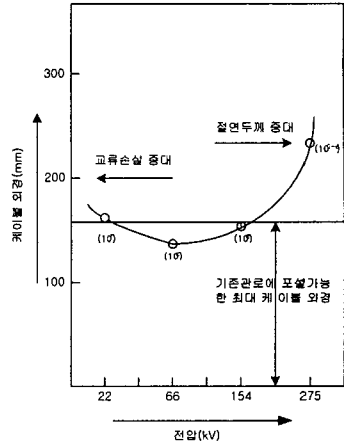


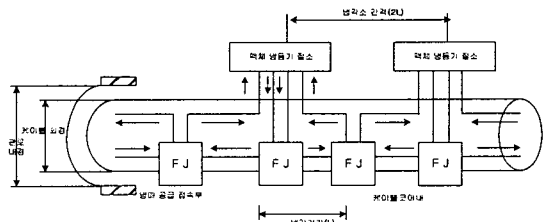
그림 1 전압별 고온 초전도 케이블 외경

(3) 케이블 냉각시스템의 검토

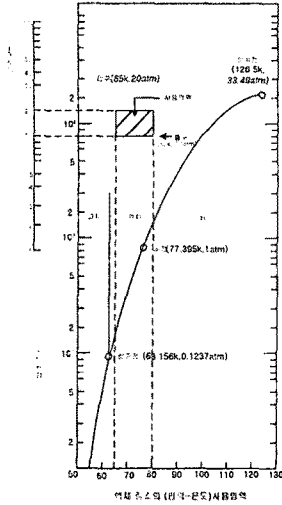
냉각 시스템을 중심으로 하는 고온 초전도 케이블 시스템의 전체 구조를 다음 그림 2(a)에 도시하였다. 냉동기내의 액체 질소는 냉매 공급 접속관을 통해 온도 65K, 압력 20 기압으로 케이블 코어부의 냉매 왕복관에 주입된다(6). 이때 냉매는 초전도 도체에서 발생한 손실 및 유전체 손실의 반을 흡수하여 2대의 냉동기의 중간에 설치된 냉매 공급 접속부(FJ)에 도달한다. 여기서 냉매는 다시 귀로관을 통해 자체 실드용 초전도체의 손실, 유전체 손실의 나머지 절반 및 외부로부터의 침입열을 흡수하여 냉동기로 되돌아온다. 출구에서는 온도 80K, 압력 10 기압을 확보하여 그림 2(b)에 도시한 바와 같이 케이블 냉각 시 액체 질소가 기화되지 않고 액체 상태로 순환하여 안정한 냉각을 할 수 있도록 한다. 또한 냉각소의 간격은 OF 케이블의 급류 조정소를 활용하여 5km로 한다. 냉각소의 간격을 이와 같이 짧게 하면 압력 손실의 억제 관점에서 유리하다.

(4) 1GVA HTS 초전도 케이블의 설계 계

전력케이블은 고온초전도의 응용 중에서 가장 유망한 항목중의 하나이다. 직류를 사용하는 장거리 초전도 케이블 개발은 예외로 하더라도 과밀 도시내에 교류를 이용하여 기존에 사용되고 있는 관로를 통해 전력을 전송할 수 있는 장점이 있다. 이를 위해 액체 질소를 이용한 고온 초전도 케이블이 고려되고 있다. 국내에 1GVA의 전력을 효율적으로 전송하는 방법으로는 3상 일괄형 형태의 케이블로서 154kV(단상 전류는 3.75kA)로 케이블 외경 150mm가 최적의 해인 것으로 판단된다. 이와 같은 형태의 케이블은 비스무스계(Bi) 2223은 시스템(테이프 상)을 고려하여 액체 질소 온도의 임계 전류 밀도를 10^6 A/cm^2 로서 설계를 행하며 설계 레를 다음 표 2에 도시하였다.



(a) 고온 초전도 케이블 냉각 시스템의 구성도



(b) 액체 질소의 압력-온도 사용영역 범위
그림 2 고온 초전도 케이블 시스템 구성도

표 2 1GVA 고온 초전도 케이블의 설계 레

케이블	형태	3상 일괄형
정격	정격 용량 정격 전압 정격 전류	1GVA 154kV 3.75kA
자재	입계 전류 밀도 통전도체상 자재	10 ⁹ A/cm ²
초전도선	사양	0.24mm ² × 3.8mm ²
절연층	방식	저온절연방식
크기	FORMA 내경 통전도체상 외경 셴드 도체 내경 케이블 코아 외경 내측 단열판 내경 내측 단열판 외경 외측 단열판 내경 케이블 최대 외경	22mm 30mm 42mm 46mm 112mm 120mm 143mm 150mm
손실	도체 손실 유전체 손실 외부 열침입열	1~3W/m 0.01W/m 1.01W/m
액체 질소 냉각	냉각 거리	왕복 5km

3. 결 론

- 다음은 본 논문의 결과와 특징을 요약하여 설명하였다.
- (1) 광로형 소형 고온 초전도 케이블의 대도시 계통 적용을 위한 모델 계통 구성에 대하여 검토하였다.
 - (2) 지중 케이블 종류별, 포설방식 별로 표준사용 관내경에 대하여 조사하였으며 그 조사 결과를 근거로 HTS 케이블을 기존 관로에 수납하기 위한 케이블 최대 외경을 산출하였다.
 - (3) 우리나라 전력시스템의 전력수요 증가율을 고려하여 30년 후의 대도시 지역에 적용 가능한 HTS 케이블의 송전용량을 검토하였다.
 - (4) 냉각관점과 절연관점을 고려하여 고온 초전도 케이블의 전압계급별 케이블 최대 외경을 산출하여 국내 기존 관로에 포설 가능한 전압계급을 검토하였다.
 - (5) 냉각 시스템을 중심으로 하는 HTS 케이블 전체 시

스템의 구성을 검토하였다.

(6) 검토된 전압계급과 송전용량을 기준으로 고온 초전도 케이블의 설계 예를 제시하였다.

[참고문헌]

- (1) 최상봉 외, "소형 고온 초전도 전력케이블의 기대효과와 경제성 평가", 한국초전도·저온공학회 3권 2호, 2001년 11월, pp. 10-14
- (2) Tsukushi Hara et al, "Engineering Evaluation of High-Tc Superconducting Cables by Bean Model and its Assessment of Application to Urban Power System", TIEE, Japan, Vol 110-B, No 1., 1990 pp. 58-66
- (3) Hideo Ishii, "Assessment of compact High-Tc Superconducting AC Power Cable and its Application", JIEE, Vol 33, No 3., 1988 pp. 145-151
- (4) Haruhito Taniguchi, "Expectation of Superconductivity Application to Power System", 平成 11年 電氣學生全國大會, 1999
- (5) Sang Bong Choi et al, "Long-term Load Forecasting in Metropolitan Area considering Economic Indicator", Trans. KIEE, Vol 49B, NO. 8, 2000.
- (6) Takeyoshi Kato et al, "Evaluation of total Transmission Loss and Refrigerating Energy to operate Superconducting Cables in a Future Metropolitan Electric Power System", T. IEE Japan, Vol.114-B, No. 12, 1994.