

Life-cycle 비용 산정을 통한 초전도케이블 경제성 검토

김종율, 이승렬, 윤재영

한국전기연구원

A Economic feasibility of HTS cable by estimating the Life-Cycle cost

Jong Yul Kim, Seong Ryul Lee, Jae Young Yoon
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - As power demand increases gradually, the call for underground transmission system increases. But it is very difficult and high in cost to construct new ducts and/or tunnels for power cables in metropolitan areas. HTS (High Temperature Superconducting) cable has the several useful characteristics such as increased power density, stronger magnetic fields and/or reduced losses. Therefore HTS cable can allow more power to be moved in existing ducts, which means very large economical and environmental benefits. In these days, companies world-wide have conducted researches on HTS cable. A development project for a 22.9kV class HTS cable is proceeding at a research center and university in Korea. In this paper, we investigate the expected price of HTS cable to have a merit in viewpoint of economic aspect. First, life-cycle cost of conventional cable is calculated and based on this, the expected price of HTS cable is evaluated, which HTS cable is competitive against conventional cable.

1. 서 론

1986년 고온초전도체(HTS : High Temperature Superconductor)가 발견된 이후 초전도를 의료, 수송, 에너지 등 다양한 분야에 응용하기 위한 연구가 활성화되기 시작하였다. 액체질소를 냉각매체로 이용하는 고온초전도기술은 액체헬륨을 사용하는 종전의 저온초전도체(LTS : High Temperature Superconductor) 보다 가격 측면에서 경쟁력이 있고 실제 적용에 있어서도 상대적으로 실용성이 높다. HTS 기술의 다양한 적용분야 중에서도 특히 전력분야에 대한 적용연구가 1990년대 중반 이후 크게 활발해졌는데 그 이유는 초전도 전력기기를 전력계통에 적용하면 전력손실 저감, 환경측면에 이익향유 및 계통운영의 효율성을 향상시킬 수 있기 때문이다 [1-3]. 즉, 초전도한류기, 초전도케이블, 초전도변압기와 같은 고온초전도 전력기기는 기존 상전도 전력기기에 비해 용량증대, 손실저감, 환경보호, 설비임지 감소 등 여러 측면에서 많은 장점을 지니고 있다. 그러나, 현재 시점에서는 초전도 전력기기의 경제성이 상대적으로 낮고 신뢰성이 대한 의문 때문에 실제 적용상에 많은 장애가 놓여있는 실정이다. 초전도기기를 전력계통에 적용할 때 고려하는 신뢰성 문제는 향후 해당 기기의 상용화 개발 완료단계에서 검토되어야 할 사항으로 판단된다. 이는 향후 개발될 초전도기기가 전력계통에서 요구하는 시험규격을 만족하는지 여부에 따라 판단되어지는 문제이기 때문이다. 따라서, 초전도기를 개발 중인 현 시점에서 초전도기기의 신뢰성 문제를 논하는 것은 성급한 논의라고 생각된다. 그에 반해, 경제성 검토는 가장 기본적인 상위개념에서 초전도기기의 계통적용 가능성을 좌우하는 근거가 되므로 가장 최우선적으로 검토되어야 한

다. 그러나, 초전도기술 자체의 특성상 급격한 기술개발로 인해 현 상태에서 미래에 개발될 것으로 예상되는 초전도기기의 정확한 비용요소(정격사양, 부피, 손실, 가격 등)를 산정하기는 매우 곤란하다. 또한, 미래 전력계통의 불확실성 및 계통측면의 적용관점 다양성 등을 고려한다면 현 시점에서 타 대안과의 직접적인 경제적 편익을 논하는 것은 곤란하다. 그러므로, 본 논문에서는 현실적으로 타당성이 상대적으로 높은 초전도케이블 계통적용방안을 토대로 초전도케이블이 상전도케이블 대비 가격 경쟁력을 가지기 위한 시장진입 가격 수준을 산정하였다.

또한, 본 논문에서는 상전도 케이블 1회선을 동일용량의 전압계급이 낮은 초전도 1회선 케이블로 적용하는 방안을 검토대상으로 선정하였으며 345kV 상전도케이블을 154kV 초전도케이블로 대체 또는 154kV 상전도케이블을 22.9kV 초전도케이블로 대체하는 경우에 대하여 각각 시장진입 가격을 산정하였다.

2. Life-Cycle 비용 산정

2.1 초기투자 비용

(케이블 가격 및 설치비용)

케이블 가격은 상전도 케이블의 경우 22.9kV CN-CV 325mm² 케이블 0.54억 원/C-km, 154kV XLPE 2000mm² 케이블 6.31억 원/C-km, 345kV OF 2000mm² 케이블 16.07억 원/C-km으로 산정하였다. 상전도 케이블 설치비용의 경우 154kV 케이블의 경우 0.58억 원/C-km, 345kV 케이블인 경우 0.78억 원/C-km으로 산정하였다[4]. 초전도케이블 경우는 동일한 전압계급의 상전도 케이블 설치비용보다 약 20%정도 비싼 것으로 가정하여 22.9kV 초전도 케이블은 0.282억 원/C-km, 154kV 초전도케이블은 0.696억 원/C-km으로 산정하였다. 동일 전압계급의 초전도케이블 설치비용을 상전도 케이블 보다 다소 높게 선정한 이유는 초전도케이블의 냉각설비 설치에 따른 추가적인 비용을 반영하였기 때문이다.

(토목공사비용)

토목공사비의 경우 한전 건설단가를 적용하여 관로식인 경우 22.9kV 3.58억 원/km, 154kV 10억 원/km, 개착식 전력구인 경우 154kV는 51억 원/km, 345kV는 70억 원/km로 산정하였다[4].

2.2 운영비용

(전력손실 비용)

1) 비용 산출 데이터

① 케이블 손실

실제 케이블에 있어서 전력손실은 선로위치, 매설방식에 따라 편차가 매우 크며 이를 일반화하여 적용하기는 불가능하다. 따라서, 본 검토에서는 이러한 사항을 고려하여 매설방식 등에 의한 영향은 배제하고 케이블 자체의 도체저항만을 고려하여 전력손실을 산정하였다. 케이블의 도체저항은 케이블 업체의 최대DC저항 자료를 근거로 하여 상전도 154kV XPLE 2000mm²는 0.013Ω

/km*phase, 345kV OF 2000mm²는 0.013Ω/km*phase로 선정하였다. 초전도케이블 도체저항은 상전도 케이블 도체 저항의 1/100 수준인 것으로 가정하였고, 이를 바탕으로 냉각장치의 전력손실을 추정하였다. 앞선 사항들을 고려 할 때 초전도케이블의 전체 손실은 상전도 케이블 손실의 약 20% 내외일 것으로 예상되며, 본 논문에서는 20%로 가정하여 전력손실량을 계산하였다.

② 전기요금

2002년 전기요금 73.88원/kWh[5]을 기준요금으로 선정하였다.

③ 연간 선로 평균 이용률

2010년 peak 부하시 154kV 및 345kV 선로의 평균 이용률은 대략 23.9%와 27.5%로 예상된다.

2) 단위 길이당 케이블 전력손실 비용

실제 전력손실량을 계산하기 위해서는 각 선로의 연중 이용률을 모두 고려하여야 하나 현실적으로 이 같은 방법은 불가능하다. 여기서는, 케이블 1회선당 연간 평균 이용률을 추정하여 사용하였다.

수치적인 방법론상 실제 연중 이용률을 이용한 전력손실량은 평균 이용률을 적용한 전력손실량과 다소 차이를 가지게 되는데 본 검토에서는 이러한 차이를 보상하기 위하여 전력손실량 계산식에 보정계수 1.3을 곱하여 얻어진 값을 사용하였다.

아래에서는 상전도 및 초전도케이블의 1회선 단위 길이당 연간 전력손실량 계산결과를 나타내고 있다. 연간 전력손실량을 살펴보면 154kV 및 345kV 상전도 케이블은 14.49[MWh], 33.59[MWh]이며 22.9kV 및 154kV 초전도 케이블은 2.9[MWh], 6.72[MWh]로 나타났다.

초전도케이블을 사용으로 인한 1회선 단위길이당 연간 전력손실 저감량은 22.9kV 초전도케이블 적용시 11.59[MWh], 154kV 초전도케이블 적용시 26.87[MWh] 정도이다.

위의 계산 결과를 이용하여 초전도케이블 사용으로 인한 전력손실 저감효과를 금액으로 환산해 보면 22.9kV 초전도케이블 적용시 매년 85만원/C-km, 154kV 초전도케이블 적용시 198만원/C-km의 비용을 저감할 수 있다. 초전도케이블의 수명을 30년이라고 가정한다면 수명기간 동안의 총 전력손실 저감액은 0.26억원/C-km 및 0.6억원/C-km일 것으로 예상된다.

(연간 탄소세 비용)

초전도케이블 사용으로 인하여 전력생산시 발생되는 CO₂ 배출량이 감소하게 되어 탄소세 비용을 저감하는 효과를 기대할 수 있게 된다. 아래에서는 상전도 및 초전도케이블의 CO₂ 탄소세 비용을 산출하고 초전도케이블 사용에 따른 탄소세 저감 효과를 검토하였다.

1) 비용 산출 데이터

① 발전원별 전력생산량

2002년 실적을 기준으로 전력생산량 비율을 살펴보면 수력 1.7%, 석탄 39.6%, 유류 6.0% 및 LNG 13.3%, 원자력 39.4%로 나타났다[5].

② 화력기의 MWh당 CO₂ 배출량

화력기의 MWh당 CO₂ 배출량은 다음과 같다. LNG 0.623[TCE/MWh], 석탄 0.924 [TCE/MWh], 유류 0.749[TCE/MWh]로서 상대적으로 석탄발전이 가장 많은 CO₂를 배출함을 알 수 있다[6].

③ CO₂ 단위 무게당 탄소세

향후 적용될 CO₂ 단위 무게당 탄소세 가격은 관련 연구기관 및 해외자료를 근거로 하면 약 \$10/TCE [7]으로 추정된다. 그러나 이는 단지 CO₂ 배출에 대한 탄소세이

며 화력기에서 발생되는 CO₂ 이외의 환경오염 물질인 NOx, SOx의 경우는 현재까지 어떠한 부과 기준도 명확하게 되지 않은 상황이다. 본 검토에서는 CO₂ 및 NOx, SOx에 대한 부분을 모두 고려하여 단위 무게당 탄소세를 \$20/TCE로 가정하였다. (환율 1,200원 기준으로 한화 24,000원/TCE)

2) 연간 탄소세 비용

케이블 1회선 단위 길이당 CO₂ 탄소세 비용을 산정하면 다음과 같다. 케이블 1회선 단위 길이당 연간 전력손실량이 상전도 154kV 케이블 14.49[MWh], 상전도 345kV 케이블 33.56[MWh]이며, 초전도케이블은 22.9kV 케이블이 2.9[MWh], 154kV 케이블이 6.72[MWh]이므로, 결국 연간 탄소세 비용은 상전도 케이블 각각 0.0017억원, 0.0040억원, 초전도케이블이 0.0003억원과 0.0008억원으로 나타났다.

따라서, 상전도 대신 초전도케이블을 사용하였을 경우 연간 탄소세 저감 이익은 약 0.0014억원(22.9kV 초전도 케이블 적용시)과 0.0032억원(154kV 초전도케이블 적용시) 정도로 추정된다.

(유지보수 비용)

유지보수 비용의 경우 상전도 케이블은 케이블 가격의 10%, 초전도케이블은 동일한 전압계급의 상전도 케이블 가격의 15%로 가정하였다. 동일 전압계급의 상전도 케이블 유지보수 비용보다 높게 선정한 이유는 설치비용과 마찬가지로 초전도케이블의 냉각설비에 따른 추가적인 비용을 반영하였기 때문이다.

2.3 상전도 및 초전도케이블 Life-cycle 비용

상기의 자료들을 근거로 하여 상전도 및 초전도 케이블 Life-cycle 비용을 계산하면 다음과 같다. 케이블의 수명을 30년으로 가정할 때 2010년 신규 설치된 154kV 및 345kV 상전도 케이블 1회선 선로의 Life-cycle 비용은 식(1)을 이용하여 계산하면 약 36.19억원 및 135.92억원으로 예상된다.

상전도 케이블 Life-cycle 비용

$$= \text{케이블가격} + \text{설치비용} + \text{토목공사비용} + \text{수명기간} \\ *(\text{연간전력손실 및 탄소세} + \text{케이블가격의 } 10\%)$$

초전도케이블의 Life-cycle 비용을 구하는데 있어 초전도케이블 가격이 현재 미지수 이므로 본 검토에서는 상전도 케이블 가격에 가격지수를 곱한 가격을 초전도케이블 가격으로 보고 식(2)-(3)를 이용하여 Life-cycle 비용을 산정하였다. 여기서, 가격지수(N)은 상전도 케이블 가격에 대한 초전도케이블 가격의 비율을 나타내고 있다.

$$\text{가격지수}(N) = \frac{\text{초전도케이블 가격}}{\text{상전도케이블 가격}} \quad (2)$$

초전도케이블 Life-cycle 비용

$$= (\text{상전도케이블 가격} * \text{가격지수}) + \text{설치비용} + \text{토목공사비용} + \text{수명기간} * (\text{연간 전력손실 및 탄소세 비용} + \text{상전도 케이블 가격의 } 15\%) \quad (3)$$

아래 그림 1-2에서는 가격지수(N)에 따른 초전도케이블 Life-cycle 비용을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 22.9kV 초전도케이블은 가격지수 N<5, 154kV 초전도케이블은 가격지수 N<4인 경우 상전도 케이블보다 가격 경쟁력을 가지게 될 것으로 예상된다.

검토 결과 22.9kV 초전도케이블의 가격지수가 154kV 초전도케이블에 비해 약간 높은데, 이는 곧 상전도 케이블에 대한 22.9kV 초전도케이블의 가격경쟁력이 154kV

초전도케이블 보다 더 높다는 것을 의미한다.

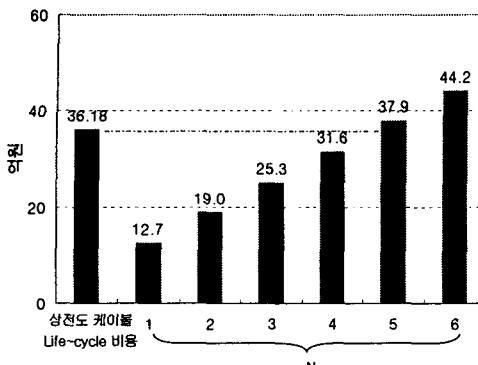


그림 1. 154kV 상전도 케이블 및 22.9kV 초전도케이블 Life-cycle 비용

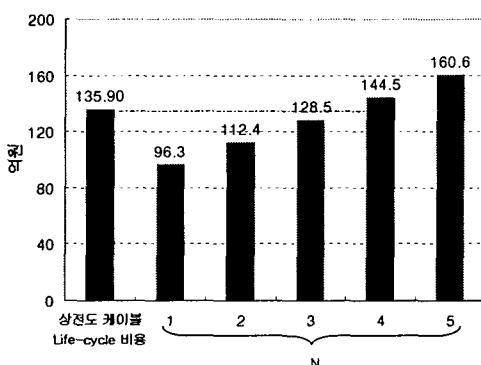


그림 2. 345kV 상전도 케이블 및 154kV 초전도케이블 Life-cycle 비용

3. 초전도케이블 시장진입 가격 산정

위에서 언급한 Life-cycle 비용 계산 방법을 이용하여 보다 구체적인 시장진입 가격을 추정할 수 있는 수식을 수립하면 아래 식(4)과 같다. 결국 상전도 케이블의 Life-cycle 비용과 초전도케이블의 가격을 제외한 기타 비용을 이용하여 가격 경쟁력을 가지기 위한 초전도케이블의 정량적인 시장진입 가격을 제안하는 것이다. 여기서 제시되는 시장진입 가격은 초전도케이블 및 냉각장치를 포함하는 가격이며, 여유도 k 는 초전도케이블이 상전도 케이블 보다 가격 경쟁력을 가지기 위한 가격 여유 마진을 의미한다.

$$RC_{HTSTL} = K \times (TC_{CC} + IC_{CC} + CC_{CC} - IC_{HTS} - CC_{HTS} + LC \times (AL_{CC} \times U + AMC_{CC} - AL_{HTS} \times U - AMC_{HTS})) \quad (4)$$

RC_{HTSTL} : 초전도케이블 시장진입가격 (억원/C-km)

$K < 1$: 여유도

U : 선로 평균 이용률

LC (Life Cycle) : 상전도 및 초전도케이블 수명(년)

TC_{CC} / IC_{CC} : 상전도 케이블 가격/설치비용(억원/C-km)

CC_{CC} : 상전도 케이블 토목공사 비용(억원/km)

IC_{HTS} / CC_{HTS} : 초전도케이블 설치비용(억원/C-km)/토목공사비용(억원/km)

AL_{CC} / AMC_{CC} : 상전도 케이블 연간 전력손실액/

연간 유지보수비용 (억원/년)

AL_{HTS} / AMC_{HTS} : 초전도케이블 연간 전력손실액/연간 유지보수비용(억원/년)

시장진입 가격 산정식을 이용하여 22.9kV 및 154kV 초전도케이블의 시장진입 가격을 살펴보면 약 26.8억 원/C-km(154kV 상전도케이블의 약 4배) 및 50.1억 원/C-km(345kV 상전도케이블의 약 3배)로 추정된다. 여기서 제시한 시장진입 가격은 154kV 선로 이용률 23.9%, 345kV 선로 이용률 27.5%, 시장진입을 위한 여유 마진 10%를 적용한 경우이다.

4. 결론

본 논문에서는 향후 미래계통에 적용하기 위한 초전도케이블의 경제성과 적용 방법론에 대하여 검토하였다.

초전도케이블의 경제성을 평가함에 있어 여러 가지 제약사항 및 데이터의 가변성 등을 고려하여 정량적인 방식과 정성적인 방식을 혼합한 방식을 사용하였다. 그리고, 경제성 분석 방법론에 있어서 직접적인 분석방법을 적용하기보다는 해당 초전도기기가 실 계통에 적용될 수 있는 경제적 측면의 시장진입 가격을 제시하는 간접적인 분석방법을 사용하였다. 검토결과 22.9kV 및 154kV 초전도케이블의 시장진입 가격은 26.8억 원/C-km(154kV 상전도 케이블 가격의 약 4배) 및 50.1억 원/C-km(345kV 상전도 케이블 가격의 약 3배)으로 분석되었다. 여기서 제시한 시장진입 가격은 154kV 선로 이용률 23.9%, 345kV 선로 이용률 27.5%, 시장진입을 위한 여유 마진 10%를 적용하여 산정한 가격이다.

향후 실 계통에 초전도케이블을 적용할 경우, 해당 선로의 위치나 매설방식 등에 따라서 시장진입 가격이 큰 편차를 가지게 될을 의미한다. 향후 구체적인 대상에 따른 보다 정밀한 경제성 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] Diego Politano, Marten Sjostrom, Gilbert Schnyder and Jakob Rhyner, "Technical and economical Assessment of HTS Cablesems" IEEE Transactions on applied superconductivity conference, Sept. 2000
- [2] John Cerulli, "State of the Art of HTS Technology for Large Power Applications: Current Programs and Future Expectations" Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting, Dec. 1998
- [3] R. S. Silbergliitt, Emile Ettingui, Anders Hove, "Strengthening the Grid : Effect of High Temperature Superconducting(HTS) Power Technologies on Reliability, Power Transfer Capacity, and Energy Use" Rand Corp., July 2002
- [4] 한국전력공사, "한전 투융자 단가", 2002
- [5] 한국전력공사, "한전 전력통계자료집" 2002,
- [6] KOGAS, www.kogas.or.kr/naturalgas/report/13.jsp
- [7] 한국에너지경제연구원, "Estimates on CO2 Tax in long future", 2003