

# 고온 초전도 변압기 경제성 평가

김성훈, 김우석, 한송엽, 최경달, 주형길, 홍계원  
서울대학교 전기컴퓨터 공학부, 한국산업기술대학교 에너지 대학원

## Feasibility Study of an HTS Transformer

Sung-Hoon Kim, Woo-Seok Kim, Song-yop Hahn,  
Kyeong-Dal Choi, Hyeong-Gil Joo and Gye-Won Hong  
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University,  
Graduate School of Energy, Korea Polytechnic University

new28@snu.ac.kr

**Abstract** - In this paper, we investigated the cost comparison between a 30 MVA high temperature superconducting(HTS) transformer and a conventional large power transformer, and estimated a break even point in time of the HTS transformer comparing to the conventional large power transformer. A value between 5,000 and 8,500 kA-m is chosen to calculate the price of HTS tape in a 30 MVA HTS transformer. And the number of cryocooler is decided by estimating the generated energy loss in HTS transformer.

### 1. 서 론

초전도 변압기는 기존 변압기 권선을 초전도 권선으로 대체함으로써 고효율화, 소형·경량화를 도모하려는 대표적인 교류형 초전도 전력기기로서 전형적인 기존 기기의 대체기술이라 할 수 있다. 기존 변압기는 권선의 동선과 철심에서의 손실의 비율을 최적화함으로써 운전시의 종합손실을 최소화하는 방향으로 설계하고 있으나 초전도 변압기는 고전류 밀도특성을 이용하여 권선의 턴수를 증가시키고 철심의 사용량을 줄여 변압기의 크기와 무게를 줄이고 효율을 증대하는 쪽으로 설계하고 있다. 즉 초전도 변압기에서의 초전도 코일이 기존 변압기에서의 동코일에 비해 전류밀도가 수십배정도 높고 손실도 작아 코일의 권수를 늘려 코일과 쇠교하는 자속을 많게 할 수 있기 때문에 철심의 양을 줄일 수 있어 소형·경량화가 가능하고 철손도 줄어들게 된다[1]. 그리고 기존 변압기에서 사용하는 절연유를 사용하지 않기 때문에 화재나 폭발의 위험이 없고 환경오염을 감소시킬 수 있다.

최근에는 교류손실이 적은 고온초전도 선재가 개발되면서 가격이 저렴한 액체질소 및 냉동기를 사용하는 고온초전도 변압기 개발이 활발히 진행되고 있다. 이런 추세에 부응하여 본 논문에서는 30 MVA급 고온초전도 변압기의 실제제작 단가

를 산정하여 기존의 상용변압기와의 가격비교를 하였으며 초전도 변압기가 상용변압기보다 나은 시점을 계산하여 추정하였다

### 2. 본 론

#### 2.1 고온초전도(HTS) 선재 가격산정

초전도 전력기기에서 사용되는 고온초전도 선재는 kA-m라는 용어를 사용한다. 여기서 kA-m는 1 m 대해서 1000 A를 흘리기 위해 필요한 컨덕터(conductor)의 양을 의미한다. 현재 미국 ASC(American Superconductor)사는 온도가 77 K(-196°C)이고 자기자장(self-field), B=0인 상황에서 임계전류밀도가 13,000 A/cm<sup>2</sup>인 Bi-2223 HTS 선재가격을 150\$/kA-m로 제시하고 있다 [2].

고온초전도 선재는 온도에 민감하기 때문에 자기자장이 0인 상황에서 임계전류밀도,  $J_c$ 는 주위온도가 내려감에 따라 증가한다. 온도에 대한 고온초전도 선재의 임계전류밀도의 관계를 식(2.1)에 나타내었다[3].

$$\frac{J_c[T]}{J_c[77K]} = \left( \frac{1 - (T/(104K))}{1 - (77/(104K))} \right)^{1.4} \approx 6.6 \times (1 - (T/(104K)))^{1.4} \quad (2.1)$$

자장이 존재하고 온도가 77 K인 경우, 자장의 증가는 임계전류밀도를 감소시키기 때문에 자기자장이 0인 경우와 비교했을 때 같은 전류를 수송하기 위해서는 더 많은 고온초전도 선재가 사용되어야한다. 그리고 온도가 65 K로 낮아진 경우 77 K경우보다 임계전류밀도에 대한 자장의 영향이 1/2정도로 줄어든다. 그러나 외부온도가 30 K이하로 더 낮아진 경우는 자장이 임계전류밀도를 더 이상 감소시키지 않는다. 그러므로 온도가 낮아짐에 따라 고온초전도 선재의 사용량을 줄일 수 있다.

사용온도에 따른 Bi-2223 HTS 선재의 가격산정에 대한 식을 식(2.2)에 나타내었다[3].

price Bi-2223

$$\approx \frac{150 (\$/kA - m)}{6.6 \times (1 - (T/(104K)))^{1.4}} \quad (2.2)$$

그림 1과 2는 자기자장이 0인 상황에서 동작 온도에 대한 Bi-2223 HTS 선재의 임계전류밀도 값과 선재가격을 나타내고 있다. 온도가 내려감에 따라서 Bi-2223 HTS 선재가격이 하락함을 알 수 있다. 그러나 30 K이하에서는 선재의 가격하락폭이 크지 않다. 그러므로 Bi-2223 HTS 선재의 경우는 30 K까지가 온도에 대한 선재의 가격하락 하한점이 된다.

## 2.2 구리선(Copper wire) 가격산정

일반적인 전력기에 사용되는 구리선은 HTS 선재와 비교해서 온도가 내려감에 따라 전류밀도(J)는 크게 변화하지 않는다. 예를 들어 상온(298 K)에서 사용되는 구리선을 77 K에서 사용할 경우 구리선의 전류밀도는 2배 정도밖에 늘어나지 않는다. 현재 미국에서는 상온에서 전류밀도가 100 A/cm<sup>2</sup>인 구리선의 경우 19.5 \$/kA-m로 제시하고 있다. 이런 구리선의 가격산정은 전류밀도에 따라 크게 달라진다. 다음 식(2.3)은 전류밀도와 온도에 대한 구리선의 가격을 구하는 식이다[3].

price Cu

$$\approx \frac{\rho_{Cu}[T]}{\rho_{Cu}[298K]} \frac{19.15 (\$/kA - m)}{(J/100 A/cm^2)} \quad (2.3)$$

여기서,  $\rho_{Cu}[T] = \rho_{0Cu} + \alpha_{Cu}T$

$$\rho_{0Cu} \approx 5.0 \times 10^{-9} [ohm - meter]$$

$$\alpha_{Cu} \approx 4.0 \times 10^{-11} [ohm - meter/K]$$

이다.

그림 3은 구리의 전류밀도가 400[A/cm<sup>2</sup>]와 100[A/cm<sup>2</sup>]인 경우의 온도에 대한 구리선의 가격을 보여주고 있다.

## 2.3 고온초전도 변압기 가격 산정 조건

초전도 변압기의 가격을 산정하기 위해서는 다음과 같이 부분별로 가격을 나누어서 고려를 해야 한다[3].

### 1)설치비(capital cost)

- (㉠) 부지(site preparation)
- (㉡) 건설(construction)
- (㉢) 장치(equipment)
  - 초전도선재(HTS tape)
  - 철심(core)
  - 냉동조(cryostat)
  - 외함(frame)
- (㉣) 냉동기(cryocooler)

### 2)투자자금의 연간 가격

(annual cost of capital)

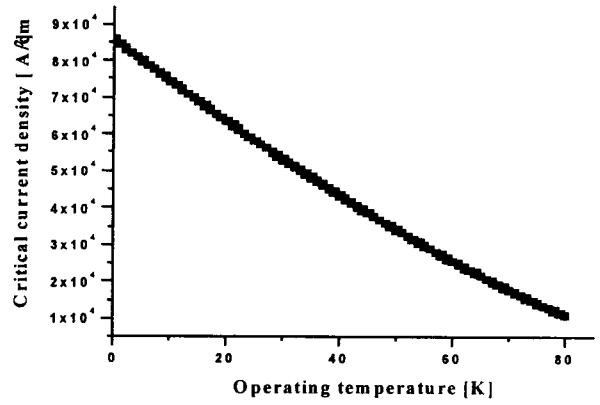


Fig. 1. Critical current densities of HTS tape(Bi-2223) for operating temperatures

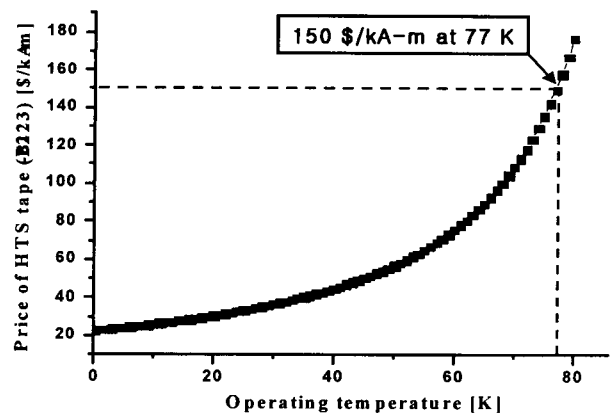


Fig. 2. Prices of HTS tape(Bi-2223) for operating temperatures

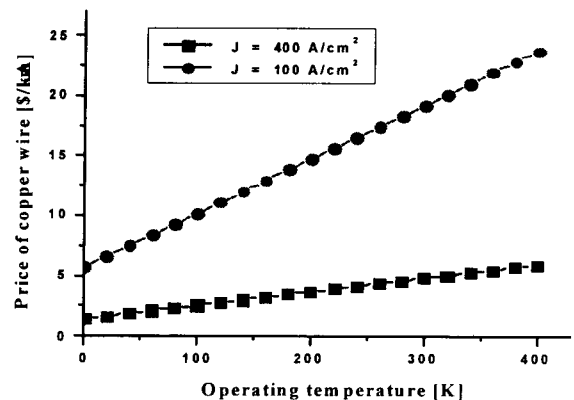


Fig. 3. Prices of copper wire for operating temperatures.

- (㉠) 감가상각비(depreciation)
- (㉡) 투자자금의 이율(interest rate)
- (㉢) 기타(보험료, 세금 등등)

### 3)운영비(operating cost)

- (㉠) 에너지 손실(energy dissipated)
- (㉡) 인건비(labor)
- (㉢) 기타 유지비(maintenance)

본 논문에서는 기존의 상용 변압기와 고온초전도 변압기의 가격비교를 위해서 공통적으로 적용되는 부분은 고려하지 않았다.

### 2.4 냉동기(Cryocooler) 결정

본 논문에서는 앞으로 수십 MVA급 초전도 변압기 제작시 생각방법으로 액체질소(LN<sub>2</sub>)와 냉동기를 같이 사용하는 과냉각(65 K) 방식을 고려하기 때문에 과냉각 방식에 사용될 냉동기 선정에 대해서 언급하고자 한다.

초전도 변압기에서 과냉각을 위해 사용될 냉동기 용량의 결정은 변압기내에서 발생하는 에너지 손실과 관계가 있다. 따라서 초전도 변압기에서의 에너지 손실의 성분은 다음과 같다.

- 1) 냉동조의 벽
- 2) 전류도입부
- 3) DC 전류
- 4) 초전도 선재들 간의 접합부분
- 5) AC 전류

초전도 변압기의 권선부분이 위치할 냉동조의 경우 이 냉동조의 벽을 통해서 유입되는 에너지 손실은 1 W/m<sup>2</sup>으로 보며 전류도입부로부터 발생하는 에너지 손실은 10<sup>-2</sup> W/kVA으로 본다. 그리고 초전도 변압기에서의 대부분의 에너지 손실은 AC 전류를 초전도 선재에 인가했을 때 발생하는데 이때 선재에는 hysteresis 와 eddy current 손실들이 발생한다. 따라서 HTS 선재에서 발생하는 AC 손실은 0.25 W/kA-m로 보며 30 MVA급 고온초전도 변압기 설계시 약 5,000 ~ 8,500 kA-m가 필요하다고 보면 약 1.25 ~ 2.125 kW의 AC 손실이 고온초전도 선재에서 발생한다. 30 MVA급 고온초전도 변압기를 설계했을 경우의 에너지 손실을 표 1에 나타내었다

본 논문에서는 30 MVA급 고온초전도 변압기의 선재에서 발생하는 에너지 손실은 중간값인 1.69 kW로 가정하고 계산 할 것이다. 그리고 이러한 에너지 손실의 추정값들은 동작온도에 거의 무관하다.

초전도 변압기에서의 대부분의 에너지 손실은 선재에서 발생하기 때문에 선재의 질 (quality)이

Table 1. Estimate of energy loss in a 30 MVA HTS transformer

	에너지 손실 [kW]	비 고
전류도입부	(1~3) × 0.10	
냉동조	0.02 ~ 0.03	
HTS 선재	1.25 ~ 2.12	0.25 W/kA-m

초전도 변압기 에너지 손실과 직접적인 관계가 있는 것을 알 수 있다. 표 1의 에너지 손실

추정값들로부터 30 MVA급 고온초전도 변압기의 총에너지 손실은 2 kW로 추정할 수 있다. 그리고 300 W/h의 냉동기를 사용하고자 할 경우 약 7대의 냉동기가 필요함을 예측할 수 있다.

## 3. 사례연구

### 3.1 30 MVA 고온초전도 변압기

전 세계적으로 30 MVA급 고온초전도 변압기를 제작되어진 바가 없기 때문에 30MVA급 초전도 변압기의 가격산정은 기존의 상용 변압기인 30 MVA급 변압기를 기준으로 가격산정을 하였다.

초전도 변압기의 제작시 가장 큰 비용을 차지하는 부분은 초전도 선재의 가격이다. 현재 미국 ASC사는 Bi-2223 HTS 선재의 경우 200 \$/kA-m로 판매하고 있다[2]. 그러나 이 가격으로 고온초전도 변압기를 제작한다면 기존의 상용 변압기와 비교할 때 상당한 가격 차이가 생기기 때문에 초전도 변압기의 제작에 어려움이 있다. 그러므로 선재의 가격조정이 필요하다. 앞으로 30 MVA급 고온초전도 변압기의 제작 시기를 2004년경으로 보면 현재 선재가격의 1/3 (50 \$/kA-m)정도로 가격이 하락할 것으로 예상되기 때문에 본 논문에서는 선재 가격의 산정시 50 \$/kA-m를 사용하였다. 그리고 앞서 언급한 바와 같이 30 MVA급 초전도 변압기에서는 5000 ~ 8500 kA-m정도가 요구되기 때문에 중간값이 6750 kA-m를 사용하였다.

초전도 변압기 제작시 초전도 선재 다음으로 가격에 큰 영향을 주는 것은 냉동기의 가격이다. 냉동기의 가격은 앞서 언급된 내용을 바탕으로 현재 30 MVA급 초전도 변압기의 총에너지 손실을 2 kW로 보고 300 W/h의 냉동기를 사용할 경우 약 7대의 냉동기가 사용된다.

### 3.2 30 MVA 상용 변압기

30 MVA급 고온초전도 변압기와의 가격비교를 위해서 (주)효성 중공업측에 기존의 30 MVA급 상용변압기의 가격산정을 의뢰하였으며 (주)효성 중공업측에서 제시한 가격은 현재 미국에서 제작되는 30 MVA급 상용변압기의 제작단가와 큰 차이가 생기지 않았기 때문에 본 논문에서는 초전도 변압기와의 제작가격을 비교하기 위해서 30 MVA급 상용변압기의 제작단가를 \$300,000로 하였다.

30 MVA급 고온초전도 변압기와 상용 변압기의 제작비와 운영비의 가격을 표 2에 나타내었다. 각각의 제작비에는 앞서 언급한 바와 같이 공통적으로 적용되는 부분은 고려하지 않았다. 그리고 운영비는 연간 유지비를 고려한 값이다.

### 3.3 30 MVA 변압기 가격비교

표 2에 나타낸 바와 같이 30 MVA급 고온초전도 변압기의 설치비용은 기존의 상용변압기와 비교해볼 때 2배 이상 차이가 난다. 그러나 연간

운영비 및 효율을 고려한 유지비(life cycle cost)를 따져본다면 크기는 십몇년 작게는 수년 안에 고온초전도 변압기가 기존의 상용변압기보다 더 많은 이윤을 남길 수 있다.

그림 4(a)는 동작온도가 77 K인 곳에서의 30 MVA급 고온초전도 변압기와 상용변압기의 연간 가격비교를 보여주고 있다. 그리고 그림 4(b)은 과냉각 방식으로 변압기가 냉각될 때의 연간 가격비교를 보여주고 있다. 여기서 고온초전도 변압기는 상용변압기보다 효율이 0.5% 상승한다는 조건하에서 계산을 하였다.

그림 4(a)와(b)를 비교해 볼 때 30 MVA급 고온초전도 변압기의 동작온도가 77 K에서 운전될 때는 상용변압기와 비교해서 15년 이후부터 이윤을 남기게 되며, 과냉각방식으로 초전도 변압기를 운전시킬 경우는 6년 이후부터 이윤을 남기게 된다.

#### 4. 결 론

현재의 고온초전도 선재의 가격으로 수 MVA급 초전도 변압기 제작은 아직 한계가 있다. 초전도 변압기 제작 단가에 있어서 선재 가격이 총 제작비용의 50~60%를 차지하기 때문이다. 그러므로 초전도 선재의 가격하락 없이는 기존의 수 MVA급 상용변압기와의 가격 경쟁에서는 초전도 변압기가 불리하기 때문에 현재의 고온초전도 선재가격으로는 수 MVA급 보다는 수십 MVA급 대용량 변압기에서 상용변압기와의 가격 경쟁이 가능하다.

본 논문에서는 현재 30 MVA급 고온초전도 변압기와 상용변압기의 제작가격 및 유지비를 산정하여 비교하였다. 그리고 수십 MVA급 초전도 변압기와 상용변압기를 비교할 때 초전도 변압기는 냉각온도별로 길게는 십수년 짧게는 수년 안에 상용변압기 보다 많은 이윤을 남기게 된다는 것을 알 수 있었다.

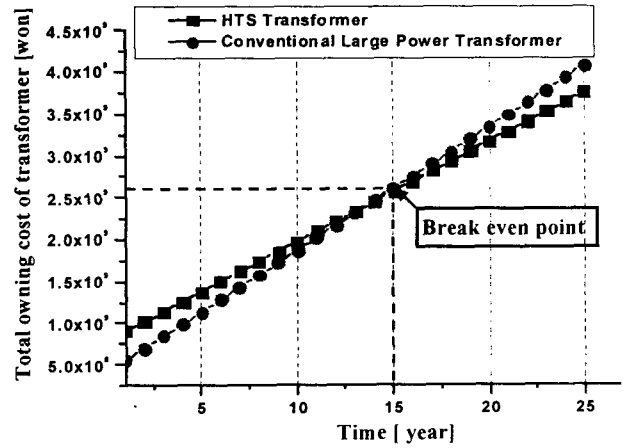
본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

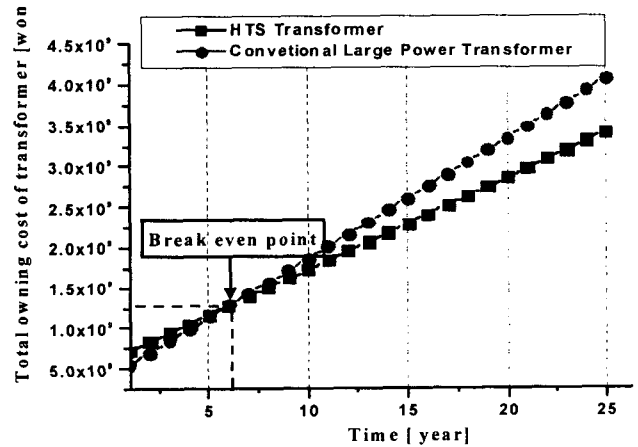
- [1] 류강식, "초전도응용기기 및 시스템의 연구 동향과 발전방향," 초전도와 저온공학, Vol. 1, No. 1, pp.18~27,1999.
- [2] L. J. Masur and Jürgen Kellers, "Industrial High Temperature Superconductors: Perspectives and Milestones," 17th International Conference on Magnet

Table 2. Cost comparison between a 30 MVA HTS transformer and a conventional large power transformer [단위 : 천원]

	고온초전도 변압기	상용 대전력 변압기
제작비	819,030	390,000
연간 운영비	31,760	101,980



(a) Operating temperature 77K



(B) Operating temperature 65K

Fig. 4. Cost comparison for time between a 30 MVA HTS transformer for operating temperature (a) 77 K and (b) 65 K (sub-cooling), and a conventional large power transformer. *Technology*, Sep., 2001.

- [3] A. M. Wolsky, "Introduction to Engineering & Economic Issues Bearing on Cryogenics for Future Power Sector Equipment Incorporating Ceramic Superconductors," *Meeting of the ExCo of the IEA*, Oct., 2001.