

초전도변압기의 계통적용을 위한 예상 시장진입가격 추정

김종율, 이승렬, 윤재영
한국전기연구원

Evaluate the expected price of HTS transformer for introducing into korean power system

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

Abstract - HTS (High Temperature Superconducting) Transformer has the several useful characteristics in the viewpoints of technical and economical. Especially, an HTS transformer replaces the copper wire coils in a conventional transformer with lower loss HTS wire. In addition, inexpensive, environmentally benign liquid nitrogen replaces the conventional oil as the electrical insulation (dielectric) and provides the necessary cooling for the HTS transformer. Therefore, the Life-cycle cost of an HTS transformer is much more attractive than conventional because it is more energy efficient, lighter in weight, smaller in size, and environmentally compliant. HTS transformer can be the best way to replace with conventional transformer in the future. In this paper, we investigate the expected price of HTS transformer to have a merit in viewpoint of economic aspect. First, life-cycle cost of conventional transformer is calculated and based on this, the expected price of HTS transformer is evaluated, which HTS transformer is competitive against conventional transformer.

1. 서 론

1986년 고온초전도체(HTS : High Temperature Superconductor)가 발견된 이후 초전도를 의료, 수송, 에너지 등 다양한 분야에 응용하기 위한 연구가 활성화되기 시작하였다. HTS 기술의 다양한 적용분야 중에서도 특히 전력분야에 대한 적용연구가 1990년대 중반 이후 크게 활발해졌는데 그 이유는 초전도 전력기기를 전력계통에 적용하면 전력손실 저감, 환경측면 이익향유 및 계통운영의 효율성을 향상시킬 수 있기 때문이다[1]. 초전도변압기는 기존 변압기 권선을 초전도 권선으로 대체함으로써 고효율화, 소형/경량화를 도모하려는 대표적인 초전도기기로 전형적인 기존 기기의 대체기술이라 할 수 있다. 초전도변압기는 고전류밀도 특성을 이용하여 권선의 턴수를 증가시키고 철심의 사용량을 줄여 변압기의 크기와 무게를 줄이고 효율을 증대할 수 있다[2]. 또한 기존 변압기에서 사용하는 절연유를 사용하지 않기 때문에 화재나 폭발의 위험이 없고 환경오염을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나, 현재 시점에서는 초전도 전력기기의 경제성이 상대적으로 낮고 신뢰성에 대한 의문 때문에 실 계통 적용상에 많은 장애가 놓여있는 실정이다. 초전도변압기 경제성 평가는 초전도변압기의 계통적용 가능성을 좌우하는 근거가 되므로 가장 최우선적으로 검토되어야 한다. 그러나, 초전도기종 자체의 특성상 급격한 기술개발로 인해 현 상태에서 미래에 개발될 것으로 예상되는 초전도기기의 정확한 비용요소를 산정하기는 매우 곤란하다. 또한, 미래 전력계통의 불확실성 및 계통측면의 적용관련 다양성 등을 고려한다면 현 시점에서 타 대안과의 직접적인 경제적 편익을 논하는 것은 곤

란하다. 그러므로, 본 논문에서는 동일한 용량을 가진 154/22.9kV 상전도 및 초전도변압기 Life-cycle 비용 계산식을 이용하여 초전도변압기가 상전도 변압기와 비교하여 가격경쟁력을 확보할 수 있는 시장진입 가격 산정식을 수립하고 이를 통해 예상 시장진입 가격을 추정하였다.

2. Life-Cycle 비용 산정

본 논문에서 사용한 초전도변압기의 경제성 분석방법은 Life-cycle 비용을 이용하여 경제적 측면에서 경쟁력을 가지는 초전도변압기의 적정 시장진입 가격을 역산하는 방법이다. 즉, 동일한 용량을 가지는 기존 상전도변압기의 전체 수명기간 동안 총 소요비용(LCC: Life Cycle Cost)을 계산하고, 이를 이용하여 초전도변압기의 시장진입 가격을 산정하는 것이다. 정확한 변압기 Life-cycle 비용을 산정하기 위해서는 여러 가지 항목들을 모두 고려하여 계산해야 한다. 그러나 본 검토의 목적이 절대적인 Life-cycle 비용규모를 산정하는 것이 아니라 상전도변압기와 비교하여 가격경쟁력을 가질 수 있는 적절한 초전도변압기 시장진입 가격수준을 도출하는데 있으므로, 여기서는 아래 식(1)과 같이 중요 항목들만을 고려하였으며 공통적으로 적용되는 부분은 고려하지 않았다.

○ Life-cycle 비용 (1)
= 초기 투자비용 + 운전비용
= (변압기 가격+설치비용)+(전력손실비용+탄소세 비용+유지보수비용)

2.1 초기투자 비용 (변압기 가격 및 설치비용)

상전도 변압기 가격은 제작업체의 자료에 근거하여 3상 45/60MVA 기준으로 6억원/대로 산정하였다. 변압기 설치비용은 제작업체인 효성중공업의 자료에 의하면 상전도 변압기는 0.3억원/대로 나타났다. 초전도변압기의 경우는 변압기외에 냉각장치가 추가적으로 설치되어야 하는데 초전도변압기 개발자 및 제작업체의 의견을 고려하여 0.5억원/대로 산정하였다. 이는 초전도변압기 경우 무게 및 부피가 상전도 변압기에 비해 다소 적으므로 설치공사 비용측면에서 유리하나 냉각설비 설치에 따른 추가적인 비용이 발생하므로 초전도변압기의 설치비용을 약간 높게 산정하였다.

2.2 운전비용 (전력손실 비용)

1) 비용 산출 데이터

① 변압기 손실

154/22.9kV 45/60MVA 변압기를 기준으로 하여 전력손실을 계산하였다. 제작업체의 자료 및 변압기 시험데이터를 근거로 하여 3상 45/60MVA 변압기 손실을 산정한 결과 부하손 320kW(전 부하상태), 무부하손 50kW 정도로 나타났다. 초전도변압기의 경우 현 시점에서 개

발 중인 기기의 정확한 데이터를 산정하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 해외사례의 경우도 개발 초기 단계로서 수 MVA급 정도 수준이며 이 또한 전압계급 등이 서로 상이하여 해외의 자료만을 근거로 하여 평가하는데도 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 해외사례를 참조하여 현재 실제 초전도변압기를 개발하고 있는 연구진과 초전도변압기의 손실을 산정하였으며 그 결과는 다음과 같다. 먼저, 초전도선재에서 발생하는 부하손은 단위길이당 손실 $0.25W/kA\cdot m$ 과 60MVA 변압기 설계시 필요한 선재길이를 고려해 볼 때 약 3KW~5kW의 손실이 발생하며 본 논문에서는 이 값의 중간값인 4kW를 사용하였다[3]. 무부하손실의 경우 상전도변압기 무부하손실의 약 1.3배 정도가 발생하는 것으로 나타났으며 여기서는 60kW가 손실로 발생한다[4]. 열적손실의 경우 변압기 용량의 약 0.01% 정도가 발생하며 6kW가 발생하는 것으로 산정하였다[5]. 따라서, 초전도변압기의 손실은 부하손 4kW, 무부하손과 열손실을 포함한 보조손은 66kW로 산정하여 경제성 평가를 수행하였다.

② 154/22.9kV 변압기 총 대수

2010년 한전계통의 총 154/22.9kV 변압기 수는 154kV 변전설비용량과 변압기 1대당 용량을 이용하여 계산하였다[6]. 변압기 1 대당 용량 60[MVA]를 기준으로 변압기 총 대수를 계산해보면 총 1,887대인 것으로 나타났다.

③ 전기요금

2002년 기준 평균 명목전기요금 73.88원/kWh를 기준 요금으로 선정하였다[7].

④ 연간 변압기 평균 이용률

2010년 예상 판매 전력량 355,324[GWh] 및 변전용량 113,210[MVA]를 기준으로 연간 변압기 평균 이용률을 검토한 결과, 154/22.9kV 변압기의 평균 이용률은 약 35.8% 정도로 예상된다[6-7]. 본 검토에서는 부하밀도가 상대적으로 높고 신규 변전소 부지확보가 어려운 수도권 지역을 초전도변압기 적용대상으로 선정하였다. 이 경우 수도권 평균 이용률은 전국 평균 이용률 보다 다소 높은 46.5%로 나타났다.

2) 변압기 1대당 전력손실 비용

변압기 동손에 의한 연간 전력손실량은 변압기의 연중 이용률을 고려하여 계산되어져야 하는데, 모든 변압기의 실제 연중 이용률을 고려하여 전력손실량을 계산하는 것은 현실적으로 어렵다. 여기서는 수도권 지역 변압기 1대당 연간 평균 이용률을 개략적으로 추정하여 사용하였다. 154/22.9kV급 상전도 및 초전도변압기 1대당 연간 전력손실량은 상전도 변압기의 경우 1,045[MWh], 초전도변압기는 545[MWh]이며, 두 변압기의 전력손실량 차이는 약 500[MWh]로 나타났다. 이를 토대로 전력손실 비용을 계산하면 표 1과 같다.

표 1 상전도 및 초전도변압기 전력손실 비용 비교

	상전도 변압기	초전도 변압기	비고
연간 전력손실량 [MWh]	1,045	545	변압기 이용률 46.5%
연간 전력손실액 [억원]	0.772	0.402	전기요금 73.88[원/kWh]
수명기간 동안의 전력손실액 [억원]	23.16	12.06	변압기 수명 30년

(연간 탄소세 비용)

아래에서는 상전도 및 초전도변압기의 CO₂ 탄소세 비용을 산출하고 초전도변압기 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[7].

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[8].

③ CO₂ 단위 무게당 탄소세

향후 적용될 CO₂ 단위 무게당 탄소세 가격은 관련 연구기관 및 해외자료를 근거로 하면 약 \$10/TCE으로 추정된다. 그러나 이는 단지 CO₂ 배출에 대한 탄소세이며 화력기에서 발생하는 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[9]. (환율 1,200원 기준)

2) 연간 탄소세 비용

앞서 언급한 자료를 근거로 하여 상전도 및 초전도변압기 1대당 탄소세 비용을 산정해본 결과, 각각 0.103억원과 0.054억원으로 나타났다. 따라서, 상전도 대신 초전도변압기를 사용하였을 경우 변압기 1대당 연간 탄소세 저감 이익은 약 0.049억원 정도로 추정된다.

(유지보수 비용)

한전 실적 자료를 토대로 상전도 변압기 유지보수 비율을 5%로 산정하였다. 초전도변압기의 유지보수 비율은 제작업체 및 개발자들의 의견을 반영하여 동일한 용량의 상전도변압기 가격의 7%로 가정하였다. 초전도변압기의 연간 유지보수 비용이 상전도변압기 보다 다소 높은 것으로 선정한 이유는 초전도변압기의 경우 변압기 자체 이외에 냉각설비의 유지보수에 발생하는 비용을 반영하였기 때문이다.

3. 초전도변압기 사용에 따른 부가이익

초전도변압기는 동일용량의 상전도변압기 보다 부피 및 무게가 월등히 감소되어 변전소 부지감소, 건설비 저감의 효과를 가지고 있으며 기기제작/수송/운반에서도 큰 장점도 가지고 있다. 또한, 초전도변압기는 환경적인 측면에서도 매우 유리한데 이는 인체에 무해한 액체질소를 사용하여 냉각하기 때문에 상전도변압기에서 사용되는 가스를 사용하지 않아도 되어 환경오염, 폭발 등의 위험이 없기 때문이다. 이와 같이 초전도변압기는 전력 손실 저감같은 직접적인 이익 이외에도 위에서 열거한 많은 부가적인 이익을 가지고 있다. 그러나 이러한 부가이익은 실제 적용될 변전소의 상황에 따라 그 편차가 크며 환경측면의 이익의 경우는 현시점에서 구체적으로 정량화하기가 매우 곤란하다. 본 논문에서는 부가 이익 중에서 정량화가 가능한 변전소 부지감소 및 건설비 감소 효과만을 고려하였다. 154kV 육내GIS 1개 변전소 건설 비용은 주변압기 2대를 기준으로 용지비를 제외하고 100억원~120억원 정도가 소요된다[10]. 이 중 토건공사비는 약 50% 정도인 50억원~60억원 규모이며 용지비를 고려한다면 이 금액은 훨씬 클 것으로 예상된다[10]. 초전도 변압기의 무게 및 부피는 상전도변압기의 약 40%~60%수준인 것을 고려하면 초전도변압기 사용에 따른 토건공사비 저감이익은 최소한 토건비용의 10% 정도인 5억원~6억원 이다[11]. 따라서, 앞의 변전소 건설비용이

주변압기 2대를 기준으로 하여 산정된 것을 고려해 볼 때, 초전도변압기 1대의 변전소의 부지감소 및 건설비 저감효과는 약 2.5억원~3억원 정도이며 본 경제성 평가에서는 2.5억원으로 산정하였다.

4. 초전도변압기 시장진입 가격 산정

초전도변압기 Life-cycle 비용 산정 수식을 나타내면 식(2)와 같다. 초전도변압기의 Life-cycle 비용을 구하는데 있어 초전도변압기 가격이 현재 미지수 이므로, 본 논문에서는 상전도 변압기 가격에 가격지수를 곱한 가격을 초전도변압기 가격으로 보고 Life-cycle 비용을 산정하였다. 여기서, 가격지수(N)은 상전도 변압기 가격에 대한 초전도변압기 가격의 비율을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} & \text{○ 초전도변압기 Life-cycle 비용} & (2) \\ & = (\text{상전도변압기 가격} \times \text{가격지수}) + \text{설치비용} + \text{수명기간} \times \\ & \quad (\text{연간전력손실 및 탄소세비용} + \text{상전도변압기 가격의} \\ & \quad 7\%) \end{aligned}$$

$$\text{가격지수}(N) = \frac{\text{초전도변압기 가격}}{\text{상전도변압기 가격}} \quad (3)$$

위에서 언급한 Life-cycle 비용 계산 방법을 이용하여 최종적으로 시장진입 가격 산정 수식을 수립하면 아래 식(4)와 같다. 결국 앞서 계산한 상전도 변압기의 Life-cycle 비용과 초전도변압기 Life-cycle 비용, 그리고 초전도변압기 사용에 따른 부가이익 항목을 고려하여 초전도변압기의 시장진입 가격을 추정하는 것이다. 여기서, 시장진입 가격은 초전도변압기 및 냉각장치를 포함하는 가격이며, 여유도 k는 초전도변압기가 상전도 변압기 보다 가격 경쟁력을 가지기 위한 가격 여유 마진을 의미한다. 아래 표 2에서는 식(4)에서 사용된 파라미터들에 대한 정의를 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} & RC_{HTSTR} \\ & = K \times (TC_{CC} + IC_{CC} - TC_{HTS} - IC_{HTS} + LC \times \\ & \quad (AL_{CC} AC_{CC} + AMC_{CC} - AL_{HTS} AC_{HTS} \\ & \quad - AMC_{HTS}) + EB_{HTS}) \end{aligned} \quad (4)$$

표 2 파라미터 정의

RC_{HTSTR}	초전도변압기 시장진입 가격(억원/대)
K	여유도 ($K < 1$)
LC	상전도 및 초전도변압기 수명(년)
TC_{CC}	상전도변압기 가격(억원/대)
IC_{CC}	상전도변압기 설치비용(억원/대)
IC_{HTS}	초전도변압기 설치비용(억원/대)
AL_{CC}	상전도변압기 전력손실 (억원/년)
AC_{CC}	상전도 변압기 탄소세비용 (억원/년)
AMC_{CC}	상전도변압기 유지보수비용(억원/년)
AL_{HTS}	초전도변압기 전력손실 (억원/년)
AC_{HTS}	초전도변압기 탄소세비용 (억원/년)
AMC_{HTS}	초전도변압기 유지보수비용(억원/년)
EB_{HTS}	초전도변압기 적용에 따른 부가이익(억원/대)

위에서 제시한 시장진입 가격 산정식을 이용하여 154/22.9kV 초전도변압기의 시장진입 가격을 살펴보면 가격 여유마진을 10% 적용시 약 15.5억원/대(상전도변압기 가격의 2.6배)로 추정된다. 따라서, 초전도변압기가

상전도변압기 대비 약 2.6배 이하의 가격으로 개발될 경우 상전도 변압기에 비하여 가격측면의 경쟁력을 가지게 되는 것을 의미하는데 만일 초전도변압기 적용에 따른 기타 부가이익을 고려한다면 가격 경쟁력은 보다 높아질 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 Life-cycle 비용 수식과 가격지수 개념을 도입하여 초전도변압기가 성공적으로 시장에 진입할 수 있는 최대한계가격인 시장진입가격 산정수식을 수립하였다. 또한 시장진입가격 산정수식을 이용하여 현재 개발중인 154kV급 60MVA 초전도변압기의 시장진입 가격을 예상하였다. 검토결과 154/22.9kV 초전도변압기의 시장진입가격은 15.5억원/대(154/22.9kV 상전도변압기 가격의 2.6배)로 추정된다. 따라서, 초전도변압기가 상전도 변압기 가격 대비 2.6배 이하로만 개발가능하다면 상전도 변압기에 대한 가격경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 위의 가격은 초전도변압기 적용에 따른 직접적인 효과만을 고려하여 계산한 값이므로 간접적인 적용효과를 고려한다면 실제 시장진입 가격은 보다 더 큰 값을 가질 것으로 예상된다. 단, 본 검토결과와는 초전도 변압기 경제성 분석을 위한 검토방법론 수립 및 실제 개발자들에게 기기 개발방향의 가이드라인을 제시하는데 큰 의미가 있으며 향후 실제 계통 적용 시에는 각 적용 사례별로 보다 정밀한 경제성 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] 류강식, "초전도용융기기 및 시스템의 연구동향과 발전방향", 초전도 저온공학, Vol. 1, No. 1, pp.18~27, 1999.
- [3] Ramanan, V.R., Gilbert N. Riley, Jr., Lawrence J. Masur, and Steinar J. Dale, "A Vision for Applications of HTS Transformers," International Wire & Cable Symposium Proceedings, pp. 360, 1998.
- [4] Schwenterly, S. W., "Performance of a 1MVA HTS demonstration transformer," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No.2, pp. 680, June, 1999.
- [5] HTS Transformer Development in Japan, <http://itri.loyola.edu/scpa/03-07.htm>, Sep. 1997.
- [6] 한국전력공사, "장기 송변전 설비계획", 2002
- [7] 한국전력공사, "한전 전력통계자료집", 2002
- [8] KOGAS, <http://www.kogas.or.kr>
- [9] 한국에너지경제연구원, "Estimates on CO2 Tax in long future", 2003
- [10] 한국전력공사, "한전 송변전 설비 건설단가", 2002.
- [11] Mehta, Sam P., Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming Transformers," IEEE Spectrum, July, 1997.