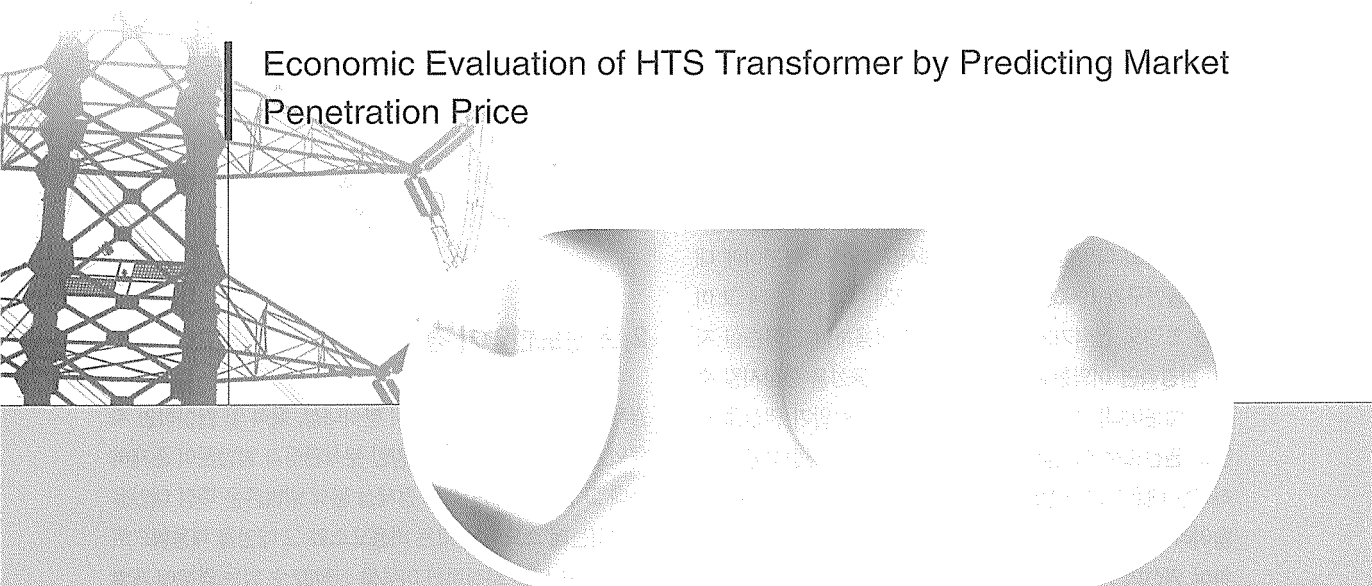


초전도변압기

시장진입 가격예측을 통한 경제성 분석



Economic Evaluation of HTS Transformer by Predicting Market Penetration Price

자료원 : 전기학회 논문지 제53권 제9호(2004년 제9월호)

필자 : 김종율, 이승렬, 윤재영

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 these days, companies world-wide have conducted researches on HTS transformer. A development project for a 154kV HTS transformer is proceeding at a research center and university in Korea. 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.

KeyWords

HTS Transformer, Economic Assessment, Life-cycle Cost, Expected Market Price

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 액체 헬륨을 사용하는 중전의 저온초전도체(LTS:Low Temperature Superconductor)보다 가격측면에서 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, 환경측면 이익향유 및 계통운영의 효율성을 향상시킬 수 있기 때문이다[1-2]. 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[3]. 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.

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, 초전도기기를 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 한다. 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 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. 초전도변압기 경제성 분석방법론 고찰

경제성 분석을 수행함에 있어 분석대상, 목적 및 현실적인 자료의 존재여부에 따라서 다양한 분석관점과 방법론이 존재하는데 그 중 가장 일반적인 경제성 분석 방법론은 특정 대안을 적용하는데 소요되는 모든 비용요소와 그 대안을 채용함으로써 얻을 수 있는 경제적인 이득을 산정할 수 있는 경우에 개별 대안들에 대하여 비용과 이익을 각각 산정하고 이 중 B/C(Benefit/Cost) Ratio가 가장 높은 대안을 채택하는 직접분석법과 특정 대안의 비용과 이득요소를 구하기 힘든 경우 해당 대안을 적용할 수 있는 기본조건을 역으로 산정하는 간접분석법이 있다[4].

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, 초전도기기에 대한 경제성 분석은 직접적인 분석방법을 적용하기 보다는 해당 초전도기기가 실 계통에 적용될 수 있는 기본 경제성 요건을 산정하여 역으로 초전도기기 개발자들에게 개발 방향을 제시하는 역할이 현재로서는 보다 타당할 것으로 판단된다.

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 상전도 변압기와 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[5,6].

Life-cycle 비용 (1)

$$\begin{aligned}
 &= \text{초기 투자비용} + \text{운전비용} \\
 &= (\text{변압기 가격} + \text{설치비용}) + (\text{전력손실비용} + \text{탄소세비용} \\
 &\quad + \text{유지보수비용})
 \end{aligned}$$

① 초기 투자비

변압기 1대를 설치하는데 소요되는 초기비용으로 변압기 가격 및 설치비용으로 구성된다. 설치비용은 변전소에 변압기를 설치하는데 필요한 비용이며 초전도변압기의 경우 변압기 가격 및 설치비용은 냉각장치를 포함하고 있다.

② 운전비용

변압기 수명기간 동안 매년 발생하는 운전비용을 의미하여 송전손실에 의해 발생하는 손실비용과 손실만큼의 전력을 생산하는데 발생하는 CO2 탄소세 비용을 고려하였다. 이외에 변압기의 유지보수를 위한 비용도 고려되었으며, 초전도변압기의 경우는 냉각장치까지 포함하였다.

3. 시장진입 가격산정

초전도변압기 경제성 분석에서는 동일한 용량을 가진 154/22.9kV 상전도 및 초전도변압기 1대당 Life-cycle 비용을 계산하고 이를 이용하여 초전도변압기 시장진입 가격을 제시하였다. Life-cycle 비용 계산에 있어 초전도변압기 사용에 따른 환경측면의 이익, 저임피던스 특성에 의한 커패시터 및 OLTC 비용절감 이익 등은 배제하였다. 그 이유는 초전도변압기 사용에 따른 부수적 효과들은 실제 적용될 변전소의 상황에 따라 그 편차가 매우 커서 일반화된 공통기준으로 평가하는데 어려움이 있기 때문이다.

또한 본 논문의 목적이 가격 경쟁력 확보를 위한 가이드 라인 수준의 시장진입 가격제시에 있으므로 변압기 단품에 대한 일대일 비교를 통하여 적절한 가격을 산정하는 것이 보다 적합하다고 판단된다. 부가적인 효과들을 고려한 정밀검토는 실제 구체적인 적용 사례검토 시 별도로 수행되어야 할 것으로 사료되며, 아래에서는 초전도변압기 경제성 평가 방법론에 의한 상세 경제성 분석 결과에 대해 기술하고 있다.

3.1 연간 전력손실 비용

3.1.1 연간 전력손실 비용 산출 자료

변압기의 손실은 크게 동손과 철손 두 가지로 구분할 수 있다. 그 중 동손은 부하손으로서 변압기 부하조건에 따라 변화하게 되며, 철손은 무부하손으로서 부하조건과는 무관하게 일정한 전력을 소비하게 된다. 따라서, 동손에 의한 전력손실을 계산함에 있어서는 부하조건, 즉, 변압기 이용률을 고려하여 계산하였다. 초전도변압기의 경우는 위의 두 손실 이외에도 누설 열 및 초저온 상태에서의 동작으로 인한 열적손실이 추가적으로 발생한다. 초전도변압기에서는 동손 및 열적손실에 의해 발생하는 열 에너지를 냉각장치를 이용하여 제거하여 초전도 상태를 유지하여야 한다. 본 검토에서는 초전도변압기 손실을 산정함에 있어 냉각장치에 의한 손실도 함께 고려하였다.

① 변압기 손실

한전계통의 154/22.9kV 변압기 용량은 45/60MVA가 가장 일반적이므로 본 경제성 검토에서는 이 용량을 기준으로 하여 전력손실을 계산하였다. 변압기 종류에 있어 이전에는 주로 3상 일괄형을 사용하였으나 제작 및 운반상의 어려움으로 인하여 현재에는 단상형 변압기를 주로 사용하고 있다. 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 개발 중인 기기의 정확한 데이터를 산정하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 해외사례의 경우도 개발 초기단계로서 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-m과 60MVA 변압기 설계시 필요한 선재길이를 고려해 볼 때 약 3kW~5kW의 손실이 발생하며 본 논문에서는 이 값의 중간값인 4kW를 사용하였다[7]. 무부하손실의 경우 상전도변압기 무부하손실의 약 1.3배 정도가 발생하는 것으로 나타났으며 여기서는 60 kW가 손실로 발생한다[8]. 열적손실의 경우 변압기 용량의 약 0.01% 정도가 발생하며 6kW가 발생하는 것으로 산정하였다[9]. 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 변전 설비용량과 변압기 1대당 용량을 이용하여 계산하였다[10]. 154kV 변전설비용량은 앞서 언급한 바와 같이 한전 자료를 근거로 하여 113,210[MVA]로 산정하였다. 변압기 1대당 용량은 변압기 설계관점에서는 45[MVA]를 기준으로 하지만 계통 운전관점에서는 강제냉각을 통하여 용량 60 [MVA]로 운영되므로 60[MVA]를 기준으로 하였다. 이를 이용하여 변압기

총 대수를 계산해보면 총 1,887대인 것으로 나타났다.

③ 전기요금

본 논문에서 전력손실 비용은 현 시점의 전기요금을 기준으로 계산하였으며, 현재까지 발간된 한전통계자료가 2002년 데이터까지를 포함하고 있으므로 2002년 평균 명목전기요금 73.88원/kWh를 기준요금으로 선정하였다[11].

④ 연간 변압기 평균 이용률

연간 변압기 평균 이용률은 연간 전력판매량과 변압기 설비용량의 비율로서 다음과 같은 식(2)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\text{평균 이용률 [\%]} = \frac{\text{연간 전력판매량 [GWh]}}{\text{변압기 설비용량 [MVA]} \times 8760 [h]} \quad (2)$$

2010년 예상 판매 전력량 355,324 [GWh] 및 변전용량 113,210[MVA]을 기준으로 연간 변압기 평균 이용률을 검토한 결과, 154/22.9kV 변압기의 평균 이용률은 약 35.8% 정도로 예상된다[10-11]. 그러나 실제 계통에서 변압기 이용률은 변전소 위치 및 운전조건에 따라 상당한 편차를 가지게 되는데 본 검토에서는 부하밀도가 상대적으로 높고 신규 변전소 부지확보가 어려운 수도권지역을 초전도변압기 적용대상으로 선정하였다. 이 경우 수도권 평균 이용률은 전국 평균 이용률 보다 다소 높은 46.5%로 나타났으며 Life-cycle 비용 산정 시 이 값을 적용하였다.

3.1.2 변압기 1대당 전력손실 비용

저항이 거의 없는 초전도 선재를 이용한 초전도변압기는 동손(2R)이 매우 적어 기존 변압기에 비하여 전력손실 측면에서 유리하다. 그러나 앞선 자료의 동손은 전부하시의 손실을 나타내고 있는데 실제 계통운영 관점에서 변압기의 부하조건은 항상 100%로 운전되지 않는다. 따라서, 변압기 동손에 의한 연간 전력손실량은 변압기의 연중 이용률을 고려하여 계

산되어야 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.

검토결과 상전도 변압기와 초전도변압기의 전부하시 부하손차이에 비해 실제 전력손실량 차이는 그다지 크지 않다. 이는 부하손에 의한 전력손실량이 이용률의 제곱에 비례하게 되므로, 여기서 제시한 46.5%의 이용률을 적용할 경우 실제 변압기의 부하손실량은 전부하시에 비해 훨씬 적어지게 된다. 이러한 특성을 감안할 때 향후 초전도변압기는 부하 밀도가 상대적으로 높은(이용률이 높은) 대도시 인근 변전소에 적용하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

따라서, 초전도변압기 사용으로 인해 연간 0.37억원/대의 전력손실 비용을 저감할 수 있으며 변압기의 수명을 30년으로 가정한다면 총 11.1억원/대의 전력손실 비용을 저감할 수 있게 된다. 아래 표 1에서는 위에서 언급한 내용들을 간략히 정리하여 나타내고 있다.

〈표1〉 상전도 및 초전도변압기 전력손실 비용 비교
Table 1 Electric loss of conventional and HTS transformer

	상전도 변압기	초전도 변압기	비 고
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

3.2 CO2 탄소세 비용 산출

초전도변압기 1대당 연간 전력 손실저감량은 500[MWh]인데, 이는 곧 발전소에서 전력생산시 전력손실 저감량 만큼의 전력을 생산하지 않아도 됨을 의미한다. 따라서, 전력생산시 발생하는 CO2 배출량이 감소하게 되어 탄소세 비용을 저감하는 효과를 기대할 수 있게 된다. 아래에서는 상전도 및 초전도변압기의 CO2 탄소세 비용을 산출하고 초전도변압기 사용에 따른 탄소세 저감 효과를 검토하였다.

3.2.1 변압기 1대당 탄소세 비용 산출 자료

① 발전원별 전력생산량

한전 전력통계 자료의 발전원별 전력생산량을 살펴보면 다음과 같다. 2002년 실적을 기준으로 전력생산량 비율을 살펴보면 수력 1.7%, 석탄 39.6%, 유류 6.0% 및 LNG 13.3%, 원자력 39.4%로 나타났다[1].

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[12].

③ CO2 단위 무게당 탄소세

향후 적용될 CO2 단위 무게당 탄소세 가격은 관련연구기관 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[13]. (환율 1,200 원 기준으로 한화 24,000원/TCE)

3.2.2 탄소세 비용

앞서 언급한 자료와 아래 식(3)을 근거로 하여 변압기 1대당 탄소세 비용을 산정하였다. 변압기 1대당 연간 전력손실량을 근거로 하여 상전도 및 초전도변압의 연간 탄소세 비용을 아래 식(3)을 이용하여 계산해보면 각각 0.103억원과 0.054억원으로 나타났다. 따라서, 상전도 대신 초전도변압기를 사용하였을 경우 변압기 1대당 연간 탄소세 저감 이익은 약 0.049억원 정도로 추정된다.

탄소세 비용 (3)

$$= \text{변압기 1대당 연간전력손실량[MWh]} \times \text{화력발전비율[\%]} \\ \times \text{화력발전 MWh당 CO2배출량[TCE/MWh]} \times \text{CO2 단위} \\ \text{무게당 탄소세[원/TCE]}$$

3.3 초전도변압기 시장진입 가격 산정

3.3.1 Life-cycle 비용 산출 자료

본 논문에서는 변압기의 Life-cycle 비용 개념을 이용하여 초전도변압기 시장진입 가격을 산정하였으며 Life-cycle 비용 계산시 사용된 각 비용 관련 자료는 다음과 같다.

① 초기 투자비용

변압기 기기 가격과 설치비용을 고려하였으며 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 운전비용

전력손실 및 탄소세 비용, 유지보수 비용을 고려하였으며 전력손실 및 탄소세 비용은 앞선 계산 결과를 사용하였다. 유지보수 비용은 과거 한전에서 실적 값을 살펴보면 송변전설비의 운전유지비 및 제세 보험금 비율이 연 5.34%로 나타나 있다[14]. 본 검토에서는 유지보수 비용이 점차 감소하는 경향을 고려하여 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 선택한 이유는 초전도변압기의 경우 변압기 자체 이외에 냉각설비의 유지보수에 발생하는 비용을 반영하였기 때문이다.

3.3.2 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 기름을 사용하지 않아도 되어 환경오염, 폭발 등의 위험이 없기 때문이다. 또한 계통운영 측면에서도 초전도변압기는 저임피던스 특성에 의한 커패시터 및 OLTC 비용절감 이익 등을 기대할 수 있다. 이와 같이 초전도변압기는 전력손실 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. 따라서본 논문에서는 부가이익 중에서 정량화가 가능한 변전소 부지감소 및 건설비 감소 효과만을 고려하였다. 154kV 옥내GIS 1개 변전소 건설비용은 주변압기 2대를 기준으로 용지비를 제외하고 100억원~120억원 정도가 소요된다[15]. 이 중 토건공사비는 약 50% 정도인 50억원~60억원 규모이며 용지비를 고려한다면 이 금액은 훨씬 클 것으로 예상된다[15]. 초전도변압기의 무게

및 부피는 상전도변압기 의 약 40% ~ 60%수준인 것을 고려 하면 초전도변압기 사용에 따른 토건공사비 저감이익은 최소한 토건비용의 10% 정도인 5억원 ~ 6억원 이다[16]. 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.

3.3.3 시장진입 가격

앞선 식(1)의 상전도변압기 Life-cycle 비용 산정 수식을 이용하여 초전도 변압기 Life-cycle 비용 산정 수식을 나타내면 식(4)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)는 상전도 변압기 가격에 대한 초전도변압기 가격의 비율을 나타내고 있다.

초전도변압기 Life-cycle 비용 (4)

$$= (\text{상전도변압기 가격} \times \text{가격지수}) + \text{설치비용} + \text{수명기간} \times (\text{연간전력손실 및 탄소세비용} + \text{상전도변압기 가격의 } 7\%)$$

$$\text{가격지수}(N) = \frac{\text{초전도변압기 가격}}{\text{상전도변압기 가격}} \quad (5)$$

위에서 언급한 Life-cycle 비용 계산 방법을 이용하여 최종적으로 시장진입 가격 산정 수식을 수립하면 아래 식(6)과 같다. 결국 앞서 계산한 상전도 변압기의 Life-cycle 비용과 초전도 변압기 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(6)에서 사용된 파라미터들

에 대한 정의를 나타내고 있다.

$$RC_{HSTR} = k \times (TC_{CC} + IC_{CC} - TC_{HTS} - IC_{HTS} + LC \times (AL_{CC} AC_{CC} + AMC_{CC} - AL_{HTS} AC_{HTS} - AMC_{HTS})) + EB_{HTS} \quad (6)$$

〈표 2〉 파라미터 정의

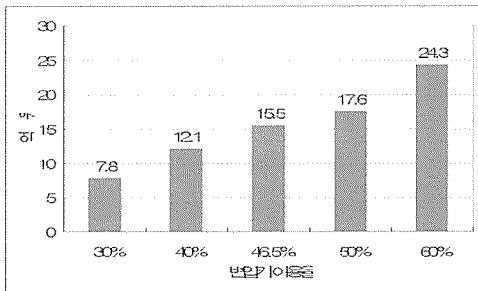
Table 2 Definition of parameters

RC _{HSTR}	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 여유 마진을 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 커질 것으로 판단된다.

4. 변압기 평균 이용률 변화에 따른 시장진입 가격

초전도변압기의 시장진입 가격은 변압기의 평균 이용률에 의해 다소 편차를 가지게 된다. 이는 변압기의 전력손실량이 이용률의 제곱에 비례하여 변화하기 때문이다. 변압기 이용률 변화에 따른 초전도변압기 시장진입 가격 변화추이를 살펴보면 아래 그림 1과 같다. 변압기 이용률 증가에 따라 초전도변압기 시장진입 가격도 상승하게 되는데, 본 검토에서 예상한 2010년 변압기 평균 이용률 46.5%를 적용 할 경우 시장진입 가격은 약 15.5억원/대 인데 반하여 50%인 경우는 17.6억원/대(상전도변압기 대비 약 2.9배)로 증가하게 된다. 반대로 이용률이 30%로 감소하게 되면 시장진입 가격 역시 7.8억원/대(상전도변압기 대비 약 1.3배)로 하락하게 된다. 실제 계통에서 이용률은 변압기가 설치될 변전소에 따라 큰 편차를 가지게 되는데, 예를들어 부하밀도가 높은 수도권이나 대도시 인근 변전소의 변압기 이용률은 평균 이용률 보다 훨씬 높을 것으로 예상된다. 따라서, 향후 개발될 초전도변압기의 적용대상 선정에 있어 이러한 특성을 반영하여 검토하여야 할 것이다.



〈그림1〉 변압기 이용률에 따른 초전도변압기 시장진입 가격
 Fig. 1 Market penetration price of HTS transformer with variation of utility factor

5. 결론

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. 본 논문에서 검토한 결과를 간단히 요약하면 다음과 같다.

- 154/22.9kV 초전도변압기의 시장진입가격은 15.5억원/대 (154/22.9kV 상전도변압기 가격의 2.6배)로 추정된다. 따라서, 초전도변압기가 상전도변압기 가격 대비 2.6배 이하로만 개발가능하다면 상전도변압기에 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.
- 변압기 이용률변화에 따른 시장가격 민감도를 분석한 결과 이용률이 50%로 증가하면 초전도변압기의 시장진입가격도 17.6억원/대로 증가하였으며 반대로 이용률이 30%로 하락하면 시장진입가격 역시 7.8억원/대로 감소하게 된다. 실제 계통에서는 변압기가 설치될 변전소의 위치에 따라 이용률은 큰 편차를 가지게 된다. 예를 들어 부하밀도가 높은 수도권이나 대도시 인근 변전소의 변압기 이용률은 평균 이용률 보다 훨씬 높을 것으로 예상된다. 이는 향후 개발될 초전도변압기의 가격경쟁력이 적용하고자 하는 변전소 위치에 따라 가변적임을 뜻하며 실제 계통적용 방안 검토시 반영되어야 할 것으로 생각된다.

현 시점에서 기기 파라미터의 불확실성, 미래 계통구성의 가변성을 고려할 때 정확하고 절대적 가격을 제시하기는 불가능하다. 그러므로 본 논문에서는 시장진입 가격 산정함에 있어 여러 가지 제약사항과 데이터의 불확실성을 고려하여 정량적인 방식과 정성적인 방식을 혼합하여 사용하였으며, 일부 데이터의 가정 및 데이터 추정은 필연적으로 요구하게 된다. 이러한 상황을 종합해 볼 때, 본 검토결과는 초전도변압기 경제성 분석을 위한 검토방법론 수립 및 실제 개발자들에게 기기 개발방향의 가이드라인을 제시하는데 큰 의미가 있으며 향후 실제 계통 적용시에는 각 적용사례별로 보다 정밀한 경제성 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] John Cerulli, "State of the Art of HTS Technology for Large Power Applications: Current Programs and Futrure Expectations" Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting, Dec., 1998.
- [2] R. S. Silbergliitt, Emile Etedgui, Anders Hove, "Strengthening the Grid : Effect of High Tem- perature Superconducting(HTS) Power Technologies on Reliability, Power Transfer Capacity, and Energy Use" Rand Corp., July 2002.
- [3] 류강식, "초전도응용기기 및 시스템의 연구동향과 발전방 향", 초전도 저온공학, Vol. 1, No. 1, pp.18 ~ 27, 1999.
- [4] 한국전력공사, "투자사업을 위한 경제성 평가", 1994.
- [5] Diego Politano, Marten Sjostrom, Gilbert Schnyder and Jakob Rhyner, "Technical and economical Assessment of HTS Cable," IEEE Transactions on applied superconductivity conference, Sept, 2000.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Schwenterly, S. W., "Performance of a 1MVA HTS demonstration transformer," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No.2, pp. 680, June, 1999.
- [9] HTS Transformer Development in Japan, <http://itri.loyola.edu/scpa/03-07.htm>, Sep. 1997.
- [10] 한국전력공사, "장기 송변전 설비계획", 2002
- [11] 한국전력공사, "한전 전력통계자료집", 2002
- [12] KOGAS, <http://www.kogas.or.kr>
- [13] 한국에너지경제연구원, "Estimates on CO2 Tax in long future", 2003
- [14] 한국전력공사, "한전 경영통계", 1997.
- [15] 한국전력공사, "한전 송변전 설비 건설단가", 2002.
- [16] Mehta, Sam P., Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming Transformers," IEEE Spec- trum, July, 1997.

저자 소개

김 종 울 (金鍾律)



1974년 07월 06일생, 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국 전기연구원 전력연구단 신전력시스템 그룹 연구원
Tel : 055-280-1336, Fax : 055-280-1390
E-mail : jkim@keri.re.kr

이 승 렬 (李昇烈)



1975년 09월 23일생, 1999년 고려대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2003년 동 대학원 전기공학과 박사수료, 현재 한국 전기연구원 전력연구단 신전력시스템그룹 연구원
Tel : 055-280-1358, Fax : 055-280-1390
E-mail : srlee@keri.re.kr

윤 재 영 (尹在映)



1962년 07월 30일생, 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력 시스템 그룹장
Tel : 055-280-1316, Fax : 055-280-1390
E-mail : jyyoon@keri.re.kr