

고온초전도 변압기의 개발 동향

최 경 달

한국산업기술대학교 전기전자공학과

1. 서 론

1960년대, 초전도 변압기에 대한 개념이 도입된 후 40여 년이 지났지만, 아직 초전도 변압기는 실용화되지 못한 상태이다. 1960, 70년대에는 초전도체에 교류전류가 흐를 때 발생하는 교류손실이 실용화를 가로막는 가장 큰 걸림돌이었다. 이 문제는 1980년대 초반 교류용 초전도선재(NbTi)가 개발됨으로써 해결되어 실용화의 가능성이 보이게 되었지만, 1986년 고온초전도체의 발견으로 인해 초전도 전력기기의 실용화 논의는 새로운 국면을 맞게 되었다. 고온초전도체의 등장은 새로운 소재 출현에 대한 기대감을 가져와 초전도기기의 실용화를 다소 늦춘 감이 있지만, 저온 초전도체와는 비교할 수 없을 정도의 경제성을 가져다주었다. 일례로 1981년 웨스팅하우스에서 저온 초전도 변압기를 개념 설계할 당시만 해도, 초전도 변압기가 일반 변압기보다 경제성을 갖는 용량이 300MVA 이상이였다. 현재의 기술로 고온 초전도 변압기를 만든다고 할 때, 이 한계 용량은 그 때의 1/10 인 30MVA 정도이다. 초전도 변압기의 장점 중 가장 먼저 꼽을 수 있는 점이 크기가 작고 가볍다는 것이라면, 일반 변압기와 경쟁할 수 있는 용량이 이처럼 소용량에서도 가능하다는 것은 향후 초전도 산업 발전에 큰 영향을 미칠 것이다.

초전도 현상의 대표적인 특징은 저항이 없다는 점이다. 따라서 일반적인 생각으로 초전도 전력기기는 저항에 의한 주울 손실이 없어, 기존의 일반 전력기기보다 높은 효율을 가질 것으로 기대한다. 그러나 지금 사용하고 있는 전력기기들은 모두 그 개발 역사가 100년이 넘고 있으며 현재의 기술 수준에서 거의 한계에 다다를 만큼 효율을 개선시켜 왔기 때문에, 초전도 현상을 이용한다고 해도 향상시킬 수 있는 효율 폭은 그리 크다고 할 수 없는 실정이다. 실제로 30 MVA 급 일반

변압기의 효율은 99.3 ~ 99.7 % 정도이어서 고온 초전도 변압기를 사용해도 0.1 % 정도밖에 효율 향상을 기대할 수 없다.

변압기 한 대를 두고 볼 때, 이 정도의 효율 향상 효과는 극히 미미하다고 할 수 있지만 전체 계통에서 사용하고 있는 변압기를 모두 고온 초전도 변압기로 대체한다고 하면 그 경제적 효과는 상상외로 크게 된다. 통계에 따르면 미국에서 변압기의 손실로 생기는 금액은 연간 20억 달러 이상이므로, 0.1 %의 효율 향상으로 손실이 1/10 이상 감소한다면 연간 수억 달러 이상의 경제적 이득을 얻을 수 있다.

그러나 이 정도의 경제적 효과만으로는 지금 사용하고 있는 일반 변압기를 고온 초전도 변압기로 대체해야 하는 당위성을 얘기할 수 없다. 초전도 변압기는 일반 변압기와 다른 특징을 갖고 있다. 그리고 바로 이런 특징들은 일반 변압기로는 구현할 수 없는 성능을 나타내 주기 때문에 향후 전력계통에 새로 투입되거나 교체되는 변압기는 고온 초전도 변압기로 대체될 가능성이 높은 것이다.

본 논문에서는 이와 같이 일반 변압기를 능가하는 고온 초전도 변압기의 특성을 알아보고, 외국의 고온 초전도 변압기 개발 사례 등을 소개한다.

2. 고온초전도 변압기의 특징

고온초전도 현상을 전력기기에 응용하여 실용화시키기에는 아직 많은 어려움이 남아 있다. 그러나 초전도 분야의 전문가들은 고온 초전도 전력기기가 늦어도 10년 이내에 실용화될 것으로 예상하고 있으며, 이 중에서 가장 먼저 실용화가 가능하고 수요가 제일 많은 전력기기로 고온초전도 변압기를 꼽고 있다.

초전도 변압기의 기본 구조는 일반 변압기와 크게 차이가 없다. 1차 권선과 2차 권선 사이에 자기 결합이 잘 되도록 철심을 두고,

철심의 단면적 등을 설계하는 기준은 일반 변압기와 동일한 기준을 적용한다. 열적 또는 기계적인 측면에서 초전도선을 냉각시키고 온도를 유지하기 위해 극저온 용기가 필요하다. 철심과 권선을 함께 냉각시킬 수 있지만 철심에서 발생하는 열로 냉매가 기화하면 이를 다시 액화하는 데는 20배 정도의 전력이 필요하므로 전체 효율면에서 철심을 냉각시키는 방법은 바람직하지 않다. 따라서 철심은 상온에 두고 1차, 2차 권선만 냉각시켜야 하며 가운데가 빈 저온 용기에 권선을 설치하고 철심은 저온 용기의 중심으로 통과시키는 구조를 가져야 한다. 그림 1은 일반적인 고온초전도 변압기의 구조이다.

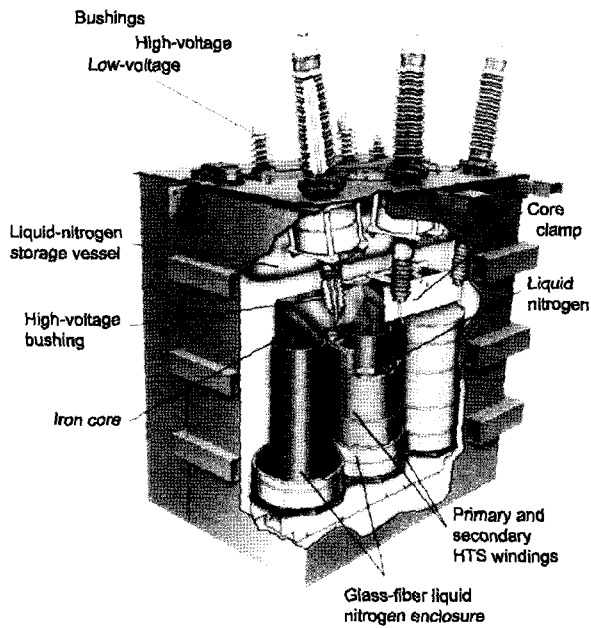


그림 1. 고온초전도 변압기의 구조

초전도변압기가 갖는 장점은 다음과 같다.

• 효율상승

초전도체의 대표적인 특징은 저항이 없다는 점이다. 저항이 없으므로 전류가 흐를 때 발생하는 주울 열 손실, 즉 동손이 없어 초전도 변압기는 일반 변압기보다 효율이 높다. 그러나 일반 변압기의 경우에도 변전소 등에서 사용하는 대용량 변압기의 효율은 현재 99% 이상이어서 초전도화 함으로써 개선할 수 있는 효율 상승폭은 0.2% 정도이다.

• 무게 및 부피 감소

초전도변압기의 다른 장점으로 무게와 부피의 감소를 들 수 있다. 고온초전도체가 발견되기 전인 1981년 미국의 Westinghouse 사는 저온초전도 변압기의 경제성을 연구하였고 당시의 기술 수준에서 초전도 변압기가 일반 변압기보다 경제적인 용량을 대략 300 MVA 정도라고 발표하였다. 1997년에 미국 Waukesha Electric Systems 사는 중용량 변압기 중 대표적인 30 MVA, 138 kV/13.8 kV 용량의 변압기를 고온초전도 변압기로 대체할 때의 효과를 연구하였으며, 그 결과 현재는 30 MVA 급에서도 고온 초전도 변압기의 가격을 일반 변압기보다 더 낮출 수 있다는 결과를 얻었다. 변압기 권선을 초전도 선으로 대체하면 손실이 줄어들 뿐만 아니라 같은 단면적의 선에 10 ~ 20 배의 전류를 흘릴 수 있으므로 선의 양을 크게 줄일 수 있다. 실제로 30 MVA 급 변압기에 사용되는 구리선은 수천 kg 정도인 데 비해 고온초전도 변압기에서는 수십 kg의 초전도 선으로 충분한 것으로 밝혀졌다.

그림 2에 일반 변압기와 순환 방식, 비순환 방식의 고온 초전도 변압기의 크기를 비교하였다. 3가지 형태의 변압기 모두 138 kV/13.8 kV, 30 MVA 용량이다. 그림에 나와 있듯이 고온초전도 변압기의 중량은 순환 방식의 경우에는 일반 변압기의 1/2, 비순환 방식의 경우에는 일반 변압기의 1/3로 감소함을 알 수 있다.

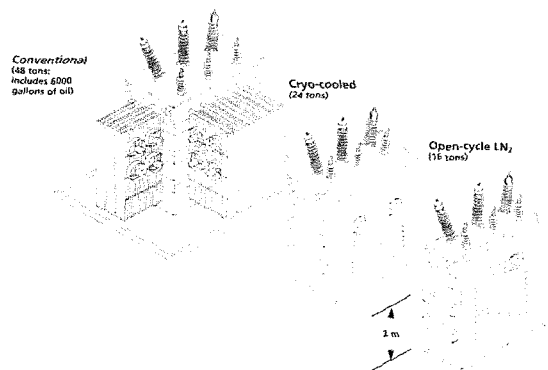


그림 2. 30 MVA 일반 변압기와 고온초전도 변압기의 비교

• 안전하고 환경친화적

일반 변압기에서는 권선의 냉각과 절연을 위해 절연유를 사용한다. 30 MVA 급 변압기에 들어가는 절연유는 대략 23,000 리터나 되며 이 절연유는 환경 오염과 변압기 과열시 화재나 폭발 위험이라는 문제점이 있다. 고온초전도 변압기는 냉각을 위해 액체 질소를 사용한다. 꼭 액체 질소를 사용할 필요는 없으나 20 ~ 77 K의 온도 범위에서 값싸고 안전한 냉매로서 액체 질소가 가장 적합하다. 냉매인 액체 질소는 고온초전도 변압기 권선의 절연도 담당한다.

• 과부하내력 증가

중용량급 이상의 변압기 수명은 대략 30 ~ 40년 정도로 보고 있다. 변압기를 30년 이상 사용하기 위해서는 변압기 내부에서 온도가 가장 높은 지점이 110°C를 넘어서는 안된다. 만일 이 한계를 20°C 이상 초과해서 사용한 기간이 총 100일을 넘긴다면 변압기 수명은 25 % 감소한다. 초과 사용 기간이 10 %를 넘어서면 수명은 절반 이하로 줄어든다. 한 여름철의 전력 수요는 이 기간을 제외한 일년 중 평균 수요의 2배 가까이 된다. 이 기간의 수요에 맞춰 용량이 결정된 변압기는 그 결과 일년 중 대부분의 기간동안 정격의 50 % 정도밖에 사용하지 못하며 이에 따라서 운전 효율도 나빠질 수밖에 없다. 그렇지 않고 변압기 용량을 낮추어서 설치한다면 변압기 수명이 급격히 감소하므로 현재의 일반 변압기로는 이 문제를 해결할 수 없다.

고온초전도 변압기의 경우, 정격 전류를 넘는 부하 전류를 흘린다고 해서 일반 변압기와 마찬가지로 절연이 열화되는 일은 발생하지 않는다. 정격의 200 % 정도인 부하 전류가 흘러도 변압기 수명에는 아무 영향이 없으므로 일년 중 몇 주밖에 되지 않는 피크 부하에 맞춰 변압기 용량을 결정할 필요가 없으며 이에 따라 연간 운전 효율은 일반 변압기보다 더 좋아지게 된다.

고온초전도 변압기의 이런 특성에 따라 향후 고온초전도 변압기 시장은 급속히 팽창할 것으로 예상된다. 그림 3에는 미국의 Oak Ridge National Lab.에서 1997년에 분석한 시장 예측 결과를 나타내었다. 이에 따르면, 2010년에는 전체 변압기 시장의 10%를 고온

초전도 변압기가 차지할 것이며 2020년에는 그 점유율이 76%로 높아질 것으로 나와있다. 또한, International Superconductivity Industrial Summit의 전망에 의하면 초전도 전체 시장은 현시점에서는 15억불, 2030년경에는 482억불에 이를 것으로 생각된다. 이와 같은 수치는 새로운 응용분야가 개발되어 감에 따라 더욱 늘어날 것이다.

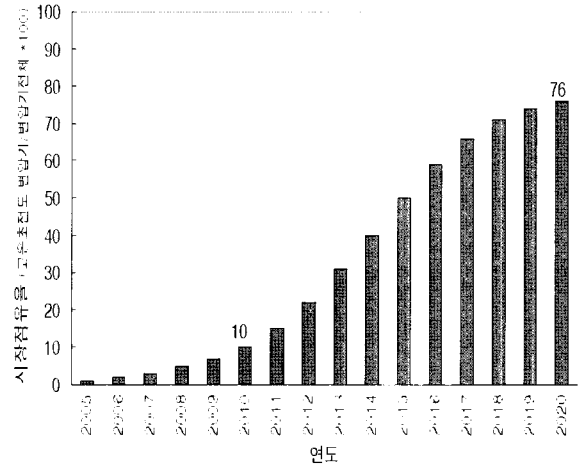


그림 3. 고온초전도 변압기 점유율 예측

위와 같이 고온초전도변압기는 기존이 변압기에 비해서 성능이 우수하고 경제성이 높기 때문에 선진 외국에서는 이에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 국내에서도 이와 같은 추세에 맞추어 1998년도부터 고온초전도변압기에 대한 연구가 시작되었다.

3. 고온초전도 변압기 개발동향

초전도 관련 산업은 여러 분야의 기술이 고도의 기술력을 바탕으로 효율적으로 집적되어야 성공을 거둘 수 있는 산업이다. 초전도 기술의 선두에 서 있는 미국, 일본 등은 이미 정부 주도하에 초전도 관련 기기들의 대부분을 포함하는 종합적인 거대 프로젝트들을 진행 중이다. 일본의 sunshine 프로젝트와 미국의 SPI 프로젝트가 그 예이다. 이 프로젝트들은 에너지 효율 증대를 통한 이윤추구와 더불어 계속 확대될 초전도 시장을 선점하기 위한 목적으로, 정부, 관련 연구소들 그리고 개발된 기술을 사용하게 될 기업체들이 유기적으로 조

화를 이루며 진행되고 있다.

고온초전도 변압기의 경우 미국의 SPI 프로젝트의 일환으로 수행되고 있으며 세 개의 업체와 두 개의 연구소가 팀을 이루어 연구를 수행하고 있다. Waukesha Electric Systems가 팀의 leader이며 IGC (Intermagnetics General Corporation)는 고온초전도 선재를 개발 공급하고 있다. 그리고, Oak Ridge National Lab과 Rensselaer Polytechnic Institute 등의 연구소 등이 참여하고 있으며, 개발된 초전도 변압기를 제작·설치·사용하게 될 업체로서 Rochester Gas & Electric Corporation이 참여하고 있다. 이와 같은 팀 구성을 통해서 연구의 결과가 실제 산업에 그대로 연결되도록 하고 있음을 알 수 있다. 또한 미국의 에너지성(DOE)과 Waukesha에서 수행한 경제성 평가에 관한 연구결과에 의하면 30MVA급 이상의 고온초전도 변압기는 경제성이 있다고 결론이 남으로써 그동안 MVA급 변압기를 제작해서 고온초전도 변압기의 제작 가능성을 확인했으므로 현재는 상업운전이 가능한 대용량화에 주력하고 있다.

국내의 고온초전도 변압기 연구는 1998년부터 연구를 시작하여 실험실 규모의 고온초전도 변압기를 제작하였고, 각종 요소기술 및 기본 특성을 확인하였다. 저온초전도 변압기 연구는 1992년 서울대학교에서 5kVA, 220/110V 단상 저온초전도 변압기 개발에 성공하였고, 최대 8kVA 용량의 부하에 전력을 공급할 수 있었다. 1993년도에는 한국전기연구소에서 5kVA급 단상 저온초전도 변압기를 개발하였으며, 1998년에 기초전력공학공동연구소에서는 3상 100kVA, 440/220V 변압기를 개발하였다.

그림 4는 미국 Waukesha에서 개발한 1MVA 고온초전도 변압기이다. 단상 13.8 kV/6.9 kV의 정격전압을 가지며, 동작온도는 20~30 K이다. 최종 목표는 30MVA, 138kV급 초전도변압기를 개발하는 것이다. 2단계에서는 용량을 증가시켜 26.4 kV/ 4.16 kV, 5/10 MVA 급을 개발하고 있다.

일본의 경우, 1996년 Kyushu대학, Fuji 전기, Sumitomo, KEPCO(Kyushu Electric Power Co.) 등이 참여하여 500kVA, 단상, 6.6kV/3.3kV 고온초전도변압기를 세계 최초로 개발하였다(그림 5, 그림 6). 고온 초전도

선재를 액체질소 온도인 77K로 냉각함으로써 현재의 고온초전도 선재로서도 경제성이 있는 고온초전도 변압기 제작이 가능하다는 것을



그림 4. Waukesha에서 개발한 1MVA 고온 초전도변압기

확인하였다. 일본의 대학, 변압기 제작사, 고온초전도 도체 제작사 및 전력회사가 공동으로 참여해서 고온초전도 변압기를 개발했고 이와 같은 개발방식이 이후 일본뿐만 아니라 외국의 고온초전도 변압기 개발 모델이 되었다.

2000년에는 일본 Kyushu대학, Fuji, KEPCO 등 500kVA 고온초전도 변압기를 개발한 연구진이 두 번째로 22.9kV/6.9kV, 1 MVA 고온초전도 변압기를 개발하였다. 이 변압기는 Kyushu전력의 실제 선로에서 실부하 시험을 거쳤고 과전압시험, 돌입전류 시험 등을 통해서 고온초전도변압기의 안정성을 확인하였다. 또한 전력용 변압기와는 별도로, 철도차량용 초전도변압기에 대한 연구가 Railway Technical Research Institute 중심으로 진행 중이다. 현재 이에 대한 설계를 마친 상태이며, 4 MVA, 25 kV급 제작을 목표로 하고 있다.

유럽에서는 1997년, ABB, EDF, ASC가 공동으로 630kVA, 3상, 18.7kV/420V 급 변압기를 개발하여 스위스의 Geneva에 위치한 변전소에서 1년 동안 실부하 시험을 완료하였다. 그림 7에 나와 있는 이 변압기는 실부

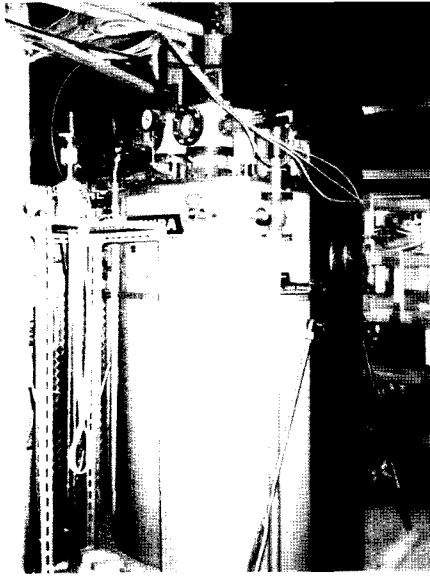


그림 5. 일본 Kyushu 대학, Fuji 전기, Smitimo社에서 개발한 500kVA급 단상 고온 초전도 변압기

고온초전도 변압기가 모두 전력용 변압기인 데에 비해서 이 변압기는 독일의 고속전철인 ICE에 탑재를 목표로 개발된 고속전철용 변압기이다. 현재는 1 MVA, 25 kV급 초전도변압기를 개발하여 시험 중이다. 다른 초전도변압기와 다른 점은 변압기 철심까지 모두 냉각하는 구조로 되어 있으며, 일반적으로 5 % 내외인 내부임피던스가 25 % 정도로 상당히 높다는 점이다.

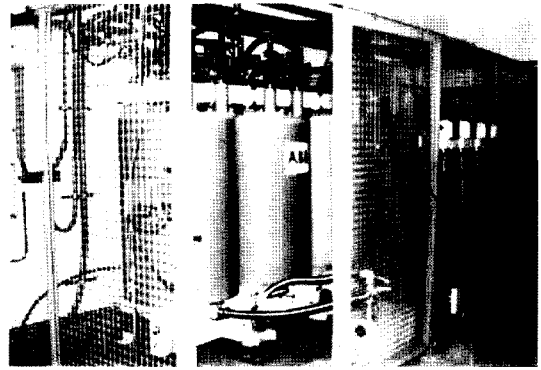


그림 7. 스위스 ABB 사의 630kVA 3상 고온 초전도변압기



그림 6. 일본 Kyushu대에서 개발한 1 MVA급 단상 고온초전도 변압기

하 시험을 완료한 최초의 변압기로서 시험기간 동안 신뢰성 있게 동작하였으며, 이를 통해서 고온초전도 변압기의 신뢰성과 안정성을 확인하였다. 이와는 별도로 독일의 Siemens 사는 100kVA, 5.5kV/1.1kV 급 초전도 변압기를 개발하였다. 이전에 개발된

국내에서는 1999년, 서울대학교, 순천향대학교 연구진이 참여하여 기초전력공학공동연구소가 3kVA, 220V/110V, 단상 고온초전도 변압기를 최초로 개발하였다. 이어서 2000년에는 10kVA, 440V/220V, 단상 초전도 변압기, 2001년에는 10kVA, 440V/220V, 3상 변압기를 개발하여 고온초전도 변압기 요소기술을 확보하였다(그림 8). 이를 바탕으로 현재는 21C 프론티어 사업의 일환으로 한국산업기술대학교, 효성중공업, CVE, 순천향대학교, 서울대학교 등이 공동으로 1 MVA, 22.9 kV/ 6.6 kV 고온초전도 변압기 개발을 진행 중이다.

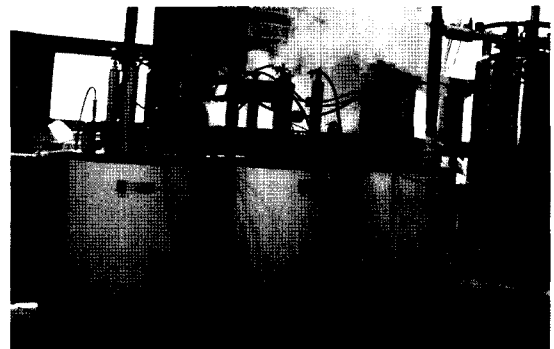


그림 8. 국내에서 개발된 고온초전도 변압기.

5. 결 론

지금까지 고온초전도 변압기의 특징과 개발 동향을 알아보았다. 앞에서 밝힌 바와 같이 일반 변압기와 비교하였을 때, 고온초전도 변압기는 단순히 크기가 줄어들거나 효율이 증가하는 것이 아니라 일반 변압기가 갖고 있는 용량과 수명의 한계를 극복할 수 있는 이점을 갖고 있다.

현재의 기술만으로는 아직 실용화에 많은 어려움이 따르지만 역으로 이러한 점은 그런 어려움이 극복되었을 때 훨씬 더 장점으로 활용될 수 있다. 냉각 손실과 같은 부분은 현재의 기술 수준만을 고려한 것이다. 만일 냉각 기술이 더 발전하여 냉각 손실이 줄어들었다면 고온초전도 변압기의 효율은 더 증가하고 가격은 더 싸게 될 것이다.

고온초전도 변압기에서 해결되어야 할 가장 중요한 과제는 역시 선재의 전류 밀도 향상이다. 그리고 선재의 가격도 현재로서는 상용화가 어려울 정도로 비싼 면이 있지만 일단 실용화에 성공하여 대량 생산이 가능하게 되면 이 점도 해결될 것으로 전망된다.

이와 같은 선재 개발의 어려움때문에 고온 초전도 변압기를 개발한 예는 그리 많지 않다. 그리고 국내에서는 87년부터 10년간 주로 고온 초전도 재료 개발에 연구가 집중되었고, 이 분야의 연구 수준은 외국과 거의 격차가 없는 상황이다. 아울러 고온초전도체를 전력기기에 응용하는 연구는 최근에 들어서야 시작되었으며, 많은 전문가들이 10 ~ 20년 내에 고온초전도체를 응용한 시장이 형성될 것으로 전망하고 있는 바, 지금이 산업체에서 고온초전도체 응용에 관심을 가져야 할 적기라고 생각한다.

참고문헌

- [1] Sam P. Mehta, Nicola Aversa and Michale S. Walker, "Transforming Transfomer," IEEE Spectrum pp 43 ~ 49, July 1997.
- [2] Kazuo Funaki, et. al. "Design and Construction of a 500 kVA-Class Oxide Superconducting Power Transformer Cooled by Liquid Nitrogen," Proceedings

of the 16th ICEC/ICMC, pp 1009~1012, May 1996.

- [3] B. W. McConnel, "Transformers - A Successful Application of High Temperature Superconductors," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp 716~720, March 2000.
- [4] S. W. Schwenterly, et. al., "Performance of a 1 MVA HTS Demonstration Transformer," IEEE Trans. Applied Superconductivity, June 1999.
- [5] Kazuo Funaki, et. al., "Development of a 22kV/6.9kV Single-Phase Model for a 3MVA HTS Power Transformer," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 3, pp 1578~1581, March 2001.
- [6] Hee Joon Lee, Gueesoo Cha, Ji-Kwang Lee, Kyeong Dal Choi, Kyung Woo Ryu and Song Yop Hahn, "Test and Characteristic Analysis of an HTS Power Transformer," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 3, pp 1486~1489, March 2001.
- [7] Hiroshi Hata, et. al., "Design of 4MVA Superconducting Transformer for rolling stock," 66th Meeting on Cryogenics and Superconductivity, Japan, May 2002.

저자이력



최경달(崔景達)

1962년 2월 12일생, 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 졸업(공학박사) 1993~1997년 기초전력공학공동연구소 근무, 1995~1996년 일본 사가대학교 객원연구원, 1998-2002년 한국산업기술대학교 조교수, 한국산업기술대학교 부교수(현재), 한국산업기술대학교 에너지대학원 부교수(현재)