

고온초전도 한류기의 기술 개발 및 현황

고태국, 이찬주, 이승제
연세대학교 전기·컴퓨터공학과

1. 서 론

현재의 전력 계통의 꾸준한 증가 추세에 있다. 예를 들면 발전 설비가 매년 약 300만kW씩 증가하고 있는데, 이러한 추세라면 계통의 단락 용량은 상당히 증가하게 될 것이다. 계통의 단락 용량 증가는 곧 전력 계통의 안정성을 떨어뜨려 심각한 전압 강하를 발생시키게 될 것이다. 이를 막기 위해서 대용량의 차단기를 추가로 설치해야 한다. 그 수는 약 매년 350여대가 되며, 용량도 정격의 수백 배에 달하는 대용량으로 대체되어야 한다. 이러한 문제점들은 전력 계통의 심각한 사고를 유발시킬 수 있으며, 차단기를 새로 설치함으로써 차단기 입지가 문제가 될 수 있으며, 절연유 또는 절연가스의 사용으로 인한 환경오염이 문제가 된다. 또한, 막대한 전력 설비비용이 필요할 것으로 예측된다. 이러한 단점들을 보완하며 안정적인 전력 계통의 용량 증가를 피하기 위해서는 고온초전도한류기의 설치가 불가피하다.

고온초전도한류기는 계통에서 사고가 발생할 경우 막대한 사고전류를 줄임으로써 고온초전도한류기의 계통에서의 설치 위치에 따라 발전단을 보호할 수 있으며, 변압기의 보호 및 용량 증대 효과, 기타 여러 가지 전력 기기들의 보호에 탁월한 성능을 발휘할 수 있는 점이 입증되어 다른 고온초전도 전력기기들에 비해 개발 속도가 상당히 빠른 고온초전도 응용 기기이다. 이러한 초전도한류기는 1973년 Falcone 등이 그 필요성을 처음으로 역설한 이래, 다른 전력기기로서 대체할 수 없는 초전도 고유의 기기라는 점과 구조가 간단하고 동작시간이 짧을 뿐만 아니라 수명이 반영구적이라는 점 등 다른 전력기기들과 구별되는 초전도한류기만이 갖는 특성 때문에 세계적으로 활발하게 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 고온초전도한류기의 현재 기술 개발 현황 및 미래에 관하여 이야기 하고자 한다.

2. 국내외 개발 현황

2.1. 국외

고온초전도한류기는 고온초전도체를 응용한 기기 중 상용화가 가장 빠른 기기 중의 하나라고 판단되어 세계 각국에서 경쟁적으로 개발하여 기술을 선점하기 위해 노력하고 있다. 1997년 스위스의 ABB사에서는 약 10.5kV급의 자기 차폐형의 고온초전도한류기를 개발하여 이를 자체 보유중인 수력발전소와 연계하여 그 성능을 테스트하고 있는 실정이다. 자기 차폐형의 고온초전도한류기는 현재 ABB사의 기술이 세계 최고로 인정받고 있으며, 다른 여러 나라에서 개발중인 자기 차폐형의 가장 기본적인 모델이 되고 있다. 이 모델을 개발하기 위해 고온초전도재료분야에서의 발전도 이룩할 수 있었다. 자기 차폐형의 고온초전도한류기는 초전도 tube를 사용하여 그 효과가 극대화될 수 있다는 점을 파악하여 BSCCO 2212 tube를 만들게 되었으며[1], 이 tube를 이용하여 세계 각국에서 연구 중에 있다. 미국에서는 현재 DoE의 전폭적인 지지로 그들 고유의 모델을 개발하였는데, 그 것이 바로 modified bridge DC reactor type 고온초전도한류기이다. 이 모델은 약 15kV급으로 1998년에 제작되어 현재 field test가 성공적으로 끝난 상태이다. 이 모델의 특징은 다른 고온초전도한류기가 초전도체의 퀀치를 이용하여 전류를 제한하는 반면 이 모델은 초전도체가 퀀치 나지 않는다는 점이다. 이 것은 초전도체가 보다 안정적으로 동작할 수 있는 기반을 마련하여 반영구적으로 사용이 가능하다는 장점이 있다. 독일의 Siemens에서는 저항형 고온초전도한류기의 개발에 성공단계에 있으며, 곧 배전반에서 field test를 할 예정이다. 저항형 고온초전도한류기는 그 크기가 작아 compact하며, 전류 제한 효과가 크다는 장점이 있지만, 큰 용량으로의 upgrade가 힘든 단점이

있다. 영국 및 유럽의 여러 나라가 함께 제작한 한류기가 근래에 등장하였는데, 이는 저항형 고온초전도한류기의 또 다른 형태이다. Siemens의 저항형 고온초전도한류기는 박막을 이용하지만, 이것은 초전도tube를 이용한다. 초전도 tube에 전류 path를 만들어 주는데, bifilar 형태의 전류 path를 만들어 주어 정상 상태에서는 임피던스의 발생이 없다가 사고가 발생하면 저항 형태로의 임피던스만 나타나게 된다. 현재 이 모델은 개발된지 얼마 안되기 때문에 용량은 그리 크지 않지만 저항형의 또 다른 형태로서의 가치가 충분히 있다.[4]-[6]



그림 1. 스위스 ABB社에서 개발한 대표적인 자기차폐형 고온초전도한류기 (10.5kV급)

고온초전도한류기를 개발하여 250V까지 실험에 성공하였으며[3], saturable reactor type, modified bridge DC reactor type 고온초전도한류기의 실험에 성공하였다. 그 중 modified bridge DC reactor type 고온초전도한류기는 사고 전류 제한이 뛰어난 성능을 가지고 있는 것으로 판명되고 있으며, 현재 250V까지의 실험에 성공하였다. 한편으로 한국전력연구원에서는 저항형의 고온초전도한류기의 기초 연구 및 실험을 통해 용량 증대를 꾀하고 있다.

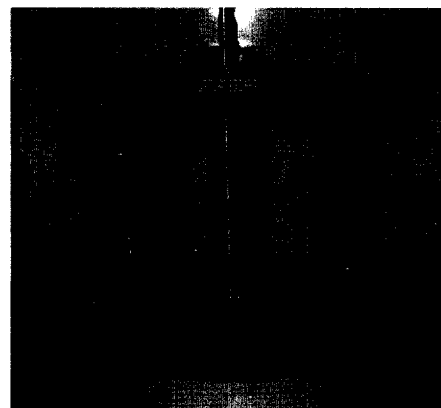


그림 2. 연세대학교에서 자체 제작한 440V급 고온초전도한류기

2.2. 국내

현재 국내에서의 고온초전도한류기 개발은 1993년 연세대학교에서 처음 시작한 이래 여러 가지 형태의 고온초전도한류기에 관한 연구가 진행 중에 있다. 기기 제작 및 실험과 초전도 재료 분야로 연구 분야를 나누어 각 연구소 및 대학에서 고온초전도한류기의 요소 개발 및 시스템 개발에 박차를 가하고 있다. 1995년 연세대학교에서 최초로 수십 V급의 고온초전도한류기를 직접 제작하여 실험한 이래 현재 440V급의 고온초전도한류기가 개발된 상태이다. 초기에는 자기 차폐형의 고온초전도한류기를 주로 연구하였으며, 1997년에는 그 모델을 개량하여 세계 최초로 air gap이 도입된 고온초전도한류기를 개발하여 실험에 성공하였다. 그리고, 현재는 다양한 모델로 고온초전도한류기 분야에 접근하고 있다. 자기 차폐형 고온초전도한류기를 개량한 Rod-type

Country	Organization	Device Type	Specification
Canada	Hydro Québec	Shielded Core	175 A/600 V (100 kVA)
Germany	Siemens AG	Resistive	100-200 A/1V (100 kVA)
Israel	Ben Gurion U.	Shielded Core	660 A/15 kV (10 MVA)
Italy	CISE S.p.A.	Shielded Core	25 A/160 V (4 kVA)
Japan	CRIEPI	Shielded Core	400 A/6 kV (2.4 MW)
Switzerland	ABB Corporate Research	Shielded Core	10.5 kV (1.2 MVA)
United Kingdom	EA Technology	Resistive	400 A/11 kV (4.4 MVA)
United Kingdom	GEC Alstom	Shielded Core	several kVA
United Kingdom	IRC	Resistive	3~5 kVA
United States	Lockheed Martin	Electronic (inductive)	1.2 kA/15 kV (18 MVA)

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집

3. 국내외 개발 정책

일본의 경우 Tokyo Electric Power Company (TEPCO)가 주도적으로 고온초전도한류기를 개발하고 있다. 1990년이후부터는 Mitsubishi Electric Company (MELCO)가 합류하여 MITI/NEDO FCL 프로젝트라는 이름으로 고온초전도한류기의 연구를 진행하고 있다. 또한, TEPCO와 Toshiba가 함께 500kV급의 고온초전도한류기를 개발을 목적으로 우선 배전급의 6.6kV급의 한류기를 제작하고 있다. 이 프로젝트를 위해서 매년 약 1백만 달러의 예산이 집행될 것으로 예측된다.[7] 미국의 경우 DOE (Department of Energy)에서 지원하는 SPI 프로젝트의 일환으로 고온초전도한류기를 개발하고 있으며, 1993년부터 1999년까지 1단계의 연구가 끝난 상태이다. 그 결과로 15kV급의 modified bridge DC 선재용 고온초전도한류기를 개발하여 실험에 성공하였다. General Atomics가 팀 리더이며, Intermagnetics General이 선재 개발 및 제작에 참여하였고, Los Alamos National Laboratory가 지원 연구 (supporting research)를 수행하였고, 마지막으로 Southern California Edison이 end user로써 참여하였다. 총 연구비로 1천3백만 달러의 예산이 집행되었으며, 정부의 지원금으로 7백만 달러, 기업의 참여금이 6백만 달러로 구성되어있다.[8] 국내의 경우 과학기술부 주관으로 고온초전도 기술 개발 사업의 일환으로 연세대학교와 한국전력연구원이 공동으로 개발하고 있으며, 현재는 2단계의 개발이 진행중에 있다. 또한, 1999년 4월부터 한국전력연구원에서 역시 연세대학교와 함께 공동으로 고온초전도한류기 연구를 병행하고 있다.

4. 고온초전도한류기의 기술 파급 효과

4.1. 기술적 측면

1986년에 독일의 과학자 Bendnoz와 Müller에 의해 발견되어 세계적인 관심을 불러일으킨 산화물 고온 초전도체는 이 물질이 실용화되었을 때 예상되는 엄청난 파급효과와 기술적인 중요성으로 인하여 전 세계적으로 국가 차원에서의 연구지원이 이루어지

고 있으며 각국의 연구 그룹은 경쟁적으로 연구를 수행하고 있다. 고온 초전도체는 액체 질소를 이용한다는 점에서 응용에 대한 가능성을 풍부하게 내포하고 있다. 질소는 공기 속에 풍부하게 있으며 냉동이나 액화도 용이하고 경제적이다. 헬륨을 필요로 하는 극저온이라는 단점이 없어져 지금까지 응용이 국한되었던 초전도 응용 기기가 광범위하게 응용될 것이다.

전력계통의 증가로 과전류에 대한 대처가 심각한 문제로 대두되고 있는데, 시스템에 사고가 발생하면 높은 과전류에 의한 심한 열적, 기계적 스트레스가 수반되어 시스템에 심한 손상을 가져올 수 있게 된다. 이러한 이유로 사고전류를 낮추어 시스템을 보호하는 장비의 개발이 꼭 필요하게 되었다. 기존의 사고전류에 대처하는 방식으로 차단기를 설치하는 방법이 있는데, 높은 사고전류가 2-3 주기동안 그대로 회로에 인가되어 시스템의 보호가 불안정한 실정이며, 계통 용량의 증가시 계통의 변경이 따른다는 단점이 있는 반면 고온초전도한류기의 설치로 그러한 단점을 극복하여 훨씬 안전하게 시스템을 보호할 수 있으며 계통의 변경 없이도 용량을 증가시킬 수 있다. 또한, 고온초전도기기 중 고온초전도한류기의 상용화 및 실용화가 제일 빠를 것으로 예측되어 다른 고온초전도 응용기기에도 상당한 파급효과를 미칠 것으로 기대되고 있다.

4.2. 경제·사회적 측면

고온초전도체는 그 냉매로서 액체질소를 이용한다는 점에서 응용에 대한 가능성을 풍부하게 내포하고 있다. 액체헬륨을 냉매로 한 저온초전도체의 제한된 응용의 범위가 한층 더 광범위해짐에 따라 더욱 그 연구에 박차를 가할 수 있을 것으로 전망된다. 현재 스위스의 ABB社에서 1000kVA급 고온초전도한류기를 스위스의 수력발전기와 변압기 사이에 설치하여 상용화 실증실험을 하고 있다. 이 고온초전도한류기는 초전도한류기는 초전도장치의 상업화로는 세계 최초로, 앞으로 본격적인 상용화 및 실용화를 향한 박차가 가해질 것으로 기대된다.

또한, 전력 설비비의 감소로 인한 엄청난 경제적 이득을 얻을 수 있다. 차단기의 용량 증가에 따른 비용의 증가는 용량의 제공에

비례하기 때문에, 계통 용량 증가시 용량이 큰 차단기의 설치에 따른 비용은 상당하다고 볼 수 있다. 송전단의 변압기에 1기의 차단기를 설치할 경우 현재 약 \$600,000이 소요된다. 고온초전도한류기를 변압기와 차단기 사이에 설치함으로써 기존의 차단기를 계속 사용할 경우 송전선 1mile에 대한 설치 비용은 약 \$370,000이 될것으로 예상된다. 이를 바탕으로 계산해보면 20년간 약 \$3억의 경비절감효과를 얻을 수 있다.

현재 고온초전도한류기의 시장은 형성되어 있지는 않지만, 세계적인 전력계통 증가의 추세로 볼 때 상당한 시장이 형성될 것으로 예측되고 있다. 그림 6에서 보이는 것처럼 ISIS-5의 시장예측에 따르면 2010년의 고온초전도한류기 시장은 총 \$53,000,000에 이를

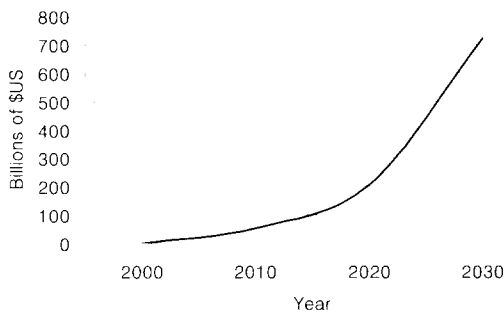


그림 3. 고온초전도한류기 세계 시장 예측

것이며, 2020년에는 현재 상용화되고 있는 초전도MRI의 시장규모인 약\$100,000,000보다 많은 약\$200,000,000이 될 것으로 예측된다. 국내 시장을 살펴보면, 고온초전도한류기 시장은 변전소가 신설될 때마다 약 20기의 고온초전도한류기가 필요하며, 기존의 변전소의 10%에 고온초전도한류기를 설치할 경우 매년 60여대의 고온초전도한류기가 필요하다. 이를 바탕으로 추정해보면 향후 20년간 약 3200억원의 고온초전도한류기 시장이 형성될 것으로 예측되며, 2010년 이후에는 연간 600억원의 수출이 가능해진다.

초전도 현상은 그 응용성의 비중으로 인해 미국, 일본 및 유럽의 선진외국 등에서 일찍부터 연구에 박차를 가하여 자기공명장치, 초전도 발전기, 자기부상열차, 에너지 저장장치 등을 이미 실용화 시켰거나 차후의 실용화를 위한 연구에 전력을 다하고 있다. 또

한 전력기기 응용분야로는 초전도변압기와 초전도 전류제한기가 활발히 연구되고 있다. 이와 같이 의료분야, 교통분야, 전력전기분야 등 일상생활에 활용될 수 있는 상품이 이미 개발되었거나 거의 상품화 단계에 와있는 추세이다. 그에 반해 국내에서는 1980년대부터 초전도에 대한 중요성이 인식되기 시작하여 현재까지 국내의 연구소와 학교에서 기초연구 및 기초응용단계의 연구가 이루어지고 있다. 특히, 고온초전도 응용분야는 선진국에서 1990년대 초부터 개발 연구되었다고 볼 때, 그 기술의 격차는 쉽게 극복할 수 있는 것이므로, 더욱 매력적 기술이라고 할 수 있다. 특히, 고온초전도한류기는 기존의 차단기에 비해 환경 친화적인 기기이므로 앞으로는 기존의 차단기의 업그레이드보다 훨씬 더 유리한 고지에 있다. 기존의 차단기에는 절연gas인 SF⁶가 상당량 들어가게 된다. SF⁶의 단점은 환경에 취약하다는 것인데, 현재 심각하게 대두되고 있는 환경 문제중 하나인 온실효과의 주범이기도 하다.

표 2. 시장 예측

예 측	
국 내	<ul style="list-style-type: none"> · 향후 20년간 3200억 시장 형성 전망 · 2010년 이후 · 신설 변전소에 설치시 20여대/년의 수요 발생 · 기존 변전소의 10%에 설치시 60대/년의 수요 발생
국 외	<ul style="list-style-type: none"> · 2010년 세계 시장규모: 53억 달러 · 초전도 전력기기 시장의 47%를 차지 (CONNECT 최신 시장보고) · 고온초전도 기기 중 가장 먼저 상용화 · 2020년 MRI시장 규모(100억 달러)를 앞지름

5. 결 론

고온초전도한류기는 고온초전도 응용 기기 중 가장 빠르게 상용화될 전망이다. 상용화 될 경우 다른 초전도 전력 기기의 상용화에도 적지 않은 영향을 끼칠 것으로 기대된다.

고온초전도한류기의 장점은 아래 몇가지로 요약할 수 있다.

(1) 사고로부터 전력 기기를 효과적으로 보호한다.

(2) 계통 용량 증가가 필요한 경우에도 기존의 차단기를 그대로 사용할 수 있다.

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집

- (3) 환경친화적이므로 21C의 신기술로서도 각광받을 것이다.
- (4) 계통 용량 증가시 능동적으로 대처 가능하다.
- (5) 안정적인 전력 기반을 유지할 수 있다.

감사의 글

본 과제는 과학기술부 및 한국전력연구원의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] S. Zannella, and L. Jansak, "Inductive high Tc-superconducting fault current limiter based on Bi-2212 tube", Cryogenics , V.37 N.10 , 1997, pp. 667 -670
- [2] 한국전력공사, "전력통계", <http://www.kepco.co.kr>
- [3] 이찬주, 이승제, 장미혜, 현옥배, 최효상, 고태국, "단순화된 자기차폐형 고온 초전도한류기의 단락특성해석", 한국 초전도·저온 공학회 제 1회 학술대회논문집, pp.97-100, 1999.2
- [4] Yamaguchi M, Fukui S, Satoh T, Kaburaki Y, Horikawa and T, Honjo T, "Performance of DC reactor type fault current limiter using high temperature superconducting coil", IEEE Transactions on Applied Superconductivity , V.9 N.2 P.1 , 1996, pp. 940-943
- [5] S. Zannella, L. Jansak and P. Donadio, "Inductive high Tc-superconducting fault current limiter based on Bi-2212 tube", Cryogenics , V.37 N.10 , 1997, pp. 940-942
- [6] J. x. Jin, S. X. Dou, H. K. Liu, C. Grantham, Z. J. Zeng, Z. Y. Liu, T. R. Blackburn, X. Y. Li, H. L. Liu AND J. Y. Liu, "Electrical Application Of High Tc Superconducting Saturable Magnetic Core

- Fault Current Limiter", IEEE Transactions on Applied Superconductivity , V.7 No.2, 1997, pp.1-3
- [7] Loyola University, "chat.4 Fault Current Limiter" ,[http:// itri.loyola.edu/scpa/04_03.htm](http://itri.loyola.edu/scpa/04_03.htm)
- [8]Doe(U.S.A.),"superconducting partnership initiative", <http://www.eren.doe.gov/superconductivity/pdfs/spi.pdf>

저자소개



고태국
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1983년 case western university EEPA과 졸업(석사), case western university EEPA과 졸업(박사), 현재 연세대학교 전기·컴퓨터 공학과 교수



이찬주
1972년 2월 20일생, 1995년 연세대 공대 전기공학과 졸업(학사), 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기·컴퓨터공학과 박사과정



이승제
1974년 5월 30일생, 1997년 연세대 공대 전기공학과 졸업(학사), 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기·컴퓨터공학과 박사과정