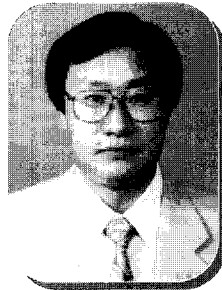


초전도 전력기기와 도체 개발



• 현옥매 •
 한전 전력연구원
 책임연구원

1. 서론

전력시스템의 효율 향상은 전력기기의 성능 향상과 더불어 응용기술의 발전에 기인한다. 구리를 도체로 하는 현재의 전력기기는 그 개발이 거의 완성단계에 있어 개선의 여지가 별로 없는 것으로 알려지고 있다. 한편, 컴퓨터, 통신 등의 발달에 맞추어 전력 시스템 응용기술은 크게 향상되고 있다. 국내 대학, 연구소, 기업의 연구개발 노력도 주로 응용기술의 개발에 집중되어 있다.

이렇게 응용기술 개발과 병행하여 다른 중요한 부분인 전력기기에 있어 새로운 패러다임을 제시하는 것이 초전도 기술이다. 구리 등의 상전도 도체와는 달리 초전도체는 일정 상태에서 저항이 0 (zero)이다. 이 결과 구리보다 수십배나 큰 고전류밀도 통전이 저항제로 (혹은 거의 제로)로 가능하다. 이에 따라 에너지를 절약하고 전력기기를 소형화할 수 있게 되었다. 더하여, 저온 운용 및 저임피던스로 전력시스템의 안정 및 신뢰성을 크게 향상시킨다. 그리고 고자장 코일(자석)이 만들어져 MRI 등에서 상용화되어 있으며, 자기분리 등 대규모 산업응용이 기대되고 있다. 또한 완전반자성에 의한 자기부상은 플라이휠 에너지저장장치(SFES), 자기부상 열차 등을 통하여 우리주변에 다가서고 있다.

초전도 기기란 초전도체를 사용해서 제작 및 운용되는 기기를

말한다. 이를 전력분야에 응용한 것이 초전도 전력기기이고, 그 외 초전도 자석의 응용 등 다양한 응용분야가 있다. 초전도 전기기기의 특징으로는 흔히 (1) 저항제로 (혹은 낮은 교류손실)에 따르는 효율향상이 있다. 강자장 자석의 경우처럼 직류전류의 경우 저항이 0 (zero)이므로 손실이 없다. 저항 zero에 의해 영구전류가 가능하여 강자장 초전도 전자석은 흔히 영구자석처럼 운용되고 있다. 교류전류에 대해서는 교류손실이 있음에도 상전도 기기의 손실에 비해 아주 작아서 전력 손실이 크게 줄어든다. (2) 초전도 물질은 또한 대전류 수송에 적합하므로 기기의 소형화 및 용량증대를 도모한다. 이로 인해 도심지 및 지중공간 확보가 용이하고, 신 규전력설비와 신규 토목공사를 절약케 한다. (3) 아울러, 임피던스 저하에 따르는 전력계통 안정 및 운용상의 유연성 등이 초전도 기기의 장점이다.

이러한 장점으로 인해 초전도 응용은 초전도 발견 이래 꾸준히 시도되어왔다. 그러나, 헬륨 냉각이라는 높은 냉각경비의 문제로 상전도 기기가 불가능한 영역 정도에서 응용이 이루어졌다. 현존하는 발전기, 변압기 등의 상전도 전력기기의 효율향상이 한계에 다다랐다는 점을 고려하면, 초전도 전력기기는 현재의 상전도 기기의 기술적 한계를 극복하는 새로운 기술임에 틀림없다. 여기에 액체 질소를 냉매로 쓰는 고온초전도 기기가 개발되면 미래의 전

력 기술에 새로운 패러다임을 가져다줄 것이다. 액체 질소는 냉각 능력 대비 경비면에서 액체헬륨에 비해 1/600 정도이므로 냉각 경비를 크게 줄여 초전도 기기의 응용 영역을 넓혀줄 것이다.

이러한 장점에도 초전도 전력기술은 산업계에 그리 큰 영향이 되지 못하고 있다. 이는 동 기술의 근간을 이루는 도체, 즉 초전도체의 재료공정 개발에서 진보가 더디고 있기 때문이다. 이 글에서는 전력기술에서 초전도체의 문제를 다루되, 가장 초기에 응용될 것으로 여겨지는 초전도 케이블 및 한류기의 경우를 들어 도체개발의 문제, 특히 cost에서의 문제를 논할 것이다.

2. 전력기기 혁신과 도체 응용 전망

전력 기기의 변혁을 도체의 혁신과 새로운 디자인에서 찾다면 초전도 전력기술의 혁신은 새로운 도체, 초전도체라는 재료가 가져온 것이다. 현재 응용되는 기기가 주로 구리(銅)을 소재로 하여 제작되었다. 구리를 도체로 하는 전력기기 기술, 즉 상전도 기기는 그 효율 향상이 거의 한계에 도달하고 있다. 앞서 언급한 전력기술의 발달이 주로 운용기술에 치우쳐 있다는 것도 구리라는 도체의 한계를 극복하지 못하는 현실을 반영하고 있다.

현재 세계적인 초전도 전력기술은 전력기기의 개발에 대한 기술적 검토 단계를 넘어서 있다. 1996년부터 ABB의 유도형(자기 차폐형) 고온초전도 한류기가 발전소내 전원 보호용으로 현장 시험을 거쳤고, 1997년에는 ABB의 630 kVA급 고온초전도 변압기가 연구소 전원 공급용으로 현장시험을, 1999년에는 Super-GM의 70 MVA 발전기가 관서전력에서 운용시험을 거쳤다. 더하여, GA는 1999년 15 kV급 고온초전도 한류기(서지 보호기)를 Southern California Edison사의 계통에 연결하여 계통시험을, 2001년부터는 NKT가 발전소내 모선연계용으로 고온초전도 케이블을 설치 운용 중에 있다. 위의 현장시험에 사용된 전력기기들은 실용화 규모는 아니지만, 시험을 거침으로써 동 전력기기의 효용을 증명하였으므로 남은 과제는 scale-up 단계일 것으로 보인다.

이러한 단계에서 선진국은 scale-up 이전에 동 전력기기의 실용화 시 경제성 손익을 검토하고 있다. 초전도 전력기기는 일부를 제외하고는 대개 새로운 시장을 창조하고 있지는 않다. 대신, 기존 전력기기를 교체하는 것이 1차 목표가 되고 있다. 이럴 경우 교체는 (가) 교체시기에 맞추어져야 하며, (나) 기존 기기보다 월등한 성능향상 혹은 가격 인하를 전제로 한다. (가)의 경우는 시간을 조절하면 되지만, (나)의 경우 상전도 기기가 효율이 극대화되어 있어 초전도 기기의 성능향상이 비용상승을 무시할 만큼 크지도 않은 것이 사실이다. 따라서 교체는 초전도 전력기기의 설치 및 운용가격의 적절한 수준으로의 인하를 전제로 가능하다. 일본은 Super-GM의 200 MVA 발전기 개발을 연기하고 cost down (more compact and more efficient)을 주제로 연구하고 있다. 비슷한 이유로 상기 초전도기기의 현장 시험을 거친 제작사들도 실용화 규모의 기기 제작을 연기하고 cost down 등을 연구하고 있다.

이러한 cost down에는 여러 가지 분야가 있다. (1) 초전도 도체가 격 인하, (2) 최적 디자인 및 integration, (3) 운용상의 최적화를 통한 경비절감 등이 있다. 이렇게 초전도 및 기존 기술분야의 모든 엔지니어링 과정에서 가격 인하가 이루어져야 함은 물론이다. 그 중 (2)와 (3)은 기존 주변 기술의 조합이다. 그 중요성은 두말할 필요 없으나, 초전도 기기 개발에 있어 첫번째 해결해야 할 문제는 이미 증명된 주변기술(design, integration 및 operation에서)에 대한 최적화보다는 초전도 도체 그 자체에서 cost down을 원칙적으로 증명하는 것이다. 이러한 점에서 현재 단계에서의 cost down을 위한 접근은 도체(conductor), 특히 고온초전도 선재(wire) 가격의 인하이다.

1999년 현재 가장 상업성이 있는 고온초전도 선재는 Ag 피복 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi2223/Ag)로서 가격이 300 $\$/(\text{kA} \cdot \text{m})$ (77 K 운용)이다. (참고로 저온초전도 선재인 NbTi/Cu는 10 $\$/(\text{kA} \cdot \text{m})$ (4 K 운용) 이하이다.) ($\$/(\text{kA} \cdot \text{m}) = 1 \text{ kA}$ 의 전류를 1 m 수송하는 선재가격을 $\$$ 로 표시한 것.) ASC는 가격을 2004년경 50 $\$/(\text{kA} \cdot \text{m})$ 로 낮출 것을 목표로 하고 있기는 하다. 그리고 낙관적인 견해로는 상기 선재의 가격을 현재의 1/10 수준인 30 $\$/(\text{kA} \cdot \text{m})$ 로 낮출 수 있을 것으로 기대하고 있기도 하다 (표 1 참조). 그러나 이 가격으로는 주변기술이 적절하게 협조하더라도 설치비가 너무 높아 운용에 큰 장애가 된다. 예를 들어, 소규모 전력케이블을 보더라도, 정상전류 2 kA이면 안전을 고려해서 2배의 마진, 교류로 인한 1.4배의 소요로 적어도 임계전류 5 kA의 선재가 필요하다. 그러므로 3상 케이블 코어 1 km를 제작하는데 필요한 선재 경비는 현재의 가격으로 4.5 MS (= 약 54억원)이다. 더하여, 초전도 케이블은 관로의 문제로 77 K 보다는 80~83 K에서 운용되므로 임계전류밀도 값이 한층 낮아져 상기 경비는 더욱 높아진다. 이러한 선재 가격으로는 초전도 기술의 장점을 살릴 수 없다. 선재값이 1/10으로 낮아지도록 기술개발이 반드시 진행되어야 함은 물론이나, 그렇더라도 반드시 낙관적이지만은 않다. 일반적으로 케이블 제작시 선재 경비를 제작비의 1/10 정도로 보고 있는 현실이 앞에 있는 것이다. 기술개발은 임계전류밀도값 상승만을 의미하지 않는다. 교류손실 또한 저감되어야 한다. 특히 ASC 등이 자랑하는 선재들은 kA-m당 가격에서 왕왕 교류손실 문제는 고려되지 않았다. 따라서 0.1 W/m 정도의 교류손실을 갖는 선재가격을 상기 기준에 맞추어야 함이 경제성을 맞추는 조건이 된다.

표 1. 고온초전도 BSCCO/Ag tape 선재의 연도별 가격 추이

년도/회사	ASC	IGC	Sumitomo	NST	판매가격 ($\$/\text{kA} \cdot \text{m}$)
1994	24A	20A	21A		
1997	34A	42A	45A	28A	1,000
2000	100A	60A	97A	50A	300
2004	150A 이상				50 (ASC 목표)

벌크 초전도의 경우도 상황은 크게 다르지 않다. 가장 조기에 응용될 것으로 여겨지는 고온초전도 한류기를 보면 주로 저항스 위치를 적용하고 있다. 저항스 위치는 초전도-상전도 상전이 가 고속으로 이루어짐을 이용하는 것으로 벌크 초전도체의 좋은 응용 분야이다. 진행중인 대표적 개발로는 ABB의 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$,

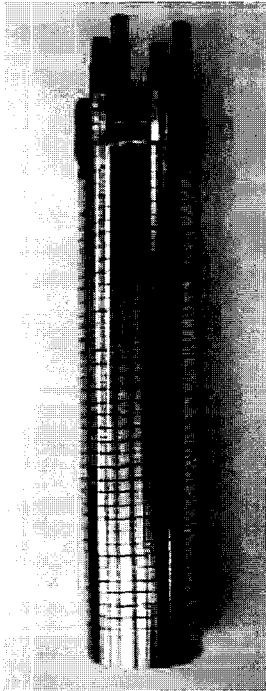


그림 1. Nexans의 bifilar 코일. 두께 0.4cm×외경 5cm길이×30cm인 MCP Bi2212 튜브 사용. 겉에 Cu/Ni 셸트 부착

(Bi2212) 평판 (혹은 후막)과 Nexans Superconductor의 MCP Bi2212 tube가 있다. 이 중 Nexans의 경우를 보면, 이 tube는 melt cast process (MCP)로 제작된 Bi2212 튜브로서 외경 50 mm, 두께 4 mm, 길이 300 mm이다. 이를 bifilar 코일로 가공하고, 외부에 Cu/Ni 합금으로 셸트저항을 입혀 소자를 제작하고 있다. 현재 250 KVA급을 제작하였거니와, 1 MVA급으로 격상시키기 위해 연구를 계속하고 있다. 표 2는 Nexans의 계획을 보여주고 있다. 개발된 소자는 임계전류 향상 등 기술개발을 전제로 하여 1개당 600€의 가격을 제시하고 있다. 이러한 가격으로도 실용화 단계인 170 kV/5 kA급 3상 한류기(77 K 운용) 1대 제작에 소요되는 도체 경비가 12억원에 이르고 있고, 현장 도입에 큰 장애가 되고 있다. 운용온도를 67 K로 하면 임계전류밀도가 2배로 높아져 가격이 1/2로 감소하기에 현재 개발되는 기기에 적용되고 있으나, 추가 냉각 및 신뢰성 확보 등에 투자가 필요하다.

3. 결론

이상으로 초전도 전력기기가 그 막대한 장점에도 도체개발의 미흡으로 응용단계에 이르지 못하고 있다. 현재의 초전도 도체 가격으로는, 가까운 장래에 이루어질 기술개발을 포함하여, 제작비가 너무 높아 현실적이지 않다. 고온초전도체가 발견되지 10수년이 지났고, 그 동안 막대한 노력이 도체 개발에 집중되었음에도 아직 만족스러운 단계에 있지 않다. 이는 세라믹 재료라는 면 이외에도, 이방성이 대단히 크고, 다원자 화합물이라는 점 등이 어려움을 더하여 개발을 더디게 하고 있다.

이에 대한 대처로 두 가지가 시도되고 있다. 하나는 현재 상용화되어 있는 Bi2223/Ag 선재의 임계전류밀도를 높이는 것이다. (선재 가격은 임계전류밀도에 반비례한다). 단축 선재에서는 10배 이상의 고전류밀도 선재가 보고되고 있으나, 수백m 이상의 길

표 2. Nexans의 bifilar coil 사용시 예상 제원 및 가격

항목	제시된 사양	현재의 기술	비고
Material	MCP Bi2212 tube or plate		
특성	Jc @ 65K	10 kA/cm ²	3.5 kA/cm ²
	Ic @ 65K	2.5kA/coil	
	Jc 균일도	±2%	±5~7%
단위소자 특성	길이	600cm	540cm
	내전압	1Vrms/cm	0.7Vrms/cm
	power	1,060kVA	250kVA
	발생 저항	0.36Ω/kV	변동 가능
	교류손실	1.5W/kA-m	6W/kA-m
	가격 제시	600€	
154kV급 3상 한류기	1상 소요량	560ea	170kV/5kA급
	도체가격 3상	560ea/상×3상×600€/ea=1M€=12억원	1,200원/ 기준
	주변장치	1억원	추정치
	총 제작가격	13억원	

이에서는 안정되게 생산되고 있지 않다. 다른 하나의 시도는 coated conductor로서 Ni 혹은 유사한 금속 테입 위에 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO)를 입힌 선재이다. 현재 길이 1m까지는 MA/cm^2 의 고전류 밀도가 얻어지나, 길이가 길면서 특성이 좋은 선재가 제작되고 있지 않다. 미국 DOE는 얇은 Ni 테입 양면에 YBCO를 두께 5 μm 로 입히되, 임계전류밀도를 $1 MA/cm^2$ 로 하여 선재 1본당 최대 1,000 A (온도 77 K) 수송을 목표로 하여 coated conductor 개발을 지원하고 있다. 이 정도면 (장산화될 경우) 제조과정상의 비용을 고려하고서도 NbTi/Cu (온도 4 K) 선재보다 경제적인 수 있어 응용에 혁신을 가져올 것이다. 더하여 벌크 초전도체에서도 새로운 제작공정이 개발되어야 한다. Bi2223/Ag 선재의 임계전류밀도를 높이는 것이든, 장산화된 coated conductor이든, 아니면 다른 새로운 선재이든, 고온초전도 응용과 관련 세계는 고온초전도 도체 부문에서 또 한번의 breakthrough를 기대하고 있다.

참고 문헌

- [1] J. G. Daley, "HTS Power Technologies : Nanometers and Megawatts", presented at 6th M₂S-HTSC, February 20-25.
 [2] Frank Bruer (Nexans Superconductor GmbH, private communication).

저자 약력

성명 : 현 옥 배

❖ 학 력

- 1976년 연세대학교 졸업, 이학사
- 1987년 Iowa State University 졸업, Ph.D

❖ 경 력

- 1987년 8월 - 1990년 9월
Ames Laboratory, Postdoctoral Fellow
- 1990년 10월 - 1991년 6월
Ames Laboratory, Research Associate
- 1991년 7월 - 1992년 9월
NIST, Visiting Scientist
- 1992년 9월 - 1995년 3월
ISTEC, ISTEC Fellow
- 1997년 1월 - 현재
한전 전력연구원 책임연구원

