

고온 초전도 선재의 전력계통 적용 사례 분석 연구

고윤석*

A Study on the Application Cases of High Temperature Superconductivity to Electrical Power System

Yun-Seok Ko*

요 약

초전도 현상은 절대온도 부근에서 전기적 저항이 사라지고 자기부양 효과를 보이는 등의 장점 때문에 다양한 분야에서 적용이 시도되고 있지만 초전도 임계온도를 실현하기 위한 어려움 때문에 실용화에 많은 어려움을 겪어 왔다. 하지만 최근 30°K 이상에서 초전도 현상을 보이는 고온 초전도체가 발견됨으로서 다양한 분야에 대한 적용연구가 시도되고 있다. 따라서 본 논문에서는 최근 각광받고 있는 고온 초전도체의 전력계통 적용 사례들은 조사, 분석하여 그 가능성과 문제점들을 살펴보고자 한다.

ABSTRACT

Because of the advantages such as the zero electrical resistance effect that disappears in the vicinity of the absolute temperature and the magnetic levitation effect, the superconducting applications are being tried in a variety of fields. But, those have faced many difficulties in the practical use because of the difficulty for the realization of the superconducting critical temperature. Recently, however, because the high-temperature superconductors was discovered newly which show superconductivity more than 30°K, the application researches based on it are being tried in various fields. Therefore, this paper examines the possibilities and issues by surveying the high temperature superconducting applications to electrical power system.

키워드

Superconductivity, Superconducting Cable, SFCL, Superconducting Transformer, Superconducting Motor
초전도, 초전도 케이블, 초전도 환류기, 초전도 변압기, 초전도 모터

1. 서론

초전도 현상은 1911년 네덜란드의 물리학자 오네스가 액체 헬륨으로 냉각된 물질들의 전기저항을 측정하던 도중, 금속의 온도가 절대온도 0K(-273℃) 부근에 도달 했을 때, 전기저항이 0이 되는 현상을 발견함으로써 세상에 알려졌다(<http://ko.wikipedia.org>). 이후, 초전도체의 마이스너 효과, 조셉슨 효과 등이 확인되었으며, 1957년에는 양자역학적인 원리를 기반으

로 하는 BCS 이론에 의해서 초전도 현상이 설명될 수 있었다[1]. 하지만, 이 이론에 근거하여 30K이상에서 초전도 현상을 보이는 것은 불가능하다는 믿음이 보편적이었다.

마침내 1986년, 기존의 BCS이론으로는 설명될 수 없지만 임계온도가 35K인 고온 초전도 물질이 발표되었으며[2], 1987년에는 임계온도가 92K로서 액체질소의 기화온도 77K보다 높은 구리계 산화물인 고온 초전도(HTS : High Temperature Superconducting) 물

* 교신저자 (corresponding author) : 남서울대학교 전자공학과(ysko@nsu.ac.kr)

접수일자 : 2015. 06. 19

심사(수정)일자 : 2015. 07. 13

게재확정일자 : 2015. 07. 23

질이 발견되었다. 이 발견으로 액체헬륨 대신 값싸고 풍부한 액체질소를 초전도 냉매로 사용할 수 있는 토대가 마련되었다[3], 또한 2001년에 39K에서 초전도성을 보이며, 가격이 저렴하고 합성과 전선형태의 제조가 비교적 쉬운 급속성의 이붕산마그네슘(MgB2)이 발견되었으며[4], 이듬해에는 이 초전도성이 내부전자들이 이중 에너지 간격이라는 특수한 성질을 가지기 때문이라는 사실이 밝혀졌다[5]. 이와 같이, 상업화가 가능한 초전도 물질들이 속속 개발되고 있으며, 나아가 고온 초전도체의 초전도 현상을 규명하기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있어 머지않아 보다 실용적인 급속성 초전도체들이 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 고온 초전도체를 기반으로 한 각국의 전력분야 대한 다양한 초전도 적용사례 [6-15]를 조사, 분석함으로써 그 가능성과 문제점들을 살펴본다, 그리고 이를 기반으로 다가올 초전도 시대에 대비한 기반 기술을 확보할 수 있는 대응전략을 수립할 수 있도록 한다.

II. 전력계통에 대한 초전도 적용 사례 분석

2.1 초전도 케이블

최근 전력회사들은 전력손실 최소화 및 장거리 대 전력 수송을 위해 송배전전압을 높이고 있다. 하지만, 최근 변전소 설치부지 확보의 어려움과 건설비용이 기하급수적으로 증가함으로써 이에 대한 대비책이 절실히 요구되고 있다. 초전도 케이블은 선로 저항으로 인한 손실이 거의 존재하지 않음으로써 낮은 전압으로 대 전력 수송이 가능해져 변전소 건설을 피할 수 있으며 동시에 배전선로 수를 줄일 수 있다. 그림 1은 초전도 케이블의 구조와 초전도 케이블 시스템 구성을 보인다. 초전도 케이블은 단상 또는 3상 케이블이 선택될 수 있다. 일반적으로 초전도 케이블은 그림 1에 보이바와 같이 케이블 내에 저온장치 내·외벽이 존재하여 냉매가 흐를 수 있도록 하며, 안쪽에 고온 초전도 선이 테이프 형태로 존재한다. 따라서 액체질소 순환냉각 시스템에서 초전도 케이블로 냉매인 액체질소를 가압하여 흐리게 하면 초전도 케이블 내의 공간으로 액체질소가 흐르게 되고 이때 흐르는 액체

질소는 초전도 선을 임계온도 이하로 냉각시켜 초전도 상태로 만든다. 그리고 이 과정에서 발생하는 냉매 가스는 복귀 관을 통해 액체질소 순환냉각시스템으로 귀환하여 액화되도록 설계된다[6-7]. 표 1은 EPRI에 의해서 조사된 각국의 고온초전도체 케이블 적용 사례를 보인다[7].

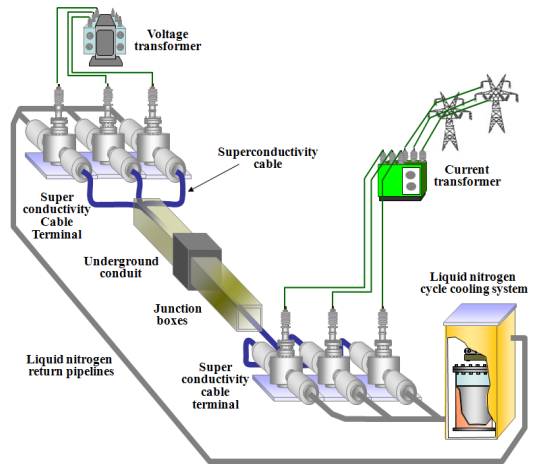


그림 1. 초전도 케이블 시스템
Fig. 1 Superconducting cable system

표 1. 각국의 HTS 케이블 적용 사례
Table 1. HTS application projects of each countries

Project	Albany	KEPCO/KEPRI	Asahi	Inno Power	Moscow
Location	Albany, NY, USA	Jeonbuk, South Korea	Yokohama Japan	Kunming, China	Moscow, Russia
Site	Reverside and Menands Substation	Gochang Power Testing Center	Asahi Substation	Puji Substation	Moscow Substation
Developer	Super Power	KEPRI/KEPCO	METI/Sumitomo	Inno Power	VNIIEP
Utility/Host	National Grid	KEPCO	TEPCO	China Southern Power Grid	-
Start Date	July 2006	Summer 2005	Late 2010	April 2004	2010
End Date	April 2008	Until 2009	Early 2012	-	-
Type	AC	AC	AC	AC	AC
Phases	3	3	3	3	3
Geometry	Triad	Triad	Triad	3-Phase	3-Phase coaxial
Voltage	34.5kV	22.9kV	66kV	35kV	20kV

Rated Current	800A (48MVA)	1250A (50MVA)	1750A (200MVA)	2000A (120MVA)	2000A (70MVA)
Length	350m	100m	300m	33.5m	200m
Fault Current	38 Cycles 23kA	5 Cycles 25kA	2 Sec. 31.5kA	2Sec. 20kA	-
HTS Material	BSCCO YBCO	BSCCO	BSCCO	BSCCO	BSCCO
Cable Fabrication	Sumitomo	Sumitomo	Sumitomo	Shanghai Cable Works	-
Cryostat Type	Flexible, stainless-steel	Flexible, stainless-steel	Flexible, stainless-steel	Flexible, stainless-steel	-
Cryostat Supplier	Sumitomo	Sumitomo	Sumitomo	Nexans	-
Cryogen	LN ₂	LN ₂	LN ₂	LN ₂	LN ₂
Refrigeration Supplier	Linde	Sumitomo	Mayekawa	Cryomech	-
Refrigeration Capacity	>5kW @77K	3kW @66-77K	-	2kW @77	-

2.2 초전도 한류기

전력계통에 낙뢰나 고장이 발생하면 정상전류의 수십 배에 달하는 전류가 흘러 전력설비나 케이블에 심각한 피해를 입힐 수 있다.

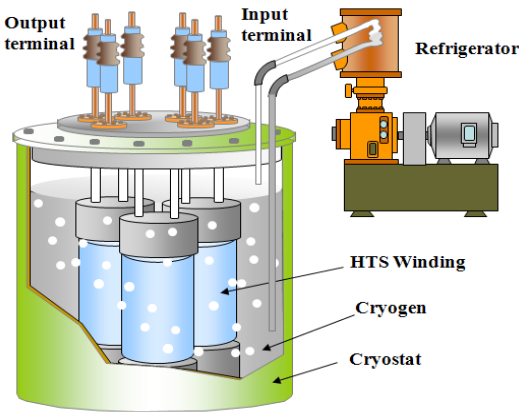


그림 2. 초전도 한류기
Fig. 2 Superconducting fault current limiter

초전도 한류기(SFCL : Superconducting Fault Current Limiter)는 정상상태 시에는 초전도 특성에 기반 하여 저항이 거의 발생하지 않다가 고장 시에는 신속하게 초전도 상태를 벗어나 임피던스를 급속히

증가시킴으로써 고장전류를 제한하여 피해를 최소화할 수 있다.

그림 2는 대표적인 초전도 한류기의 구성을 보인다 (<http://www.hypertechenergy.com/>, <http://www.stirlingcryogenics.com>), [8]. 입력단자로 입력되는 전류가 고온초전도체선을 통해 출력단자로 흘러나가도록 구성되며, 이때 임계온도 유지를 위해 저온냉각장치 내에서 기화된 가스는 냉각기에 의해 저온 액체질소로 액화되어 다시 저온냉각장치로 환원된다. 표 2는 EPRI에 의해서 조사된 각국의 고온초전도체 SFCL 적용 추진 사례를 보인다[8].

표 2. 각국의 SFCL 적용 사례

Table 2. SFCL application projects of each countries

Project	Avanti	England	Germany	Puji	Korea	Nagoya
Location	LA, CA USA	Lancashire, England	Boxberg, Germany	Kunming, China	Gochang, S. Korea	Nagoya, Japan
Site	Shandin Substation	Bamber Bridge	Local Power Plant	Puji Substation	Gochang Power Testing Center	Nagoya University
Developer	Zenergy Power	Nexans	Nexans	Inno Power	KEPCO & LSIS	나고야 대학
Utility /Host	Southern California Edison (SCE)	Consortium of CE Electric UK and two companies	Vattenfall Europe Generation AG	Yunnan Electric Power Grid	KEPCO	To be decided
Start Date	January 2009	Fall 2009	Fall 2009	December 2007	To be decided	To be decided
End Date	To be decided	Mid 2010	Late 2010	To be decided	To be decided	To be decided
Type	Saturable Core	Resistive	Resistive	Saturable Core	Hybrid Resistive	HTS 변압기
Phases	3	3	3	3	3	3
Voltage	15kV	12kV	12kV	35kV	22.9kV	22kV/6.6kV
Rated Current	800A	100A (2MVA)	800A (16MVA)	1500A (90MVA)	630A (2MVA)	52.5/175A (2MVA)
Max Fault Current	23kA	55kA	63kA	41kA	25kA (비대칭)	-
Current Limiting-Capability	~20% (4.6kA)	55kA→7A	63kA→30kA	~56% (23kA)	12.5kA→5.6kA	-
Max Limiting Duration	30 Cycles (0.5 sec.)	0.12 sec.	0.12 sec.	<200ms @10kA	1.5 sec.	5 cycles

Let-Through Current	18kA	1.8kA	6.6-7kA	-	630~1.5kA	-
Recovery Time	Immediate	Minutes	Minute	<800ms	~100ms	Instant underspecified cond
HTS Material	1G BSCCO	BSSCO-2212(bulk tube)	BSSCO-2212(bulk tube)	BSSCO-2223	YBCO	HV:BSCCO LV:YBCO
Size	H 2.7m W 2.7m L 2.7m	D. 1.2m H 2.5m	H 2.5m W 1m L 13m	D. 4.0m H. 4.2m	H 2.5m W 1.2m L 2.4m	D. 0.69m H 1m
Weight	20 tons	2 tons	2.5 tons	27 tons	< 1ton	425kg
Cryogen	LN2	LN2	LN2	LN2	LN2	LN2
Refrigeration Capacity	300W@77K	300W@77K	3kW@65K	200W@77K	220W@80K	-
Nominal Operating Temperature	-	73K	65K	77K	71K	77K

2.3 초전도 변압기

초전도 변압기는 초전도 특성에 기반 하여 코일의 임피던스가 거의 발생하지 않기 때문에 임계전류가 높은 자계에서 형성되어 철심의 자속밀도를 극대화할 수 있다.

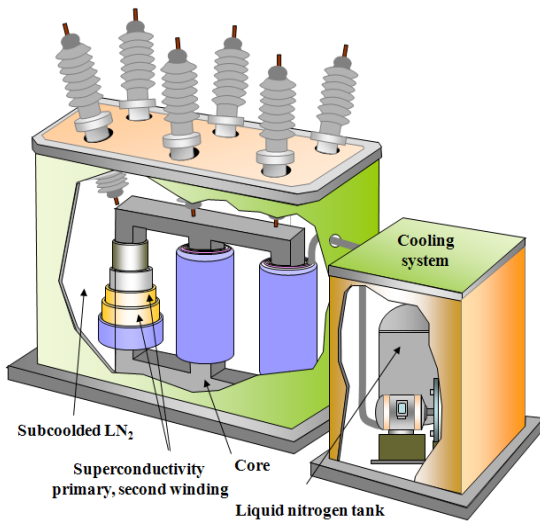


그림 3. 초전도 변압기

Fig. 3 Superconducting transformer

현재의 고온초전도 선재도 구리에 비해 거의 100배에 가까운 전류밀도가 가능하기 때문에 변압기의 소형화와 경량화가 가능하다. 그림 3은 초전도 변압기의

구성을 보인다[9]. 표 3은 참고문헌 [10]에 의해서 조사된 초전도 변압기의 개발 사례를 보인다.

표 3. 초전도 변압기 개발 사례

Table 3. Superconducting transformer development projects

Year	Affiliation	Rated kVA	Pri./Sec. Voltage	Phases	Efficiency	Conductor
1986	Alstom	80	670/1040V	1	97.8	NbTi
1988	Kyushu University	72	1057/218V	1	99.1	NbTi
1991	Toshiba	30	100/100V	1	98.5	NbTi
1992	Kyushu University	1000	3.3kV/220V	1	-	NbTi
1993	ABB	330	6kV/400V	1	-	NbTi
1995	Osaka University	40	460/115V	3	-	NbTi
1995	Kansai Elec. Power company	677	-	1	-	Nb ₃ Sn
1996	Kyushu University	500(77K)	6.6/3.3kV	1	99.1	Bi2223OPIT
1996	ABB/AmSC/EDF	630	18.7kV/420V	3	-	Bi2223OPIT
1998	WES/IGC/ORNL/RGE	1000	13.8/6.9kV	1	-	Bi2212SC
2000	Kyushu University	1000	22.9/6.6kV	1	-	Bi2223OPIT
2003	WES/SP/ORNL/EE	Rated 5MV/ Overload 10MVA	24.9/6.9kV	3	Under Test	Bi2223OPIT

2.4 초전도 모터

초전도 모터는 구리권선 대신 높은 전류밀도로 설계가 가능한 고온 초전도 테이프를 적용함으로써 동일용량에서 크기와 효율을 크게 줄일 수 있다. 그림 4는 초전도 모터를 보인다(<http://blog.naver.com>). 초전도 모터는 구조적으로 제작하기 쉽도록 고정자 부분만 초전도 코일을 경우와 고정자뿐만 아니라 회전자 부도 초전도 코일로 감은 경우로 구분될 수 있다. 후자를 전 초전도 모터 (Full Superconducting Motor)로 칭하는데 고정된 계자에 액체질소를 주입하는 것과 달리, 회전하는 회전자에 액체질소를 주입하는 문제는 구현하기 쉽지 않다.

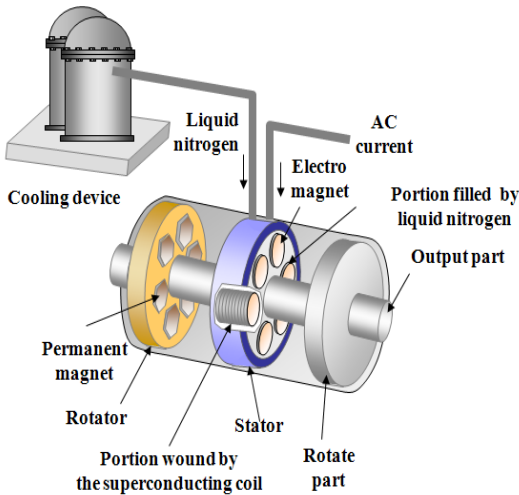


그림 4. 초전도 모터

Fig. 4 Superconducting motor

표 4는 참고문헌 [11-12]에 의해서 조사된 초전도 모터 개발 사례를 보인다. 특히 [12]에서는 세계 최초로 전 초전도 모터가 개발된다.

표 4. HTS 모터 개발 사례

Table 4. HTS motor development projects

Nation	Affiliation	Year	Rated Output	Type	Pole Num.	Speed (rpm)	HTS Material
USA	America Supercon. Corp.	1993	1.5kW	SM	2	3600	multifilamentary BSCCO coil
		1993	3.7kW	SM	4	1800	multifilamentary BSCCO coil
	Reliance Electric Com.	1995	92.0kW	SM	4	1800	multifilamentary Bi-2223/Ag coil
	Rockwell Auto.	2000	735kW	SM	4	1800	multifilamentary BSCCO tape
	Alstom Power Com.	2001	3.7MW	SM	4	1800	multifilamentary BSCCO wire
	America Supercon. Corp.	2003	5.0MW	SM	6	230	multifilamentary BSCCO tape
EU	Siemens	2001	400kW	SM	4	1800	Mg-reinforced Bi-2223/Ag tape
		2005	4MW	SM	2	3600	Bi2223 tape
		2009	36.5MW	-	-	120	-
Korea	KERI/Changwon University	2001	3.0kW	SM	4	1800	Bi-2223/Ag tape
	KEPRI/	2003	0.75kW	IM	4	1700	Bi2223 tape

a	Soonchunhyang University						
	Doosan Heavy Indus./KERI	2004	73.5kW	SM	4	1800	Stainless-steel-reinforced Bi2223 tape
	Doosan HeavyIndus./KERI	2007	1MW	SM	2	3600	Bi2223 tape
Japan	Tokyo University/Hiroshima University	2005	3.1kW	SM	8	720	Gd-Ba-Cu-O bulk magnet
	Kyoto University RTRI	2006	1.5kW	IM	4	1800	multifilamentary Bi-2223/Ag coil
	IHI	2005	12.5kW	-	-	100	Bismuth bulk type
Finland	Tampere University	1997	1.5kW	SM	4	1500	Bi-2223/Ag coil

III. 결론

본 논문에서는 고온 초전도 선재의 전력계통 적용 사례 및 적용 가능분야를 조사, 분석하였다. 특히, 초전도 케이블, 초전도 한류기, 초전도 변압기 그리고 초전도 모터들에 대해서 개발사례들을 조사, 분석하여 그 가능성과 문제점들을 살펴보았다. 결론적으로 HTS 기반의 보다 간단하고 경제적인 초전도 선재 가공법들이 개발되고 있고, 제작된 HTS를 실 계통에 적용, 적용기술을 확보함으로써 상업화 가능성을 높이고 있으며, 궁극적으로 초전도 선재로서 가공이 쉬운 초전도 재료들에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있어 멀지 않은 장래에 초전도 시대가 도래 할 것이 분명하다. 따라서 다가올 초전도 시대에 대비한 기반 기술을 확보하는 것이 무엇보다 필요하다고 하겠다.

References

- [1] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer "Theory of Superconductivity," *Physical Review*, vol. 108, no. 5, 1957, pp. 1175 - 1205.
- [2] J. G. Bednorz, and K. A. Mueller, "Possible High TC Superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," *Z. Phys.*, vol. B64, no. 2, 1986. pp. 189 - 193.
- [3] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H.

- Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, "Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure," *Physical Review Letters*, vol. 58, 1987, pp. 908-910.
- [4] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Janitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39K in Magnesium Diboride," *Nature*, vol. 410, 2001, pp. 63-64.
- [5] H. Choi, D. Roundy, H. Sun, M. L. Cohen, and S. G. Louie, "The Origin of the Anomalous Superconducting Properties of MgB₂," *Nature*, vol. 418, Aug. 2002, pp. 758-760.
- [6] M. Dakato, "Development Situation of Superconductivity," *Electrical Review*, vol. 2 no. 1, Mar. 2007, pp. 21-31.
- [7] S. Eckroad, "Superconducting Cables," *EPRI Technology Watch 2009*, Dec. 2009, pp. 12-17.
- [8] S. Eckroad, "Superconducting Fault Current Limiters," *EPRI Technology Watch 2009*, Dec. 2009, pp. 31-39.
- [9] H. Hashi, H. Okamoto, T. Harimoto, T. Imayoshi, A. Tomioka, T. Bouno, M. Konno, and M. Iwakuma, "A Study for Designing YBCO Power Transformer," *Physica C*, vol. 463-465, 2007, pp. 1233-1236.
- [10] W. V. Hassenzahl, D. W. Hazelton, B. K. Johnson, P. Komarek, M. Noe, and C. T. Reis, "Electric Power Application of Superconductivity," *Proc. of the IEEE*, vol. 92, no. 10, Oct. 2004, pp. 1655-1674.
- [11] J. X. Jin, L. H. Zheng, Y. G. Guo, and J. G. Zhu, "Development of High Temperature Superconducting Machines," *J. of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 15, no. 2, Sept. 2007, pp.88-91.
- [12] T. Toshio, T. Hiroyuki, and Oota Tomoya, "Development of Liquid Nitrogen- Cooled Full Superconducting Motor," *IHI Engineering Review*, vol. 39, no. 2, Aug. 2006, pp. 89-94.
- [13] Y. Ko, "Superconducting Flywheel Energy Storage Principle and Development Cases," *Proc. of the 2014 spring Korea Institute of Electronic Communication Sciences Conf.*, vol. 7, no. 1, Aug. 2013, pp. 477-479.
- [14] Y. Ko, "Survey and Analysis to Superconductivity Theory and Applications," *Proc. of Int. Conf. on Electronic Information and Communication 2015*, vol. 9, no. 2, Sept. 2015, pp. 389-392.
- [15] Y. Ko, "A Consideration on the Superconductivity Energy Storage Technology," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 6, 2015, pp. 691-697.

저자 소개



고 윤 석(Yun-Seok Ko)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업(공학사).

1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사).

1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).

1986년~1996년 한국전기연구소 선임연구원.

1996년~1997년 포스코 경영연구소 연구위원.

1997년~현재 남서울대학교 전자공학과 교수.

2012년~2013년 University of Utah 방문교수

※ 주 관심분야 : 전력시스템 자동화, 배전자동화, 주택자동화, 로봇제어