Regular paper http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2015.10.6.691

초전도 에너지 저장 기술에 대한 고찰

고윤석*

A Consideration on the Superconductivity Energy Storage Technology

Yun-Seok Ko*

요 약

최근, 전력산업에서는 지구 온난화에 대비하여 에너지 이용 효율 극대화하기 위한 방안으로 초전도 에너지 저장 장치에 큰 관심을 가지고 있다. 초전도 에너지 저장장치는 비 첨두시에 대량의 전기에너지를 손실 없이 자계 또는 운동 에너지의 형태로 저장하였다가 첨두시에 이를 다시 전기에너지로 변환하여 사용함으로서 피크부하의 균등화 및 순간정전 보상을 실현, 전기 에너지 이용 효율의 극대화를 기할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 초전도 에너지 저장기술에 대한 개념, 연구개발 현황 및 그 적용 사례 등을 조사, 분석하여, 전력계통 적용 기반기술을 확립하고자 한다.

ABSTRACT

Recently, the power industry has a great interest in the superconducting energy storage device as a way to maximize energy efficiency to cope with global warming. A superconducting energy storage device can archive maximization of electric energy use efficiency by storing in the form of a magnetic field energy or a kinetic energy without loss a large amount of electrical energy at the non-peak load and then converting it again into electric energy at the peak load. Therefore, in this study, such as the concept of the superconducting energy storage technologies, the present state of its research and development and its applications are surveyed and analyzed to establish methodology applying the superconducting energy storage technologies to power system.

키워드

Superconducting Flywheel Energy Storage, Superconducting Magnet Energy Storage, Superconducting Flywheel Energy Storage
초전도 저장 기술, 초전도 자계 에너지 저장장치, 초전도 플라이휘일 저장장치

I. 서 론

최근, 온실효과가스로 인한 지구 온난화로 기온과 해수면 상승 등 엄청난 재앙이 우려되고 있는 바, 세계 각국에서는 산업별로 온실 가스 배출량을 줄이기 위해 노력하고 있으며, 전력산업분야에서도 화석연료 사용을 줄이기 위해 태양광, 풍력 등 대체에너지 자원 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

특히 일본 후쿠시마 원전사고로 인해 독일, 일본 등을 중심으로 탈 원전화의 시대의 도래가 예상됨으로서 저탄소 녹색성장산업의 일환으로 에너지이용효율을 극대화하고 전력품질을 고도화하기 위한 방안으로 초전도 에너지 저장 장치에 큰 관심이 집중되고 있다. 초전도 에너지 저장장치는 첨두부하 시에 대량의 전기에너지를 초전도 현상을 활용, 손실 없이 자계 또는 운동 에너지의 형태로 저장하였다가 첨두부하 시에 이를 다시 전기에너지로 변환하여 사용함으로서 첨두부하 균등화 및 순간정전 보상을 통해 전기 에너

* 교신저자 : 남서울대학교 전자공학과(ysko@nsu.ac.krl)
접수일자 : 2015. 04. 28 심사(수정)일자 : 2015. 06. 13 게재확정일자 : 2015. 06. 23

지 이용 효율의 극대화는 물론, 전기품질 고도화 및 환경오염을 줄일 수 있다. 특히, 고온 초전도체가 개발되어 액체질소를 냉매로 활용, 극저온 냉각 비용이 크게 저감됨으로서 다양한 연구들이 수행되었으며, 그 결과로서 상용화에 근접한 연구결과들이 속속 발표되고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 연구추세에 대응하여 초전도 에너지 저장기술에 대한 개념[1-2], 연구개발 현황[3-10, 12-15]] 그리고 그 적용 사례[11] 등을 조사, 분석함으로서 차후, 초전도 에너지 저장기술을 스마트 그리드에 적용하기 위한 기반기술을 확립하고자 한다.

II. 초전도 이론

전통적인 초전도체 이론인 BCS 이론에 따르면, 초전도현상은 금속안의 전자들이 반발력을 억누르면서 두 개씩 쌍을 이뤄 결정격자와의 충돌을 피함으로서 얻어지는 것으로 알려져 있다[1].

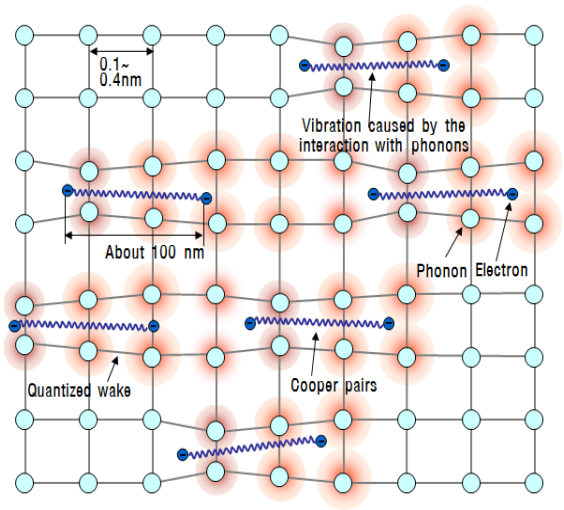

그림 1. 저온 초전도체를 위한 BCS 이론

Fig. 1 BCS theory for low temperature superconductivity

그림 1은 저온 초전도체에 대한 BCS 이론을 설명한다[(The New York Times, 2012). 일반적으로 금속선을 통하여 전류를 운반하는 전자들은 그 입자들이 진동하는 급속격자를 통과할 때 격자와의 충돌과 산란에 의해서 저항을 발생시킨다. 하지만 금속이 임계온도에 가까운 저온으로 냉각될 때 격자진동은 급속하게 감소하고 이동전자가 금속원자 가까이로 끌려, 전자 뒤의 포논들을 양 전자로 충전된다. 이 양전자로 충전되는 후류(wake)에 의해 가까이에 있는 다른 하나의 전자가 끌리게 되고, 이 두 전자들은 약한 결합력으로 쌍을 이루게 되는데, 이것을 Cooper 쌍으로 부른다. 이것은 두 전자가 독립적으로 이동할 때보다 보다 낮은 저항을 발생시키며, 동일한 메커니즘으로 생성되는 Cooper 쌍들은 동일한 작용을 하게 된다. 만약, 한 쌍의 전자들이 불순물에 의해서 산란된다면 다른 쌍들과 보조를 맞추어 재빠르게 원래의 상태로 되돌아오게 되기 때문에 전자들이 금속격자 속을 방해받지 않고 흐를 수 있어, 저항이 발생하지 않음으로서 전류가 영구적으로 흐를 수 있게 된다.

III. 에너지저장장치들의 출력/방전시간

에너지 저장장치들은 타입에 따라 출력/방전시간이 다른데 그 크기에 따라 적용분야가 검토돼야 한다.

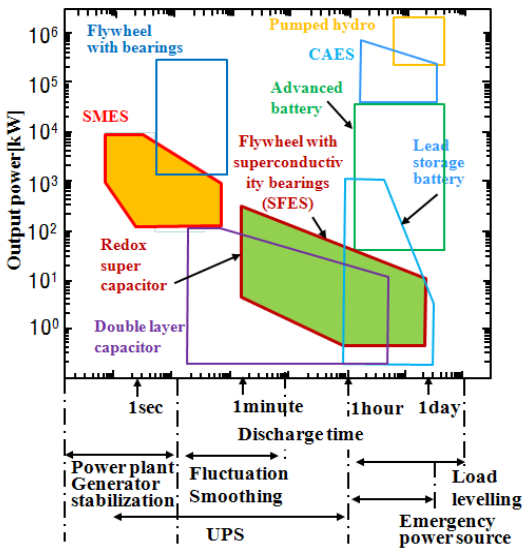

그림 2. 에너지 저장장치들의 출력/방전시간 비교

Fig. 2 Output/discharge time of energy storage devices

그림 2는 에너지 저장장치들의 출력/방전시간을 보인다[2]. 에너지 저장 장치들은 출력/.방전시간에 따라 전력 플랜트/발전기 안정화, UPS, 부하 평준화 및 비상전원용으로 활용이 가능한데, 그림 2는 기존의 베어링을 가지는 플라이 휘일 저장장치, 초전도 자계 에너지 저장장치(SMES), Redox 슈퍼 커패시터, 복층 커패시터, Pumped hydro, CAES, Advanced 배터리, 초전도 베어링을 가지는 초전도 플라이 휘일 저장장치(SFES), 납축전지 등과 같은 에너지 저장장치들과 그 가능한 적용분야에 대한 관계를 보인다. 부하 균등화나 비상 전원용으로 활용하기 위해서는 다른 용도들에 비해 비교적 방전시간이 수십 분에서 수 시간으로 길다는 것을 볼 수 있다. 표 1은 각 에너지 저장장치들의 개발단계를 보인다(http://www.aps.org).

표 1. 에너지 저장장치들의 개발단계

Table 1. Development stage of energy storage devices

Commercialization stage	Previous stage of commercialization	Field test stage	Development stage
Pumped Hydro	CAES	Zinc-bromide battery	Lithium-ion battery for grid application
Flywheel for power quality application in your site	Lead storage battery	Vanadium redox battery	SMES (Grid device)
	Flywheel (Load device)	Electro chemical capacitor	Electro chemical capacitor
	Micro SMES (Load device)		Advanced batteries

IV. 초전도 자계 에너지 저장장치

초전도 권선은 초전도 임계온도부근에서 거의 저항이 발생하지 않아 높은 전류밀도를 가질 수 있기 때문에 코일에 흐르는 전류로부터 식 (1)로 표시되는 엄청난 자계에너지를 생성, 에너지로 저장할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

이 초전도 원리를 이용하여 고안된 것이 초전도 자계 에너지 저장장치.(SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage)이다. 식 (1)에서 L은 코일의 인덕턴스, I는 코일에 흐르는 전류를 나타낸다.

그림 3은 초전도 자계 에너지 저장장치의 구성을 보인다[3]. 초전도 자계 에너지 저장장치는 전기에너지가 남는 시간에 초전도 코일이 감긴 에너지 저장장치에 전류를 흘려 전기에너지를 자계에너지로 변환하여 저장하고 있다가 필요시에 이를 다시 전기에너지로 변환하여 사용함으로서 에너지 이용효율을 크게 개선할 수 있다.

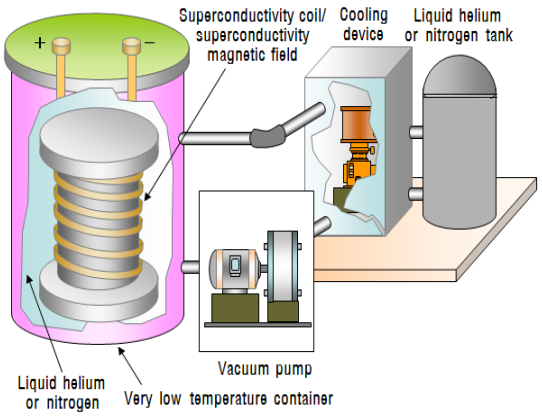

그림 3 초전도 자계 에너지 저장장치

Fig. 3 Superconducting magnetic energy storage

표 2. 초전도 자계저장장치 개발 사례

Table 2. Superconducting magnetic storage development projects

Nation	Year	Conductor	Cooling	Energy/Power	Use
Japan	2005	HTS(BACCO)	Helium closed cycle (4.2K)	1MJ/1MW	UPS
Japan	2006	LTS	Helium bath (4.2K)	7.3MJ/5MW	UPS
Japan	2009	LTS	Conduction (4K)	1MJ/1MW	UPS
Korea	2006	LTS	Helium bath	3MJ/0.75MW	UPS
Finland	2003	LTS(NB_3Sn)	Conduction (10K)	0.2MJ	UPS
China	2008	HTS(BACCO)	Helium bath (4.2K)	1MJ/0.5MW	UPS

표 2는 UPS기반의 초전도 자계 에너지 저장장치의 개발사례들을 보인다[5]. 현재 SMES를 전력계통 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있어 계통에 SMES를 적용할 수 있는 상업적 SMES도 개발될 수 있을 것으로 기대된다. Russian superconductor에서는 순간정전에 대응할 수 있도록 정격 그리드 파워에 도달하는 시간 7.5 미만, 최대 출력에 도달하는 시간 10 미만의 성능을 가지는 에너지(1MJ)/전력(1MW)의 SMES 프로토타입 모듈을 개발한 사례를 발표하였으며(http://en.russuperconductor.ru), 국내에서는 2007년 한국전기연구원(KERI)에서 1.03 MJ의 대용량 전력을 공급할 수 있어 순간정전이나 전압급락에 대응할 수 있는 SMES를 개발하였으며, 현재, 2.5MJ HTS SMES 개발 중이다.

V. 초전도 플라이휘일 에너지 저장장치

초전도 플라이휘일 에너지 저장장치 (SFES : Superconducting Flywheel Energy Storage)는 에너지 저장장치의 일종으로서 초전도 자계 에너지 저장장치와 비슷하다. 다만, 초전도 자계 저장장치가 잉여 전력을 자계에너지로 저장하는 것과는 달리 초전도 플라이휘일 에너지 저장장치는 잉여전력을 플라이휘일의 운동에너지로 저장한다.

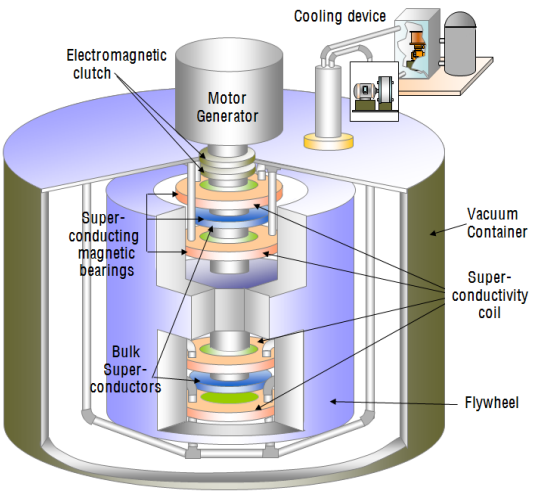

그림 4. 초전도 플라이휘일 에너지 저장장치
Fig. 4 Superconducting flywheel energy storage

SFES의 핵심은 플라이휘일의 무게를 지탱할 수 있는 초전도 자계 베어링의 설계인데, 그림 4에 보인바와 같이 이상적인 자계베어링의 경우 회전부에 냉매를 공급할 수 있도록 설계돼야 하는 어려운 문제가 제기될 수 있다[3],[5],[13].

SFES는 잉여전력이 발생하는 경우, 모터를 가동하여 플라이휘일을 회전시켜 운동에너지의 형태를 저장한다. 이때, 초전도 베어링은 마찰이 존재하지 않기 때문에 식 (2)로 표시되는 운동에너지는 영속적으로 저장된다. 따라서 전력이 필요한 경우 전동기를 발전기로 전환, 플라이 휘일과 연결하게 되면, 부하 쪽으로 전력이 생산된다. 식 (2)에서 J는 플라이휘일 관성, ω는 플라이휘일 속도를 표시한다.

$$E = \frac{1}{2} J\omega^2 \tag{2}$$

표 3은 SFES의 개발사례들을 보인다[6-9]. 일본에서 SFES의 에너지 저장용량을 증대시키기 위한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

표 3. 초전도 플라이휘일저장장치 개발 사례
Table 3. Superconducting flywheel storage development projects

Nation	Affiliation	Year	Energy/ power	Maximum rotation speed(rpm)	Flywheel parameter	Cooling type	Line material
Japan	Koyo SECIO	1998	0.5kWh	30,000	Weight 37kg Diameter 0.4m	-	YBCO
	Jungbu electric power/ mitsubishi	2000	1kWh	20,000	Weight 76kg Diameter 0.6m	-	YBCO
	ISTEC/ Sakook electric power	2004	10kWh/ 15kW	7,500	Weight 425kg Diameter 1.0m	-	YBCO
	CJRC/ Tokyo university	2006	50kWh/ 1000kW	2,000	Weight 25 ton Diameter 2.0m	Conduction cooling	NbTi

국내에서는 2000년 한국전력공사를 중심으로 7Wh급 SFES를 개발하였으며, 2007년 5kWh급, 2012년 100kWh급을 개발하는데 성공하였다. 그림 5는 보잉에서 개발한 고온 초전도체 베어링을 기반으로 한 3kW/5kWh SFES의 외관을 보인다[10].

그림 5. 보잉에서 개발된 SFES 프로토타입 모듈
Fig. 5 SFES prototype module developed in Boeing

VI. 적용 사례

세계 각국에서는 초전도에 대한 경제적, 기술적 발전을 기반으로 초전도 에너지 저장장치를 개발, 전력계통 적용을 적극적으로 추진하고 있다.

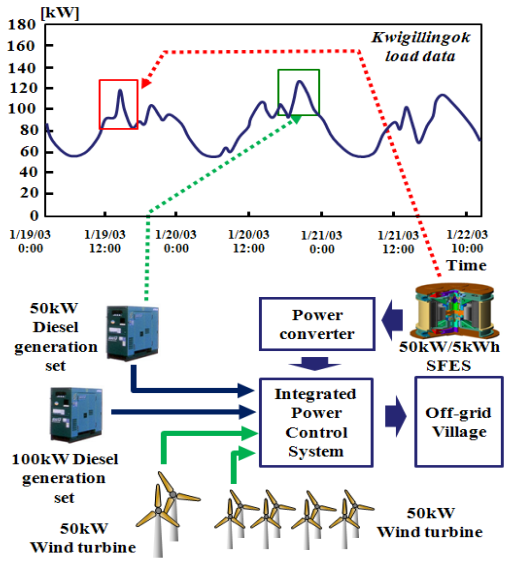

그림 6. 보잉의 SFES 적용 사례
Fig. 6 Boeing's SFES application case

초전도 에너지 저장장치의 대표적인 적용 사례로는 그림 6에 보인 미국 보잉사가 개발한 전력/에너지용량 50kW/5kWh SFES를 알래스카 Kwigillingok 지역에 적용한 사례를 들 수 있다[11]. 이 지역의 경우 멀티 디젤 시스템에 의존하고 있어, 개발된 50kW SFES를 대기 중인 2번째 발전기 대신에 적용하도록 설계되었다. 이 실증 시험이 효과적으로 추진되게 되면 발전기 유지보수비용을 50%, 연료비용을 연간 $80,000까지 절감할 수 있음은 물론 환경오염을 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 결 론

초전도 에너지 저장분야는 일본 등을 중심으로 기술개발이 시작되었지만, 최근 국내에서도 많은 노력을 기울여 세계적 수준에 이르고 있다. 또한, 제작기술의 발전으로 저장용량이 증대되고 고온 초전도 소재의 개발로 보다 저가의 냉각 매체를 사용, 비용이 저감됨으로써 상용화 가능성이 점차 증대되고 있다. 따라서 이러한 기술변화에 대응하여 보다 높은 실용성 확보를 위한 저비용, 대용량화 기술개발을 위해 체계적이고 지속적인 연구개발 노력이 있어야할 것으로 판단된다.

본 논문은 2014년도 한국전자통신학회 가을철 종합학술대회 우수논문입니다.

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] K. E. Nielsen, "Superconducting magnetic energy storage in power systems with renewable energy sources," Master' Thesis, *Norwegian University of Science and Technology*, 2010.

[3] M. G. Molina, Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage for

Power System Applications, Dynamic Modelling. *www.intechopen.com*, Jan. 2010, pp. 49-93.

[4] A. Badel, "Superconducting Magnetic Energy Storage using High Temperature Superconductor for Pulse Power Supply," Doctor's Thesis, *University of Grenoble*, Sep. 2010.

[5] K. Nagashima, H. Seino, N. Sakai, and M. Murakami, "Superconducting Magnetic Bearing for a Flywheel Energy Storage System using Superconducting Coil and Bulk Superconductor," *Physica C*, vol. 469, Oct. 2009, pp. 1244-1249.

[6] Y. Miyagawa, H. Kameno, R. Takahata, and H. Ueyama, "A 0.5 kWh Flywheel Energy Storage System using A High-Tc Superconducting Magnetic Bearing," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 9, no. 2. June 1999, pp. 996-999.

[7] S. Nagaya, N. Kashima, M. Minami, H. Kawashima, and S. Unisuga, "Study on the High Temperature Superconducting Magnetic Bearing for 10 kW Flywheel Energy Storage System," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 11, no. 1, Mar. 2001, pp. 1649-1652.

[8] T. Ichihara, K. Matsunaga, M. Kita, I. Hirayabashi, M. Isono, M. Horose, K. Yoshii, K. Kurihara, O. Saito, S. Saito, M. Murakami, H. Takabayashi, M. Natsumeda and N. Koshizuka,"Application of Superconducting Magnetic Bearings to a 10kWh-Class Flywheel Energy Storage System," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, June 2005, pp. 2245-2248.

[9] Y. Yamauchi, N. Uchiyama, E. Suzuki, M. Kubota, M. Fujii, and H. Ohsaki, "Development of 50kWh-Class Superconducting Flywheel Energy Storage System,"*Proc. of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion 2006*, Taormina, Italy, May 2006, pp. 484-486.

[10] M. Strasik, John Hull, John Mittleider, John Gonder, Kevin McCrary, and Carl McIver, "Design, Fabrication, and Test of a 5 kWh Flywheel Energy Storage System Utilizing a High Temperature Superconducting Magnetic Bearing,"*2011 Energy Storage Systems Program,* Boeing Research and Technology, San Diego, CA. USA, Oct. 2011.

[11] Phil Johnson, "Design, Fabrication, and Test of a 5 kWh Flywheel Energy Storage System Utilizing a High Temperature Superconducting Magnetic Bearing, "*Proc. of International Conference on Electrical Energy Storage Applications and Technologies 2005,* SanFrancisco, CA. USA, Oct. 2005.

[12] Y. Ko, "Superconductivity Flywheel Energy Storage Principle and Development Cases," *Proc. of the 2014 spring Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 1, Pusan, Korea, 2013, pp. 477-479.

[13] K. Lee, I. Choy, W. Cho, and J. Back, "MPPT and Yawing Control of a New Horizontal-Axis Wind Turbine with Two Parallel-Connected Generators," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 7, no. 1, 2012, pp. 81-89.

[14] M. Jeong, C. Moon, H. Kim, Y. Chang, and T. Park,"A Study on Design of 50kW PMSG for Micro-grid Application," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 4, 2014, pp. 527-536.

[15] J. Park and Y. Bae, "Development of a Technical Road Map for Future Research in Wind Power Generation using Grading Criteria as a Rubric for Research Focus," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 3, 2011, pp. 417-423.

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