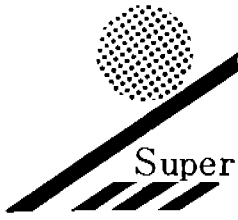


超電導 에너지 貯藏裝置

개발현황 및 전망



Superconducting Magnetic Energy Storage

홍 원 표

한전 기술연구원 계통연구실

1. 序 論

산업발전과 생활수준 향상에 따라 전력계통의 부하율이 점점 악화하는 경향에 있고, 한편 발전설비에 있어서는 경제적인 운전 및 안정운전 측면에서 기저 부하로 운전되는 원자력 발전의 점유율이 증가추세에 있다. 또한 전력계통의 대규모화, 복잡화로 인한 전력수급 채무를 수행함에 있어 현재까지 나타난 전력회사의 문제점은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 수요예측이 어렵다.

2) 첨두부하와 심야 경부하와의 차이가 현격하게 클 뿐만 아니라 부하곡선의 패턴 (Pattern)도 변하고 있다.

3) 효율 및 경제성이 좋은 최근 발전소(화력, 원자력)는 그 영향이 클 뿐만 아니라 출력 조정 폭이 좁고 부하 추종성이 좋지 않다.

4) 앞으로 등장할 화석 에너지고갈로 원자력, 조력, 태양열 등의 발전소의 출력특성은 경제성 등의 이유로 부하의 로드 사이클 (Load Cycle)과 무관하므로 이들의 유효이용의 문제가 있다.

이와 같은 전력 시스템의 문제점을 해결하고 전력설비의 효율적인 운용 및 에너지 합리적 사용 측면에서 심야의 경부하 잉여전력을 저장하여 첨두부하시 전력을 충당할 수 있는 에너지 저장장치가 당연히 요구된다.

현재 양수발전소가 담당하고 있으나 이 저장 방식은 입지환경의 어려움이 있을 뿐만 아니라 효율이 65%로 낮아 전력저장이라기보다는 첨두부하시 수급관계 개선이라 볼 수 있다. 따라서 전력계통 운용상 전력저장 시스템 개발이 시급히 요구되고 있으며 이중의 하나로 최근에 실용화가 유력시되는 초전도체를 이용한 초전도 에너지 저장장치 (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage)에 대한 연구가 활발히 추진되고 있다. 이 저장방식은 전기저항이 없는 초전도체로 만든 코일에 잉여전력을 충전시킨 후 폐쇄회로로 만들어 영구히 저장되며 필요할 때 언제든지 손쉽게 쓸 수 있다.

이 방법의 특징은 전력 에너지를 다른 형태로 변환시키지 않고 직접 전기 에너지 그대로 방전 및 저장할 수 있으며 따라서 효율이 90% 이상으

로 매우 높다는 점이다. 또한 전력변환기에 다이리스터(Thyristor)를 사용하기 때문에 속응성이 우수하게 유효·무효전력을 동시제어할 수 있다.

이를 전력계통에 사용할 경우 전력설비의 계획과 운용은 발전과 전력저장이라는 이원적(二元的) 측면을 해결할 수 있으며 순수 대규모 에너지 저장에서부터 전력설비의 효율적 이용, 계통안정도 향상, 순도에비력 확보 및 주파수 조정 등 광범위한 적용이 가능하기 때문에 명실상부한 저장장치로서 전력사업에 큰 기여할 것으로 평가되고 있다.

2. 超電導 에너지 貯藏原理 및 特徵

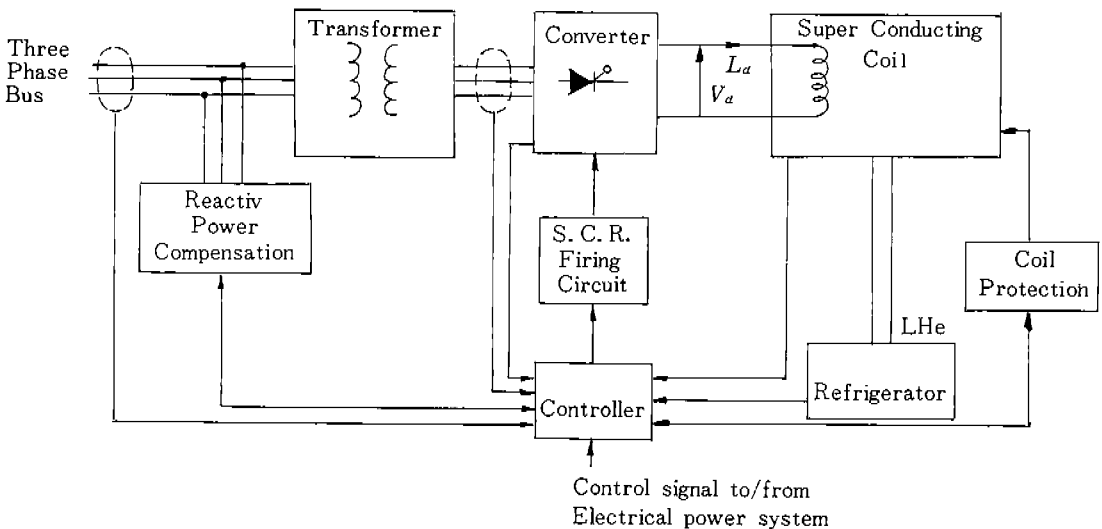
초전도 에너지 저장원리는 전기저항이 "0"인 코일에 전류를 흘릴 때 저장되는 자기 에너지 ($\frac{1}{2}LI^2$)를 이용하는 것으로, 양수규모용 에너지 저장장치의 핵심부인 거대한 초전도 코일은 지하에 매설되어 있다. 이와 같은 커다란 코일에는 축방향과 반지름 방향으로 막대한 전자력이 작용하게 되며 축방향의 전자력은 저온 구조

재로 지지는 용이하나 반지름 방향의 전자력이 문제가 된다. 실용화 규모인 500만kWh급 초전도 코일에 발생하는 전자력은 스테인레스 강으로 지지할 경우 대략 100만톤의 막대한 물량이 소요된다. 이의 경제적인 문제를 해결하기 위하여 최선의 방법으로 지하 암반으로 초전도 코일을 지지하는 방법이다.

그림 1은 초전도 에너지 저장장치 구성도를 표시한 것으로, 각 부분을 초전도 코일 부분, 전력변환기 부분, 냉각 시스템 부분으로 대별할 수 있다. 이중 가장 중요한 부분은 초전도 코일 부분이다.

(1) 초전도 코일 부분

초전도 코일은 솔레노이드형과 토로이단형이 있다. 솔레노이드형은 구조가 간단하고 경제적인 측면에서 활용가능성이 유리한 형태이며 토로이단형은 솔레노이드형에 비하여 구조가 복잡하고 비경제적이나 전자력선의 외부누설이 거의 없기 때문에 입지적인 측면과 제조 및 설치측면에서 현재 검토되고 있다. 초전도 코일을 사용하는 선재로 Nb-Ti와 Nb₃Sn과 같은 2종 초전도 재료를 극세 다립화와 트위스트시켜서 안정화 재



(그림 1) 초전도 에너지 저장장치 구성도

로인 Cu 또한 Al에 복합(Matrix)시켜 사용하는 것이 보통이다.

(2) 전력변환 부분

이 부분은 초전도 코일과 전력계통을 연결시키는 장치로, 현재 반도체 소자인 다이리스터를 단일 브리지(6 Pulse) 또는 더블 브리지(12 Pulse)로 구성, 사용하고 있다. 전력계통에서 전력을 저장할 필요성이 있는 경우는 점호각을 0~90° 변화시켜 코일에 에너지를 저장한 다음 침두부하시 변환기 점호각은 90~180°로 인버터로 동작시켜 저장전력을 계통에 방출시키며 이 동작은 수 십ms 이내에 이루어질 수 있는 장점을 가지고 있다.

(3) 냉동 시스템 부분

초전도 코일을 극저온으로 유지시키기 위한 장치로, 외부의 열을 효과적으로 차단시키기 위한 저온 용기, 냉매인 헬륨을 액화시키기 위한 냉각장치로 구성되어 있다.

초전도 코일은 초유도 헬륨으로 냉각, 1.8°k에서 동작하게 된다.

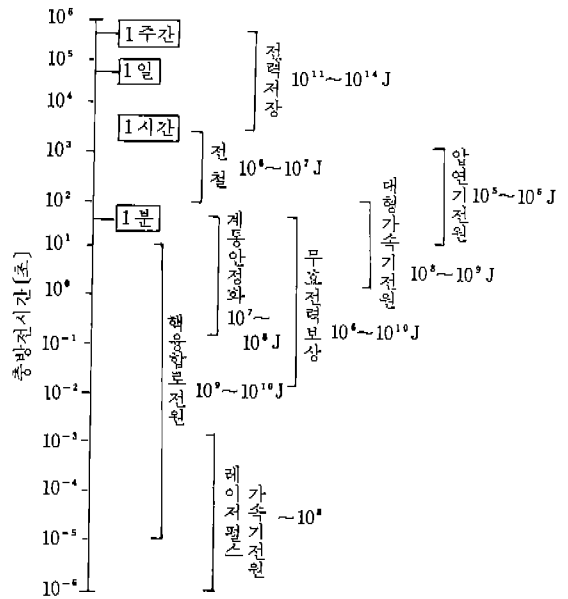
특히 외부의 열을 효과적으로 차단하기 위하여 헬륨용기 외부는 진공벽으로 둘러싸여 있어 특히 대류에 의한 열을 거의 완벽하게 차단하도록 되어 있다.

3. 에너지 저장장치의 電力系統에서 運用

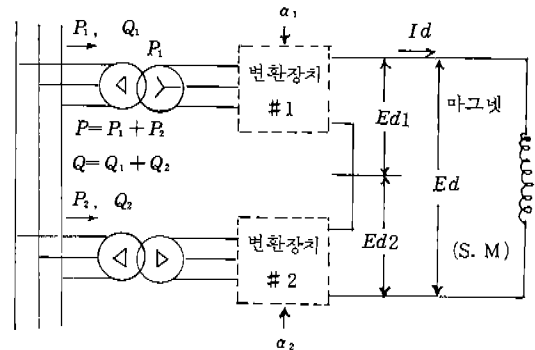
그림 2에서와 같이 에너지 저장장치의 응용범위는 매우 광범위하며 특히 전력계통 운용측면에서 크게 두 분야로 나눌 수 있다.

첫째는 저장용량이 양수 발전규모(10¹¹~10¹⁴ [J])이고 충방전 시간이 긴(1시간~1주) 전력 저장용과 저장용량이 대체로 적고 충방전 시간이 짧은(10초~1분) 전력계통 안정용 및 무효 전력 보상용이 있다.

그림 3은 전형적인 회로구성이며, 전력계통



〈그림 2〉 초전도 에너지 저장장치 응용범위



〈그림 3〉 초전도 에너지 저장장치 기본회로 구성도

연계 운전시 무효전력제어의 용이성 때문에 일반적으로 사용되는 방식이다. 이 장치에 교류계통으로부터 유입하는 유효전력(P)과 무효전력(Q)는 다음 식으로 표시된다.

$$P = Id Ed_0 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2), \quad Q = Id Ed_0 (\sin \theta_1 + \sin \theta_2),$$

$$\text{여기서 } \cos \theta_1 = \cos \alpha_1 - 3Xc Id / (\pi Ed_0), \quad 5^\circ \leq \alpha_i < 140^\circ (i=1, 2)$$

〈표 1〉 전력계통 적용가능 분야

이 용 목 적		기 능	크 기	비 고
에너지 저장용(전기 질의 향상)	양수발전대체	전원의 유효이용	5 GWh	특히 주휴 전후 야간 주파수 안정화용
	P제어	수송장치의 유효이용	1 - 10GWh	
	부하주파수제어	주기 10초~ 3분 정도의 변동부하		
	P제어	맥동부하제어		
전 력 계 통 안 정 화	과도 안정화용	PQ 동시제어가 효과적	kW 대전력 kWh중용량	분산배치 필요 초고압변전소 2차측 설치
	PQ 제어		kW 대전력 kWh중용량	
	P 제어		kW 대전력 kWh중용량	
	Q 제어		kWh중용량	
	정태안전화용	저주파지속진동 억제	50MJ 10~30kWh	직렬 콘덴서 삽입계통 적용
	P 제어			
	운전에비력	운전예비력 삭감	1 GWh 40만kW	전원탈락시 부하탈락시 이용 모선전압상승방지
	P 제어			
부하변동 억제용	밀부하	SVC와 동등 기능	4 G J	변동원 가까이 설치 변동원 가까이 설치
	P 제어			
	전기로부하 Q 제어		0.4 MJ	
조상용	정상시의 조상 Q 제어	Shunt Reactor대용 Static Condenser 대용		SVC대용

I_d : 마그넷 전류, α_i : 변환기 i 의 점호자
(1, 2)

SMES에 의하여 저장방출이 가능한 P 와 Q 의 범위를 $P-Q$ 동시제어 가능 영역이라 하며 이 영역내에서는 제어장치에 의하여 계통에 요구하는 무효 유효전력을 속응성 있게 조절이 가능하기 때문에 전력계통 안정도 향상 측면에서도 뛰어난 성능을 발휘할 것으로 예상된다. 초전도 에너지 저장장치의 전력계통 적용가능 분야로 요약하며, 표 1로 나타낼 수 있다.

4. 超電導 에너지 貯藏裝置 研究現況

초전도 저장장치는 60년대 후반 미국에서 연구개발이 시작된 이래 각국에서 활발히 진행되

고 있다.

(1) 미 국

대규모 SMES 연구는 미국의 위스콘신 대학과 로스알라모스(LNL)에서 주도적으로 수행되어 최초로 그 기본개념이 제시되었으며 특히 BPA의 타코마 변전소에 30MJ SMES를 제작 계통에 병입, 계통 저주파 진동억제용으로 그 효용성을 보고한 바 있다.

양수규모용 SMES는 (10, 000MWh)는 코일 직경이 206m의 대규모 코일로 그 전자력이 막대하여 지금까지의 연구결과를 토대로 가장 경제적이며, 기술적으로 가능한 모델을 코일 직경에 비하여 높이가 낮은 LAR-마그넷 형태로 지하에 매설하는 방법을 제안하였다. 현재의 EPRI

제37회 전기기술강습회 실시 안내

일 정 : '90. 9. 19~9. 21 (3일)

장 소 : 한국종합전시장 4층 국제
회의실

대 상 : 전국 전기기사 및 기능사

수강료 : 30,000원

접 수

· 기간 : '90. 9. 1 ~ 9. 19

· 장소 : 당협회 본부

강습회 과목

일 정	과 목	시간
9. 19	○소양교육	2
	○메인트레스의 현장점검과 보수	3
9. 20	○전기전격방지대책	3
	○중앙감시제어장치	3
9. 21	○현장견학	8

평가에 의하면 건설 단가는 2000년에 이르면 양수발전과 같은 600\$/kW 낮아질 것으로 예측하였다. 현재 국가적인 핵심과제로 연구중인 고온 초전도체가 실용화되면 5~20%의 건설단가 절감이 가능할 것으로 전망된다.

(2) 일 본

일본에서는 1969년 구주대학에서 이론적 연구가 시작된 이래 각 대학 고에너지 연구소 및 전차종합연구소 실험연구를 완료한 바 있다.

특히 '82년 신 에너지 종합 개발기구(NEDO)가 3년간 미래 공학연구소에 위탁한 초전도 에너지 저장 시스템에 관한 조사연구를 기점으로 활발한 연구가 진행되었으며, 이 연구에는 일본의 대표적인 중전기 건설 화학, 저온, 진공, 토

목, 건설 및 전력 등 약 25개사의 기술자 대학, 국립기관의 연구자가 참여하여 10MWh의 개념설계와 평가, 그리고 1983년에는 5,000MWh의 계통운용 및 효과 평가 및 개념설계 연구를 완료한 바 있으며 또한 민간에서는 기술진흥협회(ENAA)가 1983년부터 상기 연구와 같은 규모를 시작하여 5,000MWh급의 입지조사, 암반내 응력, 건설방법 및 건설비 평가 등을 연구하였다.

앞으로 장기 연구개발계획을 보면 13kWh급 용량의 시험 Plant (1986~1991) 10MWh 원형 Plant (1992~1996), 100MWh 실증 Plant (1988~2006) 그리고 5,000MWh 용량의 상용 Plant (2008~2018)의 순으로 계획하고 있으며 이중 첫단계의 시험 Plant의 설계제작, 설치 및 시험

〈표 2〉 한전 기술연구원의 연구실적 및 계획

단 계	연구개발내용	기 간	내 용	기 관
1 단계	기초연구	1984. 1 ~ 1985. 5	25KJ SMES 설계, 제작, 실험	완 료
		1985. 5 ~ 1986. 8	전력계통 연계특성	
		1986. 8 ~ 1988. 4	SMES 계통안정도효과 실증 실험	
2 단계	요소기술확립 연구	1988. 8 ~ 1992. 3	계통안정화용 SMES 국내제작 및 고속 에너지 전달시험	연구중
3 단계	종합기술 및 계통적용기술 확립	1993 ~ 2000	○Pilot Plant 건설 (Hardware) ○전력계통 적용기술확립 (Software)	중장기 계획

연구에 32억엔을 예상하고 있다. 특히 일본에서는 국, 산, 학, 연 공동으로 이 분야의 중요성을 인식, 막대한 연구인력과 예산을 투입할 예정으로 있어 조기 사용이 전망되는 계통 안정도 중용량급 SMES 실용화를 90년 대말 사용을 목표로 진행하고 있다.

(3) 한 국

한국에서는 한전 기술연구원에서 필요성을 인식, 1984년부터 서울 대학교와 공동으로 25KJ급 SMES의 기본 특성연구를 완료한 바 있으며, 2 단계 연구로 0.5MJ급 SMES 국내제작을 목표로 현재 연구를 진행하고 있다. 표3은 우리나라의 연구실적을 나타낸 것으로, 2 단계 연구에서는 SMES의 요소기술을 조기확립하고 3 단계 연구부터는 산, 학, 연 공동연구를 추진하여 앞으로 초전도 저장장치 계통적용을 조기에 달성할 계획이다.

5. SMES의 展望 및 앞으로의 課題

SMES는 21세기 초반 기술로서 실용화를 위하여 빠른 속도로 진척되고 있다. 이 장치는 고효율성(90% 이상), 고속응성(Msec) 및 입지 조건에서 매력적인 장점을 갖고 있어 선진 각국에서 정부 전력회사 및 민간기업의 지원으로 2000년초의 계통 실용화를 목표로 활발한 연구

가 추진되고 있다.

특히 저장장치는 전력계통 분야에서의 순수 에너지 저장에서 전력계통 안정도 향상, 순동예비력 확보, 주파수 조정, 무효전력 보상장치 등 광범위한 적용이 검토되고 있고 산업계 측면에서는 자기 부상열차, 핵융합, 마그넷 등 그 파급효과가 지대하기 때문에 우리나라에서도 중요성을 인식, 집중적인 연구를 추진하여 2000년대 초전도 시대에 능동적인 대처 뿐만 아니라 선진국 기술보호주의에 대비하여야 할 것이다.

1981년 BPA에 타고마 변전소에 30MJ급 SMES 실증연구를 시도한 바 있어 소용 SMES 규모에서는 1990년말경 계통적용이 확실시 된다. 특히 고온 초전도체의 실용화 가능성에 따라 이 분야의 연구뿐만 아니라 초전도기기(발전기, 전동기, 변압기, 케이블 등)에도 눈을 돌려 이 기기의 기술개발 현황을 파악하고 연구 기술자의 저변 확대, 계통 운용시에 대비하여 연구를 장기적으로 진행하여야 할 것이다.

미국 EPRI의 경제성 평가에 의하여 kW당의 단가는 2000년에는 600\$로 양수발전보다 경제성이 있을 것으로 예상되는 바 따라서 우리나라에서도 이의 연구개발에 적극 참여하여 선진국에 뒤져 있는 기술낙차를 최대한으로 좁히면서 전력 계통에 조기적용의 기반을 구축함으로써 다가 올 초전도 전력계통 적용시대에 대비해야 할 것이다.