

고온초전도에너지저장장치의 적용가능성

박민원

창원대학교 메카트로닉스공학부 전기공학전공

1. 시작의 말

인간이 가장 쉽게 에너지를 저장할 수 있는 방법은 많이 먹는 것이다. 일반적으로 먹는 것으로 인한 에너지 변환효율은 아주 높다고 할 수 있고, 맛의 가치를 정량적으로 표현할 수 없기 때문이지 그 가치까지 포함한다면 아주 좋은 에너지 저장 방법이 아닐 수 없다. 하지만, 사람의 힘(물리적)만으로 가능한 일(수송, 가공 등)이 이제 거의 없기 때문에 어떠한 방법을 이용해서라도 에너지를 저장할 수 있는 기술을 개발하여야 하는 세상이 되었다. 본고에서는 물리적으로 에너지를 적재하는 것이 아닌 전기에너지의 저장에 대해서 언급하고 그 중 초전도마그네틱을 이용한 에너지저장 장치의 활용성에 대해서 언급해 보도록 한다.

2. 전기에너지저장방법

에너지를 저장하는 방법은 여러 가지가 있지만, 특히 전기에너지를 저장하는 방법을 나열해 보도록 하자.

〈전기에너지 저장장치의 종류〉

Energy Storage		Example	Life cycle	Eff.	Self-discharging
Electrical method	Inductor (L)	SMES	Unlimited	90-95	Only cooling power
	Capacitor (C)	EDLC (SuperCap)	20,000	90-95	10%/day
Chemical method (2차 전지)	Na-S	나스전지	5,000	89-92	-
	Lead Acid	납축전지	500	75	40%/year
	Li-ion	리튬이온전지	500	96	5-10%/month
	Ni-MH	니켈수소전지	>500	-	-
	Redox-flow	레독스플로우전지	12,000	-	-
	Ni-Cd	니켈카드뮴전지	2,000	70-90	25%/month
	Hydrogen	전기분해수소저장	Unlimited	-	-
Mechanical method	Zn-Br	아연브롬전지	-	70-75	-
	Li-poly	리튬폴리머전지	1,000	-	-
	CAES	압축공기전력저장	Unlimited	70	-
	Flywheel	자기부상회전체	Unlimited	85-90	1-10%/hr
	Pumped hydro	양수발전소	Unlimited	70-85	Low evaporation

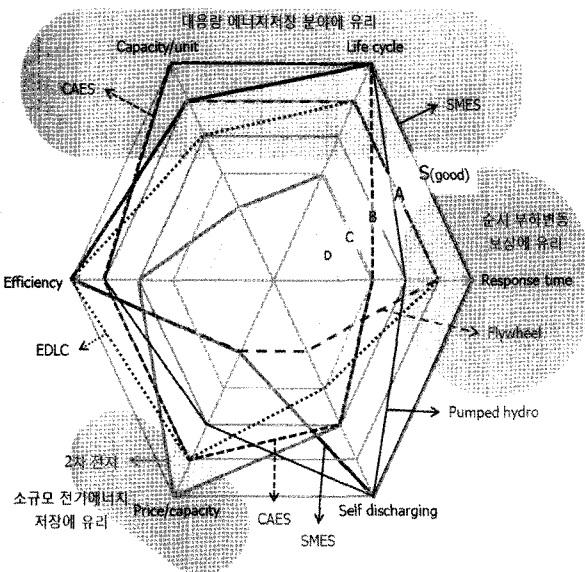
전기에너지를 저장하는 방법은 크게 3가지로 구분될 수 있는데, 전기적 방법의 전기에너지저장, 화학적 방법, 그리고 마지막으로 기계적 방법의 전기에너지저장이 있을 수 있다. 전기적 방법의 에너지저장으로서 인덕터와 캐패시터를 이용한 방법이 있을 수 있는데, 불과 얼마 전만 하더라도 개념은 오래전부터 소개되어 왔지만, 인덕터의 경우는 인덕터자체에 저항성분이 존재(코일로 구리선을 사용)하기 때문에 에너지를 요구하는 시간까지 저장할 수 없었고, 캐패시터의 경우는 충분한 내전압용량을 가진 높은 값의 F를 확보할 수 있는 기술이 없었지만, 최근 기술의 발달로 수F 이상의 캐패시터를 생산할 수 있는 기술로 인해 EDLC(Electric Double Layer Capacitor)라는 이름으로 전기에너지를 저장할 수 있는 길이 열렸다. 또한, 인덕터의 경우에도 고온초전도선으로 코일을 권선하여 적은 냉각용량으로도 초전도상태를 유지할 수 있고, 높은 운전전류를 확보할 수 있게 되어 이 또한 EDLC와 같이 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage system)라는 이름으로 에너지를 저장할 수 있게 되었다.

화학적 방법으로 전기에너지를 저장하는 방법은 모두 2차전지라 할 수 있다. 전기에너지를 화학에너지로 변환하고 다시 필요할 때, 전기에너지로 환원하여 사용하는 전지를 말한다. 가장 널리 사용되고 있는 전지가 바로 납축전지이고 최근에서는 리튬이온전지 및 니켈수소전지 등의 사용이 확대되고 있다. 2차전지를 사용하는 방법은 비교적 저렴한 가격으로 전기에너지를 저장할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 비교적 효율이 낮고 충방전으로 인한 수명의 급격한 경년변화가 발생한다는 단점을 가지고 있다.

기계적 방법으로 전기에너지를 저장하는 방법은 크게 다시 3가지로 구분될 수 있다. 가장

고전적인 방법이면서 전세계적으로 널리 이용되고 있는 양수발전방식이다. 이는 설치될 수 있는 장소가 있고, 환경적으로도 구조적으로도 문제가 없다면 무조건 설치하는 것이 경제적이다라는 결론을 가지고 있다. 우리나라에도 비록 많은 장소는 아니지만, 설치가능한 모든 곳(삼랑진, 청송, 청평, 무주, 산청 등)에 설치되어 있다. 또한, 초전도체의 자기부상원리를 이용한 플라이휠 에너지저장 방식이 있다. 이는 전기에너지를 운동에너지(Kinetic Energy)로 변환시키고 필요시 다시 전기에너지로 변환하는 방식이다. 대용량화 기술이 핵심기술로 분류되어 있다. 또 다른 기계적 전기에너지저장 방법은 압축공기를 이용한 에너지저장 방법이 있다. 여유전력으로 지하암반내 공기를 압축공기로 압축하고 전기가 필요할 시, 압축공기를 릴리즈하여 전기를 발생시키는 원리이다. 양수발전소와 마찬가지로 장소의 제약이 많이 있고, 완벽에 가까운 두꺼운 암반층이 있어야 하는 단점을 가지고 있다.

3. 고온초전도에너지저장장치의 특징



〈전기에너지 저장장치의 종류별 특징〉

전기에너지저장장치의 특징을 요소로 구분한다면, Unit당 에너지저장용량, 충방전속도, 충방전효율, 용량당 가격, 수명, 자연방전 등

으로 나눌 수 있다. 아래그림에서와 같이 비교분석하여 보면 고온초전도에너지저장장치는 가격부분을 제외하고는 아주 우수한 전력저장성능을 자랑한다. 특히, 충방전속도에 있어서는 다른 어떤 전기에너지 저장장치보다도 우수하며, 수명도 반영구적이고 효율도 아주 우수하다 하지만, 소규모 전기에너지 저장으로는 부적합하며 대용량 에너지저장 분야 및 순시부하변동 보상에 아주 유리한 장점을 가지고 있다. 화학적방법으로 전기에너지를 저장하는 장치들 특히, 2차전지의 경우는 수명이 짧다는 단점을 가지고 있다. 그나마 수명이 길다고 하는 리튬이온전지의 경우도 많은 수의 충전과 방전을 반복하게 되면 자연적으로 용량이 급격하게 떨어지는 성능저하 현상을 보이게 된다. EDLC도 내부적으로 보면 화학적 방법의 전기에너지 저장물질에 속하기 때문에 비교적 긴 수명이라 하지만, 큰 의미에서의 물리적 방법의 저장장치(SMES, CAES, Flywheel, 양수발전)에 비해서는 비교할 수 없을 만큼 짧은 수명이라 할 수 있다. 달리 표현하면 긴수명은 곧 대용량 에너지저장 분야에 아주 유리하다고 할 수 있다.

종합하여 보면 전기에너지 저장장치로서 SMES가 가장 좋은 선택인 것 같은데, 상용화에 있어 가장 중요한 가격부분에서 현재로서는 너무도 취약한 단점을 가지고 있다. 저자의 자체비교분석결과에 의하면 초전도 선이 kAm당 30\$정도에서 판매된다면 충분히 가격경쟁력을 확보할 수 있다고 정리되고 있는데, 현재로서는 100\$/kAm를 상회하고 있다. 아마도 2015년은 지나야 본격적으로 초전도 선의 가격이 하락할 것으로 예상된다.

4. 고온초전도에너지저장장치의 적용분야

SMES의 가장 큰 장점인 빠른 충방전속도로 어떠한 응용이 가능한지에 대해 논하여 보도록 하자. 아래표는 SMES를 제외하고 가장 충방전속도가 빠르다는 EDLC의 동일용량에서의 실제 제작된 제원을 중심으로 표현한 비교표이다. 표에서와 같이 순시전력 출력기능이 동일용량에서 최대 약 13배 이상 SMES가 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

〈동일용량 SMES 및 EDLC의 제원 특성 비교표〉

SMES Magnet (slightly modified)		
Manufactured	KERI	
Rated voltage	1,000	Volt
Reactance	16	H
ESR	0	Ohm
Rated current	250	A
Stored energy	500,000	J
di/dt	62.50	A/sec
Charge time	4.0	sec
Ins. peak power	250,000	watt
Ins. mean power	125,000	watt

EDLC (SuperCap)		
Company	Maxwell Technologies	
Rated voltage	125	Volt
Capacitance	63	F
ESR	0.0052	Ohm
Rated current	150	A
Stored energy	492,188	J
dv/dt	2.38	volt/sec
Charge time	52.5	sec
Ins. peak power	18,750	watt
Ins. mean power	9,375	watt

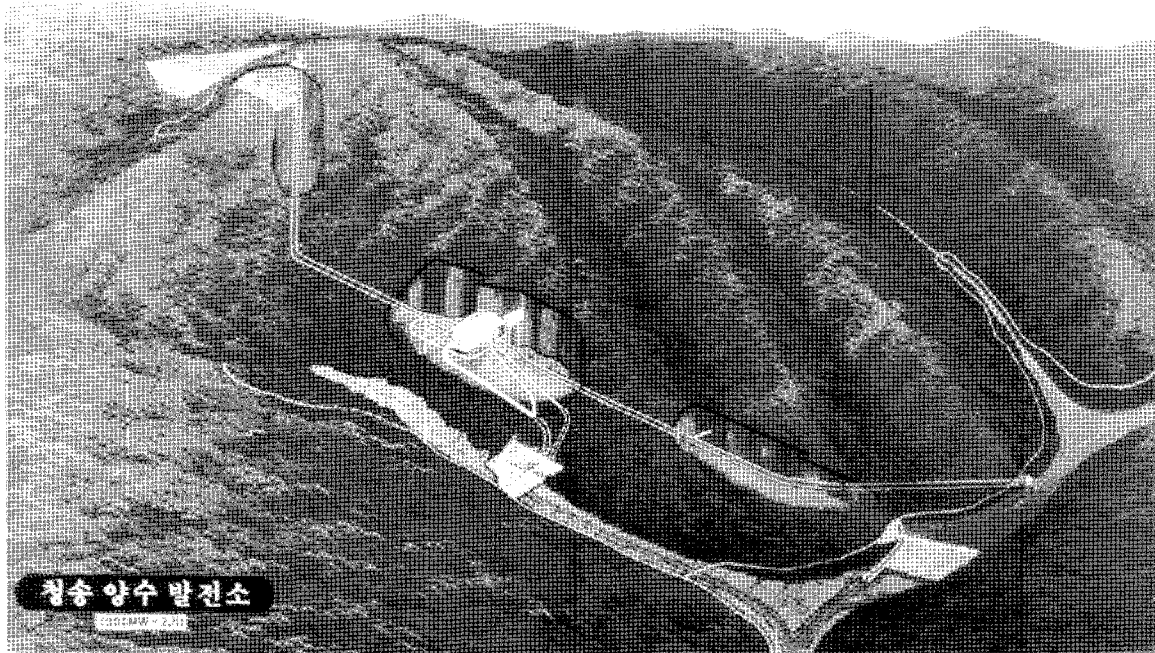
이와 같이 SMES는 무엇보다도 순시전력 보상으로서의 응용성이 시장성을 가진다고 본다. 적용분야로서는 전력품질에 아주 민감한 반도체 제조공장, 인텔리전트빌딩 등에서 그 수요가 있을 것으로 예상된다. 이때의 SMES의 용량은 “수MJ급”으로 기능을 다할 수 있을 것 같다.

좀 더 큰 규모의 응용분야는 분산전원시스템으로 인한 급격한 전력변동의 억제기능을 뽑을 수 있다. 최근 급격하게 늘어나고 있는 분산전원(태양광, 풍력 등)으로 인해 전력계통의 품질문제가 새롭게 대두되고 있다. 분산전원의 출력전력은 불행하게도 최대용량결정은

인간이 할 수 있지만, 실질적으로 출력되는 순시 출력값은 기상조건이 결정해 버린다. 이는 다시 말해 기상조건에 따라 전력품질이 직접적으로 영향을 받는다고 할 수 있다. 기상조건은 물리적으로 아주 빠른 시정수를 가지고 있고 특히, 태양광발전은 더욱 그러하다 여름철 적란운이 대규모 태양광단지 위를 지나가는 경우 일사량이 최대 100%에서 10%까지 순시적으로 감소한다. 만일 10MW 태양광단지라면 순시적으로 9MW의 전원이 사라지는 현상과 동일한 현상이 발생한다. 도서지역과 같은 독립적인 전원계통이라면 당연히 주파수가 심하게 흔들릴 것이고, 대규모 계통과 연결된 경우라도 전압이 갑자기 떨어지고 그 규모는 말단부하일수록 더 심각할 것이다. 이때 바로 순시전력보상이 가능한 SMES가 꼭 필요한 이유이다.

최근 유럽에서는 분산전원공급자에게 전력회사들이 GCC를 강요하고 있고, 현실화되고 있다. GCC는 Grid Connection Compatibility의 약자로서 계통연계친화성이라고 할 수 있다. “분산전원이 기존의 전력계통에 연결된 이후, 전력회사에서 고민해야 할 것들이 많이 생겼습니다. 분산전원이 너무 전력계통 변환에 민감하게 반응하여 갑자기 스스로 전력공급을 중단 한다거나, 기상조건에 너무도 민감하여 급격한 출력변동으로 전력계통 전력품질(주파수 및 전압)에 악영향을 미치는 일 들입니다. 이제 그런 문제는 분산전원공급자 스스로가 해결해 줘야 합니다.”라고 전력회사들은 이야기 하고 있다. 더욱 더 SMES의 중요성이 강조되는 구절이다. 이때 필요한 SMES의 용량은 “수십 MJ에서 백MJ”급이 적당한 용량으로 평가되고 있지만, 향후 수GJ급의 SMES가 필요한 초대규모 분산전원단지가 예상되기도 하는 상황이기도 하다.

수십GJ급 이상의 대규모 SMES의 적용분야는 로드레벨링(Load leveling)이다. 이는 잉여전력을 저장하였다가 필요시 사용하는 방식으로 현재는 양수발전소가 그 역할을 수행하고 있다. 아래그림은 청송양수발전소의 개념도인데, 현재 600MW(300MW x 2기)의 전력을 첨두부하시 생산하고 있다. 물론 모든 양수발전소가 그런 것은 아니지만, 최근에 운전은 오후 1시 이후에 1시간 정도 운전된다. 이를 에너지로 환산하면, 2,160GJ급이 된다. 1GJ



〈청송양수발전소 조감도, 600MW(300MW x 2기)〉

급 SMES 2,160대 규모이다. 이와 같이 SMES의 로드레벨링응용까지는 많은 시간과 노력이 필요할 것 같다. 물론 양수발전소는 더 이상 건설이 힘든 상황(예천양수발전소 건설 중)이지만, 10GJ의 SMES를 216대 분산 설치한다면 동일한 효과를 거둘 수 있다는 다소 황당한 주장도 가능해진다. 그런데, 양수발전소의 공사비용이 kWh당 100만원 수준이기 때문에 3.6MJ급이 100만원이다. 이는 얼마만큼 초전도 선의 가격을 낮추어야만 경쟁이 가능할까라는 의문을 생기게 만든다. 현재로서는 SMES의 로드레벨링은 불가능하다는 결론에 도달할 수 밖에 없다.

5. 맺음말

SMES가 전기에너지저장측면에서 아주 뛰어난 성능을 가진다고 생각할 수 있다. 그런데, 전기에너지저장측면이 아니라 저장하고 있는 전기에너지를 순시적으로 공급할 수 있는 능력이 탁월하다. Flywheel도 시간 당 최소 1%에서 최대 10%까지 저장에너지가 마찰에너지로 사라지지만, SMES도 마찬가지로 영구전류운전모드가 산업기술대학교 이희균 교수의 특허에서와 같이 물리적으로는 가능하

지만, 대용량 응용에서 본다면, 전력변환소자를 거치지 않고 폐회로를 구성할 수 없다는 단점이 있다. 이는 쉽게 환산이 가능한데, 평균 100A의 운전전류에서 단일 전력변환소자의 전압강하가 1V라면 순시 100W의 전력을 소비하게 되어 1MJ용량은 3시간 내에 모두 사라지고 만다는 결론에 도달한다.

결론적으로 SMES는 겨울철 김장김치와 같은 방식의 장기적 전기에너지저장방식이 아닌, 여름철 입맛 없을 때, 먹을 수 있는 배추겉절이 같은 방식의 순시에너지보상방식이 현재로서는 유용한 개발방향인 것 같다.

참고문헌

- [1] E.Spahie, G.Balzer, B.Hellmich, and W.Munch, "Wind energy storages possibilities," Proceedings of Power Tech Conference, Lausanne, Switzerland, July, 2007.
- [2] K.Y.C.Cheung, S.T.H.Cheung, R.G.Navin De Sillva, M.P.T.Juvonen, R.Singh, and J.J.Woo,"Large-scale energy storage system."
- [3] "Flow battery life cycle" Available online: <http://www.isa.org/intech>.

[4] Y.V.Makarov, B.Yang, J.G.DeSteele, S.Lu, C.H.Miller, P.Nyeng, J.Ma, D.J.Hammerstrom, and V.V.Viswanathan, "Wide-Area Energy Storage and Management System to Balance Intermittent Resources in the Bonneville Power Administration and California ISO Control Areas," Pacific Northwest National Laboratory, June 2008.

저자이력



박민원 (朴敏遠)
1970년 2월 12일생, 1995년
창원대학교 졸업(공학사), 1997
년 창원대학교 대학원 전기공
학과 졸업(공학석사), 2000년
일본오사카대학 대학원 전기
공학과 졸업 (공학석사),
2002년 동대학원 졸업(공학박
사), 2001년 10월 한국전기연
구원 내 차세대초전도응용기
술개발사업단 기술팀장, 2004년
9월 창원대학교 메카트로닉스
공학부 전기공학전공 전임강
사, 2006년 9월부터 동대학
조교수, 2004년 및 2007년 미
국 DOE Superconductivity
Peer Review 평가위원.