

초전도 에너지저장장치(SMES)의 해외 기술개발 동향

나 완 수*, 류 강 식**, 홍 계 원***

(*성균관대 전기공학과 교수, **한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 팀장,

***한국원자력연구소 초전도체연구실 실장)

초전도 에너지저장장치 (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) 는 전기에너지를 초전도 코일에 저장하였다가 필요할 때에 방출하여 사용하는 장치를 말한다. 이때 에너지의 저장은 초전도체의 무저항성(zero resistance feature)에 의해서 기본적으로 직류전류(DC current)의 형태(자장에너지의 형태)로 손실 없이 에너지를 저장할 수 있게 되므로 에너지를 고효율로 저장할 수 있게 된다. 저장되는 에너지의 양은 $E = 1/2 \cdot LI^2$ (L : 초전도마그네트 인덕턴스, I : 초전도마그네트에 흐르는 전류)로 쓸 수 있고, 전력변환기(power converter)를 통하여 전기에너지가(inductively stored energy) 충·방전된다. 지금까지 개발되어온 압축공기(compressed air), 양수발전(pumped hydro), 배터리(battery) 등을 이용한 에너지저장장치들은 전기에너지를 위치에너지, 화학에너지 등으로의 변환하여 저장하였다가 필요시에 역으로 전기에너지로 다시 변환하여 사용하여 왔다. 그러나 SMES에서는 에너지의 충방전이 모두 전기에너지의 형태로 이루어지기 때문에, 에너지 저장효율(round trip dispatch efficiency)이 95% (여타 에너지저장장치는 70-75% 정도)를 상회한다. 또 타 에너지로의 변환 과정이 필요하지 않기 때문에 충방전 응답 속도가 매우 빠르다. 즉 SMES는 원리적으로 전력을 충방전시키는 데에 한계가 없는 (essential independence of high-power delivery rate from its storage capacity) 등의 여러 가지 장점을 가지고 있다. SMES의 높은 에너지저장효율(high storage efficiency), 높은 전력용량(high power capacity) 그리고 mili-second 단위(보통 4 mili-seconds)로 응답할 수 있는 속응성(fast response time) 등으로 인하여 SMES는 여러 가지 다양한 용도에 사용이 가능한, 전력회사(utilities)가 오랫동안 회구해 왔던, 가장 이상적인 에너지저장장치로 알려져 있다. 용도로는 전력계통의 전압 및 주파수 안정화용도(stabilizing power system voltage and frequency)에서부터 대용량에너지 저장(large reservoir of megawatt-hours)까지 다양하다. 특히 SMES는 온도를 유지시켜 주는 펌프(cryogenic pump) 이외에 기계적으로 움직이는 부분이 없기 때문에 약 40년에 걸쳐서 수백만회의

충방전에도 성능의 저하가 없고 에너지의 손실은 전력변환기(power converter)에서 대부분이 소요되는 약 4% (현재의 기술로) 정도가 있게 된다.

SMES가 처음 개발되기 시작한 1970년대에서는 양수발전을 대신하는 역할, 즉 심야의 잉여전력을 저장했다가 한낮의 피크부하시에 전력을 방출하는 전력계통의 일부하보상용(diurnal compensation)으로의 SMES 개념설계 및 기술적 타당성 검토 등이 주된 연구의 대상이었는데 이 근래에 와서는 송전라인의 안정화 및 국지부하보상용 SMES의 개발 등으로 그 적용의 폭이 점차 확대되어지고 있다. 이와 같은 개념들은 초창기에 생각했던 것 보다 훨씬 작은 SMES를 보다 低價로 공급할 수 있는 기술이 개발되어져 왔기 때문이기도 하다. (초창기에는 scale-merit가 있기 때문에 대용량으로 갈수록 경제적으로 유리하다는 생각하에서 SMES는 대용량로 개발되어져야 한다고 생각하는 것이 지배적이었다.) 본 稿에서는 최근 초전도에너지저장장치의 연구개발의 방향이 상기와 같이 전환되고 있는 시점에서, 지금까지 해외에서의 연구개발에 대하여 정리하여 보고 또 최근의 연구개발동향에 대하여 미국의 경우를 위주로 하여 알아보도록 우리나라에서의 SMES 연구개발 방향설정에도 도움을 제공하고자 한다.

◎ 미국

초전도 에너지 저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage:SMES)에 대한 최초의 연구 논문은 1960년대 말기와 1970년대 초에 미국과 프랑스에서 발표되었다. (프랑스는 자국이 최초라고 주장하고 있다) 그 후 몇 개의 논문이 발표되었지만, 본격적으로 연구가 진행된 것은 1971년 미국 위스콘신대학의 R.W. Boom과 H.A. Peterson 교수팀에 의해서였으며, 그 후 위스콘신 대학과 [1, 2, 3, 4] 로스알라모스 과학연구소(LASL) 등에 의해서 연구가 계속 진행되었다[5]. 특히 위스콘신 대학에서 수행한 연구는 SMES 관련한 본격적인 연구 프로젝트 중에서 가장 처음에 시작하였고, 또 가장 긴 기간 동안 수행한 연구로서 1971년부터

터 1976 년까지만은 주로 초전도 에너지 저장 개념에 대한 경제적인 그리고 기술적인 실행가능성(economic and technical feasibility of the concept)에 대한 연구였으며, 1976년 이후에는 각 구성요소들에 대한 설계(component development and detailed design)의 연구를 수행하였다. 이 연구에 있어서 대상이 되었던 SMES의 용량은 일부하보상용(Diurnal storage)인 1,000-10,000 MWh이었으며, SMES를 구성하는 5 가지의 기본구성요소들(전기적인시스템, 구조물, 초전도케이블개발, 저온공학관련부분 및 암반공학관련부분)에 대한 세부설계 결과들을 보고하고 있다[3]. 1980년대에 위스콘신대학의 전력계통측 연구파트너 중의 하나였던 WEPCO(Wisconsin Electric Power Co.)는 전력계통의 부하곡선에서부터 일부하보상용 에너지 저장장치로서 5,000 MWh, 1000 MW 규모의 SMES 용량을 제안하였고[10], 그 뒤에 5 GWh, 1 GW 용량의 SMES의 설계연구가 미국과 일본에서 수행되었다 [4, 6, 8]. 이것의 결과 미국측은(EPRI and Wisconsin Univ.) 직경이 1000m, 높이가 20m인 대단히 납작한(Aspect ratio: 0.02) 1개의 초전도 코일로 구성된 SMES를, 일본측은(고에너지연구소:KEK) 직경이 400m, 높이가 각각 11-18m 인 3개의 초전도 코일로 구성된(Aspect ratio: 0.1) SMES 형태를 제안한바 있다.

위스콘신대학의 연구그룹 이외에도 1972년 로스알라모스 국립연구소(Los Alamos National Lab.: LANL)는 미국원자력위원회(US Atomic Energy Commission)로부터 SMES가 경제성이 있는지의 여부와, 있다면 개발프로그램(development program)을 제출해 달라는 의뢰를 받은바 있다. 그 당시의 초창기에서 수행한 평가에서도 SMES는 경제적이고 (cost-effective) 신뢰성이 있으며 (reliable) 부지선정에 어려움이 없다는 (easily sited) 등의 장점이 명백했고 또 요소 개발 수준이 대규모의 SMES 개발에 무리가 없다고 결론지었다.[9] 초기의 경제성 평가에서 SMES는 용량이 클수록 경제적으로 유리하다는 스케일메리트(scale merit)가 지적되었고, 따라서 일부하보상용등의 대규모 SMES 개발의 방향으로 연구방향이 진행되어 갔다. 반면에 보다 작은 규모의 SMES 적용가능성에 대한 연구의 일환으로 1976년 LANL 연구팀과 BPA(Bonneville Power Administration) 전력청은 소규모의 빠른 충방전특성을 갖는 SMES (small rapidly cycled energy storage unit)를 전력계통에 적용하는 것을 제안하였다[9, 16]. 당시 BPA에서는 태평양 북서부(Seattle)에서 남부캘리포니아(Los Angeles)으로의 AC 송전량이 1600MW를 넘으면 0.35Hz 정도의 주파수 불안정이 생긴다고 하는 문제점을 가지고 있었다. 이 문제는 병행하고 있었던 1400MW의 DC송전계통의 전력을 $\pm 1\%$ 조절하면 송전량 2000 MW까지는 주파수변동을 억제할 수 있다는 생각하에서부터 출발하여 DC송전용량의 가감없이 주파수의 안정을 얻기 위해서 30 MA, 10 MW규모의 소형 SMES를 DC 송전계통의 조정대신에 설계통에 투입하자는 계획이었다[16-19, 24]. 이 생각은 1980년대에 미국의 DOE(Department of Energy)의 자금제공으로 현실화하여 8kWh (30 MJ) 규모

의 SMES가 LANL 과 BPA에 의해 연구개발되었다. 장소는 Oregon 주 Portland 시에 위치한 Bonneville Power Administration의 Tacoma 변전소에 설치되었고, 설계통에 연계·운전되어 수 백만회의 충방전 시험이 실시되어, 시험결과 SMES의 전기적, 자기적, 구조적 성능을 모두 만족시켰다[17, 18, 19]. 그런데 그 후에 D.C. 송전라인의 전력제어를 추가로 덧붙임으로서, 30 MJ SMES의 필요성이 없어졌고 가동은 중단되었다. 만약 그때 SMES 이외에 대안이 없었으면 SMES는 지금까지 가동하고 있었을 것이라고 하고, 계산에 의하면 2년 정도의 가동으로 투자회수가 가능했으리라고 (reaching economic payoff)한다[9]. 林徽에 의하면, [24] 당시 30MJ SMES의 테스트를 일부 실시하였지만 때마침 오일쇼크가 발생하여 송전량이 감소하는 동시에 DC 송전계통의 증강공사 때문에 예산도 없어졌고, 또 때마침 냉각계통의 고장으로 테스트가 중지되었다고 다소 비판적으로 기술하고 있다.

한편 1980년에 LANL은 땅속 깊은 곳에서의 1 GWh 규모의 SMES(a deep 1 GWh SMES)를 설계했으며, 연구의 결론은 1 - 5 GWh의 규모의 SMES이면 경제적으로 경쟁력 있다는 것이었다. 1981년 EPRI (Electric Power Research Institute)는 Bechtel에 기술의 검토를 의뢰했고 그것의 결론은 SMES가 지표면에 보다 가깝게 건설되는 것이 더 경제적이라는 것 이외에는 LANL의 연구결과와 같았다. 그 후 몇 개년에 걸쳐서 EPRI와 DOE는 Bechtel사에 설계를 향상시키는 지원을 계속하였다. 이때까지 DOE, EPRI 및 WEURF (Wisconsin Electric Utilities Research Foundation)등지에서 SMES 연구에 소요한 연구자금은 약 1500 만불 (\$15M)이었다[22]. 이러한 연구의 말기 즈음에 SMES가 고�출력, 펄스전원(High power, repetitive pulsed energy source)을 필요로 하는 레이저(GBFEL: Ground Based Free Electron Laser)등의 군사용 전원장치로의 응용에 적절하다는 결론이 나왔다. 즉 SMES의 전력계통으로의 응용과 매우 유사하게 이 분야로의 응용에도 많은 유사한 장점이 있다고 도출이 된 것이다. 이에 따라서 1987년 EPRI는 SDIO(Strategic Defense Initiative Organization)와 함께 SMES의 다음 단계의 연구로서 20 MWh급 규모의(직경: 약 100m) ETM (Engineering Test Model)의 개발을 추진하는 프로그램을 시작하였다. (실제로는 EPRI 독자적으로 1986년에 이미 5-6년에 걸친 ETM 개발계획을 가지고 있었으며 개발자금을 찾고 있는 중이었다) 따라서 ETM은 400 - 1000 MW의 전력을 100초 동안, 그리고 10-20 MW의 전력을 2, 3시간 공급할 수 있는 2중용도의 사양을 만족시켜야 함을 요구했으며[22], 전자는 SDI용 전원용을, 후자는 전력계통으로의 응용을 위한 사양이었다. ETM 개발 프로그램은 1987년 6월에 SDIO를 대신한 DNA(Defense Nuclear Agency)에 의하여 받기되었으며[9], 그것에 따라서 Bechtel팀과 Ebasco팀 등의 2개의 개발팀이 구성되었다. 2단계(2 phases)로 구성되어 있는 이 개발 프로그램의 첫단계(1st phase)에서는 두 팀이 초전도체의 설계 등의 기술적인 접근방식을 달리하여[11-15] 서로 독립적으로 경쟁하면서(horse race phase) 개념설계 및 요소

기술연구등을 추진하게 되어 있었으며 계획 추진당시에는 약 4년의 개발기간과 총 1억 5000만불 (\$150M: DOD \$145M, EPRI \$6M)의 개발비용이 소요되리라고 예상되었다[9, 24]. Bechtel팀은 Bechtel사가 개발을 총괄하며 개발협력업체로서(subcontractors to Bechtel) General Dynamics, General Atomics, General Electric, Pitt-Des Moines, Cryogenic Consultants Inc. 그리고 이탈리아의 Ansaldo사등이 참여했고, GD의 협력업체로서는(subcontractors to GD) Inter-magnetics General, Texas Accelerator Center, Oxford Superconducting Technology 등이 참여했다[11]. Ebasco팀에는 위스콘신대학, Westinghouse, CBI, Teledyne Wah-Chang, Madison Gas & Electric, El Paso Electric. 등이 참여해서 연구를 진행시켰다[10, 24, 57]. 최종적인 ETM의 기본사양으로는 20MWh, 400MW (전력계통용: 10MW-2hours 20MWh, SDI 전원용: 400MW-100seconds 11.1MWh)가 선택되었다[11, 24]. 이와 같이 시작한 연구개발계획이 1980년대 말과 1990년대 초에 SDI계획이 취소되면서부터 ETM 계획이 수정되기 시작하였고 따라서 개발일정등이 계획대로 진척되지 못하게 되면서 연구개발자금의 획득도 어려워졌다. 1980년대 말에는 SDIO가 ETM 계획에서 빠져나갔으며[36], 그 뒤부터는 DNA에서 프로젝트를 관리하기 시작했으며, 이러한 일련의 과정속에서 일정이 지연되어 왔다. 이러한 지연에 따라서 Phase 1의 개념설계 및 요소기술연구등은 1993년까지 (1993년분 예산 3000 만불 [25,57]) 연구가 계속되어 결과가 발표되어 왔으며, [10, 26-35] ETM과 관련해서 해결해야 할 문제점들로는 도체설계, 전류도입선등의 문제가 제기되었고, [58] ETM이 설치될 장소로는 5개의 부지가 Phase 1의 결과로서 제시되었다[59]. ETM 계획은 Phase 1이 끝나는 시점에서 ETM의 건설이 포함되어 있는 Phase 2의 진행여부를 판단하게 되어 있었다. ETM의 건설은 그것의 이름에서도 알 수 있듯이 기술실증의 모델이고, 그것이 건설되면 SMES의 기술적 과제가 거의 해결되며 건설후 적어도 2-3년간은 상용운전에 가까운 형태의 시험이 되기 때문에 경제적인 문제에 대하여도 지침을 제공할 수 있을 것이라고 생각되어 왔다[24, 25]. 그런데 1994년 2월에 클린턴 행정부는 의회에 의해 계상된 ETM 프로그램의 차기년도 예산 1000 만불(\$10M)의 폐지를 요청하였고 의회가 이것을 통과시키고 클린턴 대통령이 최후에 결재하면서 ETM 프로그램은 중단되게 되었다[37]. 이러한 결과가 나오기까지는 많은 진통을 거쳤으며[38], 그 중에서도 아마도 가장 큰 요인은 ETM 관련 소요예산비용이 초기의 1억 3000 만불 (\$130M : 이중에서 약 1/3 은 약 150명에게 일자리를 제공하는 한편 지역경제로 회수될 것으로 예측되었음)에서 최대로 4억 2천 700만불 (\$280M - \$430M)로 크게 올랐다는 것이다[39]. SMES의 DNA 축 프로그램 매니저였던 Captain David Jacobs는 비용상승에 대하여, 소요비용이 2-3% 증가하면 이마가 찌푸러지고 (raise eyebrows) 5%의 증가에는 프로그램 매니저가 해고당하며 10%의 증가에는 프로그램 자체가 없어진다고 (killed) 비용상승에 대한 강한

불만을 표시했다[39]. 또 다른 요인으로는 ETM의 경우에 Bechtel과 Ebasco 그룹의 경쟁등, SMES 연구에 관련하여 전체연구의 흐름을 대표하는 목소리가 없었으며[40], SMES는 전력회사측에 가장 큰 이익을 주는 반면에 전력회사 자체의 지원이 미미했다는 등의 이유를 들 수 있다[41]. 더욱이 ETM이 실제적으로 SMES의 개발에 큰 도움을 주지 못할 수도 있다는 견해도 등장하였다[41]. 어쨌든 1993년 11월에 ETM 프로그램이 DOD(DNA)에서 DOE로 넘어갔고, DOE에서 ETM을 관장하게 된 EE&RE (Energy Efficiency and Renewable Energy)에서 ETM을 수행할 만한 예산 확보가 어렵다는 관측에서부터 ETM 프로그램의 중단은 예상되고 있었다[42]. ETM 계획은 연구자금을 얻는 데에 실패한 반면, 클린턴행정부는 초전도 관련 프로젝트(superconductivity-oriented projects)에 연구자금을 제공하는 TRP(Technology Reinvestment Program) 및 ATP(Advanced technology Program)에 각각 6억 2500만불 (\$625M)과 4억 5100만불 (\$451M)을 지원함으로써 연구비를 대폭 상향 조정했다[37]. TRP와 ATP는 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor), RHIC(Relativistic Heavy Ion Collider), CEBAF와 같은 대형 초전도 마그네트를 이용하여 연구를 진행시키는 프로젝트들에 연구자금을 제공하고 있다[37].

BPA의 Tacoma 변전소에 설치된 소형의 30MJ SMES를 제외하고는, 지금까지 언급한 대형 SMES의 개발은 SMES 자체의 탁월한 성능은 인정을 받아서 개발 자체는 계속 추진은 되어 왔고 또 현재 진행 중이지만, 극저온을 필요로 한다는 점등의 약점 때문에 소요되는 예산 규모가 방대하여 대규모 SMES 개발 완성이라는 가시적인 결과는 지금까지 이루어지고 있지 않다. 이와는 별도로 그 동안 꾸준히 발달하여 온 지온공학과 기계, 재료공학의 발달에 힘입어서 최근에는 마이크로규모 (수 MJ- 수 MW)의 SMES(SSD: Superconducting magnetic energy Storage Device)가 미국의 Superconductivity Inc.에 의해서 상용화되었으며 IBM 등지에 설치되어 그것의 성능을 인정받고 있으며 수주량이 계속 늘어가고 있다[19, 20, 21]. 이것은 1MJ - 1MW 규모의 초전도에너지 저장장치로서, 전압변동에 극히 민감한 부하의 전원장치 역할을 수행하며 트레일러 1대에 모든 장치가 설치될 수 있다(батери저장장 경우는 3대의 트레일러가 필요함)[19, 20, 21]. 현재 산업계 특히 방위산업계에서의 제어장치는 디지털화가 거의 완성되고 있는 추세이고 이 디지털화된 제어장치의 오동작 및 셋다운을 방지하기 위한 장치로서의 micro-SMES 역할이 부각되고 있다. 최근에 Superconductivity Inc.는 DNA에 의해서 자금지원을 받고 미공군(the Air Force)에 의해서 관리를 받는 (주관리는 SAIC : Science Application International Corp.에서 행함.) 860 만불 (\$8.6M) 규모의 프로젝트를 수주하였다[43]. 이것은 5개의 SSD를 제작하고 설치하는 것이 주요 골자인데, ETM 계획을 비롯 하였던 DNA가 자금을 지원하는 것이 이색적이다. 미공군에서는 SSD의 효능이 입증되면, 더 많은 SSD를 구매할 것이라고 말하고 있으며, GD와 Westinghouse 등도 SSD를

제작할 의사표시를 하고 있다[43].

위와 같은 흐름하에서 미국은 현재 대형 및 중형의 SMES 보다는 마이크로 규모의 SMES에 보다 관심을 가지게 된 것처럼 보이며, 실제로는 대규모 SMES와 소규모 SMES의 경제성 및 개발순위는 현재 지금까지 계속되어 온 상태이다[44]. 1993년 워싱턴에서 열린 SMES UIG 그룹의 미팅에서는 최근 일본의 SMES 기술수준이 미국과 같거나 우위를 점한 것 같다는 견해가 보고되었으며, SMES 기술이 미국에서 받아들여진 (created) 기술을 미국이 다시 되사야 했던 VCR이나 트랜지스터 기술과 같이 될 수 있다는 우려가 표시된 바 있었다[45]. 이와 같은 맥락하에서 마이크로 SMES 지지자들은 일본이 취하고 있는 것 같이 SMES의 개발이 소형에서부터 점점 대형쪽으로 가야 한다고 믿고 있으며, 최근에 발표된 DNA와 DOE에서 지원한 연구결과는 SMES는 대형으로 갈수록 배터리 저장이나 연료전지등에 비하여 경제적인 관점에서 오히려 불리하다는 기존의 통념을 뒤엎는 연구결과를 내놓았다[46]. 이 보고서는 SMES를 전력계통 안정화응용에 있어서 가장 유망한 장치로 꼽았으며 이것을 상용화할 경우 500 MW, 500MW-sec 규모의 SMES가 1년에 5-10개 정도의 시장성이 있는 것으로 보고한바 있다[46].

지금까지 언급한 현황 이외에도, BART(Bay Area Rapid Transit)는 Pacific Gas & Electric, 그리고 EPRI와의 콘서시움의 형태로 San Francisco와 Oakland사이의 터널에 기차가 통과할 때 생기는 전압변동(voltage sagging)을 제거하기 위해서 8MJ의 SMES를 설치할 것을 검토하고 있다[47]. 가장 최근에는 San Diego Gas and Electric사와 Bechtel 그룹이 송전라인의 능력을 증가시키기 위하여 SMES의 개발을 계획하고 있으며[48], DOD의 TRP에서는 Babcock & Wilcox사와 연계한 Anchorage Power and Light사에 중규모의 SMES(mid-SMES) 개발에 1995년까지 550만불, 1996-1998년까지 1950만불의 지원을 계획하고 있다[48].

상기에서 기술한 모든 현황들은 냉매(coolant)로서 액체헬륨(비등점: 4.2K)을 요구하는 LTS(Low Tc Superconductors)로서 SMES를 설계·제작하는 것을 기본으로 하고 있다. 최근에는 HTS(High Tc Superconductors)를 이용하여 SMES를 제작했을 때 경제적으로 얼마나 이득이 될 수 있는지의 계산한 논문들이 계속 발표되고 있다[49-52]. 기본적으로 HTS를 이용하면 액체질소(비등점: 77K)를 냉매로 사용하기 때문에 냉각비용이 절감될 수 있는 것은 기정사실이다. 이들의 보고에 의하면 HTS를 이용할 경우 SMES의 크기가 작을수록 냉각비용이 상대적으로 많이 절감되며, SMES의 크기가 클수록 냉각비용에 의한 경제적인 이득은 상대적으로 줄어든다고 보고하고 있다[50]. 전반적으로 냉각부분의 이득은 기존의 경우에 비하여 60-90% 정도를 줄일 수 있으며[50], Micro SMES의 경우에는 냉각비용을 수%까지 줄일 수도 있다고 한다[52]. 그러나 현재의 HTS의 가격이 LTS의 경우보다 수 배 비싸기 때문에 (many more times expensive, HTS는 일반적으로 은을 안정화재료로 사용한다.), HTS SMES가 LTS SMES에 비교하여 가격 경

쟁력이 있으려면 현재의 HTS 가격이 많은 폭으로 저하되거나, HTS의 임계전류밀도를 높여야 하는 것이 필요하다고 지적하였으며, 그 밖에 (사실은 가장 근본적인 문제인) HTS 물질이 극세다심선재화가 되어야 하며, 기계적으로 지지하는 cold structure의 양(비용부담)을 줄이기 위하여 HTS 물질의 인장응력의 향상이 요구된다고 결론을 맺었다[51]. LANL의 Fred Muller 박사는 현재 그들의 기술로 HTS SMES 프로토타입을 제작할 수 있다고 주장하기도 하였다[53]. 그러나 HTS 물질은 취성(Brittleness)이 강하고 장척의 선재(long lengths of superconducting wire)를 제작하기 어렵다는 2개의 치명적인 약점을 가지고 있다[54]. 또, 장척의 선재가 제작이 된다고 해도 SMES 처럼 강한 기계적인 힘을 받으면서 오랜 기간 동안 빈번하게 변화하는 스트레스에 견뎌야 하는 경우에는 심각한 문제를 야기시킨다[54]. 현재의 일반적인 의견으로는 HTS 물질이 너무 비싸고 (ridiculously expensive) 선재특성이 좋지 않기 때문에 현재의 HTS 물질은 SMES 코일 자체에는 적당하지 않다는 생각이 지배적이다[55]. 그리고 상기한 모든 약점에도 불구하고 HTS SMES를 채용하더라도 비용(capital cost)은 약 10% 정도만 절감된다는 Bechtel의 연구결과도 있다[54]. 이러한 맥락하에 현재까지는 SMES 코일 자체를 고온초전도체화하는 것보다는 전류도입선(Current lead)을 고온초전도체화하는 연구가 활발하게 진행 중이며, GE에서는 고온초전도 리드(BSCCO 2212)를 부착한 1MJ SMES 프로토타입을 제작한바 있다[56].

◎ 일 본

일본에서는 1969년 구주대학에서 SMES의 이론 연구가 시작되어 1975년경에는 고에너지 물리학연구소, 전자기술총합연구소 등에서 실험연구가 시작되었다. 현재까지 전력중앙연구소, 구주대학, 오사카대학, 중부전력, 동북전력, 관서전력 등지에서 소규모 초전도에너지저장장치 시험, 전력계통연계특성 도출 및 대규모 초전도 에너지저장장치 개념설계 및 평가 등을 수행하여 왔으며, 그후 ISTEC (International Superconductivity Technology Center)에서 전력계통적용가능성을 검토한 결과 분산 배치형 다용도 SMES의 적용성이 가장 높은 것으로 평가되어 중소규모 SMES의 응용연구가 진행되고 있다. 특히 일본에서는 1986년부터 초전도 에너지저장장치화회가 구성되어 활발히 연구를 진행시키고 있다.

◎ 프랑스

프랑스의 GEC ALSTHOM사는 유레카 프로그램에 근거한 SMES의 검토를 행하였다. 이것은 20MJ, 10MAV의 것으로서 화력발전소와 병행하여 설립하는 배치도까지 행하였지만 경제적인 이유로부터 중단하고 있다. 또, 1988년에는 AIR LIQUIDE와 GEOSTOCK이 공동으로 SMES의 연구, 개발하여서 개념설계를 정리하였다. 20MJ의 계통안정용으로 RASC라고 부르고 있고, 직경 25m의 솔레노이드코일을 지하에 설치한 것이다. 당초에는 7500만불을 상정하였지만 최종적으로는 2억불이 소요할 것으로 예상하고 있다. 이

것도 마찬가지로 경제적인 이유로 중단하고 있다. 또 동사에서는 누설자속이 없도록한 계통안정용 시스템으로서 토로이드형 코일을 여러개 늘어놓아 속에 22 MJ, 10 MVA의 시스템을 연구하고 있다[24].

프랑스의 Edf에서는 1994년 현재 5명의 팀이 SMES를 검토하고 있다. 용도로서는 원자력발전소의 비상용 디젤발전기가 정상상태로 돌아오기 전에 사용하는 것을 검토하고 있다[24].

◎ 캐나다

캐나다의 몬트리얼시의 중심에 위치하고 있는 HYDRO-QUEBEC사는 시에서 약 1000 km 떨어진 10,000, 7000, 6000 MW급 3개의 수력발전소군을 735KV의 송전선에 연결한 계통을 갖고 있고, 또 DC 계통도 2600, 2000 MW의 2개를 보유하고 있다. 1996년도경에 수력발전소 증설계획에 있어서 송전라인의 계통안정화를 검토할 예정으로 되어 있다. 이 검토에는 프랑스의 GEC ALSTHOM사의 연구가 도움이 되리라고 생각되어 양국의 공동연구가 1990 년에 시작되었다. HYDRO-QUEBEC사의 해석결과, SMES를 사용하면 전력진동과 전압변동을 저감할 수 있는 것이 분명하게 되었다. 그 결과로부터 동사내의 하여 기본사양으로서 300 MJ, 350MVA, 5000A, 6.8 T의 SMES가 제시되었으며 가격대 성능비에 대한 공동연구를 행하였다. 도체사양은 러더포드형태의 (Ruherford type) 6280A, 6.8T, 4.2K 이다. 코일형태는 토로이달형의 토러스를 9층 적층하였으며 외경 3.35 m의 토러스가 외경 1.01 m의 코일 20개로 구성되며 전체 높이는 9.5m, 외경 3.35m, 중량은 19.6 톤이다. 시스템가격은 3000 만불로 견적되어 있지만 경제적인 문제로 1년 지연된 공정으로 되어 있다. 또, 화력증설계획은 환경단체의 반대로 중단된 상태이다[24].

◎ 독일

독일에서의 SMES 연구개발은 현재 그렇게 활발하게 움직이고 있지는 않지만, 1991년 KfK에 있어서 제1회 SMES Workshop이 개최된바 있고 참석자에 의하면 소형 SMES에 대한 화제가 많이 나왔다고 한다. KfK에서는 태양광 발전에 연계한 수 kJ 의 것을 연구하고 있지만 근접한 전력회사의 부하율의 문제에 있어서 별로 곤란을 느끼고 있지 않기 때문에 일반적으로 SMES의 관심이 옅다고 할 수 있다[24]. 뮌헨공대에서는 장시간 충방전용 NaS 전지와 단시간 충방전용의 SMES를 조합시켜 각각의 장점을 이용하는 시스템의 연구가 진행되고 있다. 최근에는 6개의 초전도코일을 토러스(torus) 모양으로 배치시키고 전체 저장에너지가 1.4MJ가되는 빠른 충방전특성의 소형 SMES를 개발하고 있다[60, 61, 62].

◎ 스위스

PSI-ABB에서는 50kWh, 1.2MW의 공동프로젝트가 1 MWh급 SMES의 개발을 전제로 하여 진행 중이다[24].

참 고 문 헌

- [1] R.W.Boom, B.C.Haimson, G.E.McIntosh, "Superconductive energy storage for large systems",IEEE Transactions on Magnetics, MAG-11, No.2, March 1975
- [2] R.W.Boom, *et al.*, "Magnet design for superconductive energy storage for electric utility systems", EFC Session on Superflywheels and Superconductive Storage, Asilomar, California, February 8-13, 1976
- [3] R.W.Boom, and S.W.Van Sciver, "Superconductive magnetic energy storage", Energy Vol.4, pp.217-223, Pergamon Press Ltd., 1979
- [4] R.W.Boom, J.J.Skiles, R.F.Bischke, and D.J.Helfrecht, "Superconductive energy storage for electric utility load-leveling", American Power Conference, April, 1984
- [5] John D.Rogers,"Magnetic energy storage" ,IEEE Tansactions on Magnetics, MAG-17, No.1, January 1981
- [6] D.J.Helfrecht, W.W.Bratley, R.W.Boom and M.Abdelsalam, "Operational benefits of superconducting magnetic energy storage evaluated for a specific 1982 load demand curve", International Symposium and Workshop on Dynamic Benefits of Energy Storage Plant Operations, Boston, Massachusetts, May 7-11, 1984
- [7] L.A.Rodriguez, H.D.Limmer, R.F.Bischke, R.W.Boom, and J.J.Skiles, "Comparison of energy storage plants in generation system expansion", International Symposium and Workshop on Dynamic Benefits of Energy Storage Plant Operations, Boston, Massachusetts, May 7-11, 1984
- [8] M.Masuda and T.Shintomi, "Conceptual design of 5GWh SMES", MT-9, September 9-13, Zurich, Switzerland, 1985
- [9] W. Hassenzahl, "Suaperconducting magnetic energy storage",IEEE Tansactions on Magnetics, Vol.25, No.2, March 1989
- [10] R.W.Boom, "The UW-SMES design", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993
- [11] R.J.Loyd, T.E.Walsh, E.R.Kimmy, B.E.Dick, "An overvire of the SMES ETM program: The Bechtel team's perspective", Transactions on Magnetics, Vol.23, No.2, March 1989
- [12] C.A.Luongo, R.J.Loyd, C.L.Chang, "Current diffusion effects on the performance of large monolithic conductors", Transactions on Magnetics, Vol.23, No.2, March 1989
- [13] H.Gurol, L.Motowidlo, C.Luongo, "AC losees in the

- SMES conductor and coil structure", Transactions on Magnetics, Vol.23, No.2, March 1989
- [14] D.L.Walker, F.M.Kimball, E.R.Kimmy, S.D.Peck, H.H.Van den Bergh, R.J.Loyd, C.J.Luongo, "SMES conductor design", Transactions on Magnetics, Vol.23, No.2, March 1989
- [15] C.J.Luongo, R.J.Loyd, F.K.Chen, S.D.Peck, "Thermal-hydraulic simulation of helium expulsion from a cable-in-conduit conductor", Transactions on Magnetics, Vol.23, No.2, March 1989
- [16] R.L.Cresap, J.F.Hauer, "Power system stability using superconducting magnetic energy storage - dynamic characteristics of the BPA system", Proceedings of the 1978 Mechanical and magnetic energy storage contractors' Review Meeting, 1978
- [17] J.D.Rogers, *et al.* "Superconducting magnetic energy storage for BPA transmission line stabilization", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.MAG-19, No.3, 1983
- [18] H.J.Boening, J.F.Hauer, "Commissioning tests of the Bonneville Power Administration 30MJ superconducting magnetic energy storage unit", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.MAG-19, No.3, 1983
- [19] Carel DeWinkel, Jeffrey D.Lamoree, "Storing power for critical loads", IEEE Spectrum, June 1993
- [20] W.E.Buckles, M.A.Daugherty, B.R.Weber and E.L.Kostecki, "The SSD: A commercial application of magnetic energy storage", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993
- [22] M.A.Daugherty, W.E.Buckles, G.A.Knudtson, D.L.Mann, P.W.Stephenson, "SSD operating experience", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993
- [22] Robert B. Schainker, "Annual review: Exploratory research program SMES", Presented to EPRI top management and RAC scientific advisory committee, June, 1987
- [23] Richard L.Verga, "Superconducting Magnetic Energy Storage and other Large-scale SDI Cryogenic Application Programs", Advances in Cryogenic Engineering, Vol.35A. Plenum, New York, pp 555-564
- [24] 林徴, "海外の SMES 연구 개발", 第 6회 초전도 전력 저장 연구 발표회, 1991년
- [25] 新富孝和, "超電導 에너지-電力 저장", Kawagana Academy Lecture note, 1993
- [26] X.Huang, "Low bending rippled structure design and frictional energy disturbance analysis for superconductive magnetic energy storage", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, March 1991
- [27] Y.M.Eyssa, "Conductors and vessel losses in bath cooled SMES systems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, March 1991
- [28] X.Huang, Y.M.Eyssa, "Stability of large composite conductors", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, March 1991
- [29] S.M.Schoening, W.R.Meier, "A comparison of large-scale toroidal and solenoidal SMES system", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, March 1991
- [30] R.L.Kustom, J.J.Skiles, J.Wang, K.Klontz, T.Ise, K.Ko, F.Vong, "Research on power conditioning system for SMES", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, March 1991
- [31] M.K.Abdelsalam, Y.M.Eyssa, "Quench protection for 21 MWh ETM coil", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, March 1991
- [32] C.A.Luongo, R.J.Loyd, S.D.Peck, "SMES conductor selection: An engineering perspective", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993
- [33] J.W.Lue, L.Dresner, S.W.Schwenterly, C.T.Wilson, M.S.Lubell, "Investigating thermal hydraulic quenchback in a cable-in-conduit superconductors", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993
- [34] X.Huang, "New conductor design for superconductive magnetic energy storage", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993
- [35] X.Huang, Y.M.Eyssa, R.W.Boom, "Vertically rippled flat coil configuration for SMES", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993
- [36] Superconductor Week, May 24, 1993
- [37] Superconductor Week, February 14, 1994
Superconductor Week, February 21, 1994
- [38] Superconductor Week, April 5, 1993
Superconductor Week, April 12, 1993
Superconductor Week, May 17, 1993
Superconductor Week, June 14, 1993
Superconductor Week, July 19, 1993
Superconductor Week, August 16, 1993
Superconductor Week, August 23, 1993
Superconductor Week, October 11, 1993
Superconductor Week, October 18, 1993
Superconductor Week, November 15, 1993
Superconductor Week, November 22, 1993
- [39] Superconductor Week, April 5, 1993
Superconductor Week, June 14, 1993
Superconductor Week, November 15, 1993
- [40] Superconductor Week, February 14, 1994
- [41] Superconductor Week, May 17, 1993

Superconductor Week, June 14, 1993

[42] Superconductor Week, November 15, 1993
Superconductor Week, June 14, 1993

[43] Superconductor Week, February 7, 1994
Superconductor Week, February 14, 1994
Superconductor Week, April 11, 1994

[44] Superconductor Week, April 5, 1993
Superconductor Week, April 19, 1993
Superconductor Week, February 14, 1994

[46] Superconductor Week, July 18, 1994

[47] Superconductor Week, February 8, 1993

[48] Superconductor Week, July 11, 1993

[49] J.T.Eriksson, J.Korpjarvi, "Economic potential of applying HiTc superconductors to Magnetic energy storage", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.25, No.2, March 1989

[50] S.M.Schoenung, W.R.Meier, "Design, performance and cost characteristics of high temperature superconducting magnetic energy storage", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.8, No.1, March 1993

[51] S.M.Schoenung, W.R.Meier, J.R.Hull, R.L.Fagaly, M.Heiberger, R.B.Stephens, "Design aspects of mid-size SMES using high temperature superconductors", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993

[52] S.M.Schoenung, W.R.Meier, T.C.Bickel, "Cost savings and prospects for application of micro superconducting magnetic energy storage using high temperature superconductors", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993

[53] Superconductor Week, January 18, 1993

[54] Superconductor Week, November 22, 1993

[55] Superconductor Week, May 17, 1993
Superconductor Week, August 23, 1993

[56] Superconductor Week, March 8, 1993

[57] "New Applications for SMES", A Special Report from Superconductor Week, 1992

[58] SMES ETM technology issues identified at early stage: conductor design, cold-to-warm conductor design, structural integrity, coil protection, fabrication and cost. See [57]

[59] Selected five potential sites to house a SMES ETM facility as part of phase I effort are Baraboo, Wisconsin; Orogrande, New Mexico; White Sands Missile Range, New Mexico; Monahans, Texas; and Richland, Washington

[60] P.J.Birkner, U.Brammer, H.W.Lorenzen, J.F.Kärner,

W.Rehm, J.Schaller, R.Schottler, "Testing plant with small fast superconducting energy storage at TU München", IEEE Transactions on Applied superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993

[61] J.F.Kärner, A.Nitsche, "Field coil protection for a SMES-supported all-purpose compensator", IEEE Transactions on Applied superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993

[62] P.J.Birkner, "On the design of superconducting magnetic energy storage system", IEEE Transactions on Applied superconductivity, Vol.3, No.1, March 1993

Abbreviations

ARPA: Advanced Research Projects Agency
ATP: Advanced technology Program
BART: Bay Area Rapid Transit
BMDO: Ballistic Missile Defense Organization
CRS: Congressional Research Service
CSAC: Council on Superconductivity for American Competitiveness
DNA: Defense Nuclear Agency
DOE: Department of Energy
DOD: Department of Defense
EE&RE: Energy Efficiency and Renewable Energy (one of DOE's offices)
ETM: Engineerig Test Model
IGC: Intermagnetics General Corporation
MGE: Madison Gas and Electric
NHFML: National High Magnetic Field Lab.
NIST-Boulder: National Institute of Standards and Technology-Boulder
NSP: Northern States Power-Wisc.
SAIC: Science Applications International Corp.
SDI: Strategic Defense Initiative
SDIO: Strategic Defense Initiative Organization, 1993년 5월 현재 BMDO로 개칭 예정.
SMES UIG: SMES Utility Interest Group
SSD: Superconducting magnetic energy Storage Device
STI: Superconductor Technologies Inc.
TAG: Pentagon's Technology Assessment Group
TRP: Technology Reinvestment Program
UW: University of Wisconsin-Madison
WEPCO: Wisconsin Electric Power Co.
WEURF: Wisconsin Electric Utilities Research Foundation
WPL: Wisconsin Power and Light
WPS: Wisconsin Public Service

저 자 소 개



나완수(羅浣洙)

1962년 6월 14일생. 1984년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년 7월-93년 2월 미국 Superconducting Super Collider Lab, Guest Collaborator. 1991년 7월-95년 1월 한국전기연구소 초전도연구실 선임연구원. 1995년 3월-현재 성균관대 공대 전기공학과 조교수.



류강식(柳康植)

1958년 8월 5일생. 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한국전기연구소 초전도응용 연구사업팀 팀장.



홍계원(洪啓源)

1978년 서울대학교 요업공학과 졸업. 1980년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(석사). 1983년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(박사). 1983년~현재 한국원자력연구소 초전도체연구실 실장.