

초전도재료의 전력계통의 응용

人類社會 발전의 획기적 轉期



李承院
(서울대 工大교수·電氣工學)

◇ 초전도현상과 그 관련기술

과학기술 발달중 전기기술의 발달은 많은 부분을 차지한다. 특히 최근에 있어서의 전기기술은 반도체의 출현으로 인하여 눈부신 발전을 이룩하고 있다. 그러나 이 기술은 전기기술이라기 보다는 광학에 기인하는 부분이 많으며 전자계산기도 컴퓨터과학에 기인하는 발전이라고 볼 수 있는 반면 초전도 기술은 전기의 근본원리적인 신기술로서 전기기술발전에 혁신적인 도움을 줄 것으로 생각된다.

초전도체는 4가지 특징을 가지고 있다. ① 전기저항이 없다. ② 대전류를 흘릴 수 있다(동선의 10⁴배) ③ 강자계의 자석을 만들 수 있다(20T 이상) ④ 영구전류를 흘릴 수 있다(10만년이상).

성에너지의 관점에서 볼 때 전기기기를 초전도체로 제작할 경우 저항에 의한 발열을 없게 할 수 있으며 대전류를 흘릴 수 있다는 특징은 기계를 아주 작게 만들 수 있다는 것이다. 대전류를 흘릴 수 있다는 것은 도체의 단면을 작게 할 수 있을 뿐만 아니라 기계의 구성요소인 자석에 철심을 쓰지 않아도 된다는 것을 의미하므로 경량화를 이룰 수 있게 한다.

다음에 초전도의 영구전류의 특징은 신비하여 이해하기 어려운 성질이다. 상전도코일에 전압을 가해서 전류를 흘리다가 전원과 분리시켜 보면 그 전류는 대체적으로 1/10초 이내로 사라져 버리는데 반하여 초전도체로 만든 코일에서는 거의 영구적으로 전류가 흐른다. 이 성질을 이용해 전기에너지를 저장하려는 연구가 바로 전술한 Enerptopia의 건설계획의 일환으로 연구하고 있는 에너지저장장치이다. 이와같이 초전도는 현재 기대되고 있는 신기술중에서도 가장 소망스러운 것으로 이것이 얼마나 빨리 전기계에 혁신적 기술로 등장하느냐 하는 것은 고온 초전도체의 출현에 달려있다고 보고 있는데 드디어 실현된 것이다. 앞으로 얼마 못가서 액체 질소환경하에서 더욱 쉽게 초전도연구를 진행하게 될 것이 틀림없다.

현재까지 초전도재료로 사용되어 온 것은 NbTi

합금이나 Nb₃Sn 금속간화합물로서 이들은 모두 극저온에서만 초전도성을 발휘하기 때문에 그의 냉매로서 액체헬륨을 사용해왔다. 따라서 이들을 이용하는 연구도 대단히 어려웠다. 그런데 현재는 98K(액체질소냉매 사용가능범위)에서 초전도성을 발휘하는 물질이 발견되었을 뿐 아니라 가까운 장래에 상온에서도 초전도성을 발휘할 물질도 출현이 예상된다. 그러나 이들이 실용도체로 사용되기 위해서는 아직도 많은 세월이 필요할 것으로 예상되는 바 액체헬륨온도에서의 초전도기기의 개발을 중단하고 고온초전도체의 실용화시기까지 기다린다는 것은 초전도현상이 인류에 베푸는 혜택의 시기를 크게 지연시킬 것으로 예상되는 바, 현재 수행되고 있는 응용연구는 그대로 진행되어야 한다. 현재의 연구결과에 고온초전도체가 미치는 영향에 대해서는 후에 각 응용분야별로 언급하겠지만 극저온유지를 위한 번거로움이 제거됨으로써 경제적으로 유리해질 뿐 기타 초전도이용기술은 많은 부분이 그대로 이용될 것이다. 즉, 본항에서는 초전도의 에너지 관련기기에의 응용에 관해서 기술코자하는데, 이의 근본은 초전도체로 된 고자계전자석인 것이다.

◇초전도이용 에너지관련기기

초전도자석은 종래의 전자석과 같은 철심이 없어 자기포화현상이 없기 때문에 임계자석정도의 고자계(5~20T)를 발생시킬 수 있어 그 용도가 대단히 확대된다. 즉, 종래의 용도에 쓰일 경우 그 성능이 대단히 향상될 뿐 아니라 자계내에 플라즈마를 가두는 핵융합, 자기부상열차, MHD 발전등을 가능케하고 전기에너지의 유일한 결점인 전기에너지의 직접저장을 가능하게 함으로써 전기에너지를 결점없는 완벽한 에너지로 만들 수 있게 한다. 또 초전도발전기, 전동기에 응용할 것 같으면 그 효율을 높게할 수 있을 뿐 아니라 소형화, 경량화할 수 있다. 발전기의 자계 코일을 초전도화하면 높은 자계를 발생시킬 수 있기 때문에 상전도자석의 경우에 비해 그 중량

을 수분지일 정도로 할 수 있으며 코일손실이 전혀 없어 그 만큼 효율이 상승된다. 그래서 초전도발전기에 대한 연구도 세계 각국에서 활발히 진행되고 있다. 미국에서 30만kw, 일본에서 5만kw, 소련에서 5만kw등의 초전도발전기가 시작된바 있다. 이 초전도 발전기는 전기한 특성이외에 그 특성이 크게 개선됨에 따라 송전시스템의 안정도를 크게 개선할 수 있다. 따라서 송전선용량도 증가시킬 수 있는 잇점이 있다. 초전도에 의한 전기에너지저장은 전력시스템의 침투부하공급용 저장장치로 사용할 수 있어 그 효율이 65% 정도밖에 안되는 양수발전소대신 사용하게 된다. 이 경우 그 효율은 90%이상이 된다. 양수발전소 규모의 에너지저장량은 보통 10¹²J(1000MWh) 정도인데 위스컨신대학의 연구에에 의하면 이 경우의 초전도코일의 직경이 110~150m정도가 된다.

또, 초전도 자석은 핵융합로에 있어서 플라즈마를 잡아두는 자계의 발생장치로 사용하고 있다. 이 경우 소요되는 자계는 10~20T정도이어야 하기 때문에 상전도체로서는 자기포화와 전력손실 때문에 불가능하며 초전도코일이라야만 가능하다. 그래서 이에 필요한 강력 핵융합자석이 국제적 협력에 의해서 연구제작되고 있다

이상과 같이 초전도공학의 에너지기술에서의 응용은 대단히 광범위하다. 지금 전력수요가 격증했을 경우 전력의 발생부터 수송저장이용에 이르는 일련의 전력시스템의 초전도화를 생각해 보자. 전력은 초전도자석을 이용한 핵융합에 의해서 열에너지가 발생되며 이 열은 초전도발전기를 일정출력으로 항상 전량발전할 수 있으므로 수요의 증감에 따라 잉여전력은 암반중에 설치되어 있는 초전도 에너지저장장치에 저장될 것이다. 이들간의 전류의 수수는 수10만암페어급이 될 것이며 송전선로도 같은 수준의 전력을 수송해야 하므로 초전도케이블이 필요하게 된다. 그리고 이 케이블 양단에는 초저도변압기를 연결, 대형공장에서는 초전도전동기가 운전되며 또 수요가가 자체적으로 수용률을 낮추기 위해서는 소형초전도에너지저장장치를 설치하게 될 것이

다. 또 전력계통의 안정화, 전압의 조정을 위하여 계통의 필요한 곳에 많은 소형 초전도에너지저장장치를 설치하게 될 것이며, 또 변전소의 유무효 전력조정도 콘덴서나 리액터대신에 이 에너지저장장치가 사용될 것이다. 여기에 이르기까지의 과정은 멀고 평탄하지 않을 것이라고 생각되어 왔으나 고온초전도체의 발견으로 전력계통의 초전도화는 목전에 다가가 10~20년내에 전시스템이 초전도화될 것으로 예상된다.

◇전력기기에의 응용

전력기기를 초전도화할 경우 초전도의 대전류성과 무손실성이 큰 경제적 이득을 주는 반면 극저온유지를 위한 비용이 추가되기 때문에 대체적으로 그 시설규모가 커야 현실보다 경제적으로 유리하게 된다(고온초전도체의 경우는 저온초전도체 이용의 경우보다 작은규모에서도 현실보다 유리하게 될 것이다). 물론 그 규모의 한계는 기기별로 다르다. 그리고 초전도화함에 의하여 전기적 특성이 개선되는 부분도 대단히 많다. 또 전력기기를 단체로 초전도화할 경우 초전도기기를 상온기기와 연결하는 전류전압단자

가 필요한데, 가능하면 이 부분까지 초전도화해야 그 초전도화의 유리성이 크게 향상된다. 따라서 전력설비개개의 초전도화연구와 동시에 시스템전체를 초전도화해야 한다. 즉 <그림-1>과 같이 변압기와 송전케이블, 발전기와 발전소모선을 동시에 초전도화함으로써 전전력계통을 초전도화하는 방향으로 연구를 시도해야 한다. 다음에 각 전력기기를 초전도화할 경우의 특징, 효과, 경제성, 문제점등에 대해서 기술해 보기로 하겠다.

초전도 발전기

• 초전도 발전기의 필요성

전력수요의 증가에 따라 대단위용량 발전기에 대한 요구가 점차 늘어가고 있다. 그러나 냉각기술, 재질의 강도등의 문제로 발전기의 단위용량에 한계점을 보이고 있다.

대형기로 갈수록 동기리액턴스가 증가하여 계통의 안정도가 떨어지게 되는데, 이를 방지하기 위하여는 발전기의 공극을 증가시켜야 한다. 그런데 공극을 증가시키면 계자의 기자력이 커져야하고 따라서 계자권선의 손실이 증가하고 발전기의 전체효율이 떨어져서 대형기의 이익이 없어진다. 이와같은 현상은 벌써 1000MVA급에서 나타나기 시작한다.

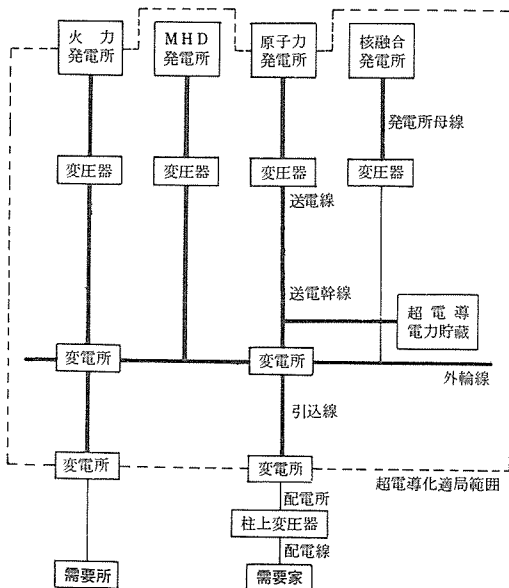
회전자의 원심력 때문에 회전자직경은 터빈발전기의 경우 13m이상은 매우 어렵고 따라서, 출력을 증가시키려면 길이를 증가시켜야 하는데 이것도 회전자의 진동관계로 10m를 초과하기 어렵다. 이와같은 제한하에서는 최대 단위용량은 약 2000MVA로 제한된다.

전기자권선의 절연관계로 발전기 출력전압은 약 30kV가 최대인데, 이 경우 2000MVA 발전기의 선전류는 40KA정도가 된다. 따라서 발전기에서 승압변압기사이의 전기설비가 고가로 된다.

또 발전기의 증량이 증가함에 따라 수송상의 제한을 받게 되므로 발전기를 현장에서 조립해야 되고, 따라서 발전기 가격이 증가하게 된다.

이상과 같은 문제점들을 근본적으로 해결하기 위하여는 현재의 발전기구조 및 재료개발로는 불가능하다는 것이 예견되었다. 이에 대한 해결

<그림 - 1> 초전도 전력계통



방안으로 초전도 계자권선을 가진 발전기가 제안되었다.

초전도 발전기 원리의 실증을 위하여 여러 연구기관에서 소형발전기를 시험제작하였고 오늘날에 와서는 그 실용성이 확실히 입증되어 프로토타입기의 제작에까지 이르고 있다.

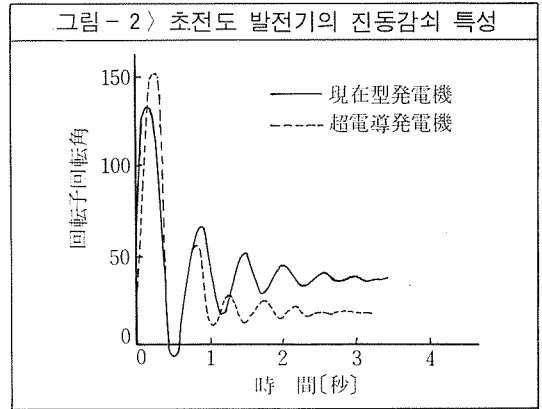
• 초전도발전기의 특징

대형 초전도 교류발전기의 잇점을 들어보면, ① 손실감소 ② 성능 향상 ③ 고전압 기기 가능 ④ 소형 경량화 ⑤ 가격 저하 ⑥ 대용량화 가능성 등을 들 수 있다.

1200MVA급 발전기에 있어서 손실을 비교하여 보면, 초전도발전기에서는 계자권선에 초전도선을 사용하므로 주열 손실이 거의 없다. 또 회전자는 이미 냉각되어 있으므로 현재의 발전기에서와 같은 통풍손실이 매우 적어진다. 물론 초전도체를 저온으로 유지하기 위한 헬륨냉각기 입력전력은 필요하지만 이것은 그리 크지 않다. 그러므로 전체적으로 보았을 때 손실이 1/3정도로 감소하게 된다.

초전도 발전기는 계자 기자력이 매우 크기 때문에 회전자에는 자기재료가 없다. 그래서 초전도 발전기는 공심기(Air-core machine)라고도 한다. 이와같은 기계에서는 전기자권선과 계자권선사이의 결합계수가 낮아서 동기리액턴스가 매우 적어진다.

〈표-1〉은 1200MVA발전기 전가적특성을 비교한 것이다. 동기리액턴스가 매우 낮기 때문에 초전도발전기에서는 정태안정도



에 제한이 없다.

또한 과도리액턴스도 적기 때문에 CFCT가 크게 되어 계통의 고장에 대하여 계통과의 동기성이 좋아 과도안정도가 개선된다.

앞에서 설명한 바와 같이 초전도 발전기의 회전자에는 제동관(Damper Shell)이 있어 제동작용을 증진시켰는데, 〈그림-2〉에서 보는 바와 같이 초전도 발전기의 경우가 제동작용이 약간 우수하다. 또한 제동관을 사용함으로써 정산운전시 불평형전류(I_2)에 의한 I_2^2t 내량을 높여주는 효과도 얻고 있다.

초전도발전기의 제조단가를 보면 〈그림-3〉과 같다. 저압 초전도발전기의 경우는 300MVA급 이상에서, 고압 초전도발전기의 경우는 1200MVA급 이상에서 그 제조단가가 현재의 발전기보다 저렴하게 됨을 알 수 있다. 초전도 발전기는 발전기의 저렴한 것외에 효율이 높기 때문에 운전·유지비에 있어서도 매우 유리하다.

이 외에도 초전도 발전기는 길이 및 중량에 있어 약 1/3(1200MVA급)의 감소를 볼 수 있어 수송비의 절감, 자재절약, 건물공사비의 절감을 기할 수 있다. 또한 전기자 권선이 계철과 별도로 제작되기 때문에 발전기에서 직접 154kV를 얻을 수 있어 출력승압 변압기를 생략할 수 있으며 대단위용량 발전기의 출현도 가능하리라 믿는다.

이상과 같이 초전도 교류발전기는 성능 및 경제성으로 볼 때 현재의 발전기보다 우수하며 앞으로 대단위용량기의 가능성도 커서 세계의 선

〈표-1〉 1200MVA초전도 발전기의 電氣的 特性

形	式	超電導形	現在形
電	圧[kV]	29	26
X_a		0.221	1.810
X_a'		0.151	0.320
X_a''		0.082	0.260
I_2^2t		15	7.5
I_2		0.100	6
CFCT(cycle)		16.0	12.75
損失(冷凍機포함) [kW]		4.433	15.276
効	率[%]	99.590	98.590

진각국에서 다투어 연구개발하고 있으며 1990년대에는 수1000MVA급 초전도 발전기의 실용화가 확실시되고 있다. 이에 반하여 국내에서는 아직도 초전도성 응용기술에 대한 연구가 부진하여 앞으로 다가올 초전도시대에 대한 대비가 전무한 실정이다.

국내 중전기분야의 기술혁신을 통한 선진화학업으로서 초전도성 응용에 대한 연구에 정부 및 기업의 적극적인 뒷받침이 있어야 하겠다.

◎ 초전도에너지 저장장치

• 초전도에너지저장장치의 필요성과 그 특징

전력회사에서 양질의 전력공급책무를 수행함에 있어 다음과 같은 애로점이 있는 것은 주지의 사실이다.

① 정확한 수요증가에 관한 수요상정이 어렵다.

② 첨두부하와 심야경부하와의 차이가 현격하게 클 뿐만 아니라 부하지속곡선의 패턴도 변하고 있다.

③ 효율 및 경제성이 좋은 신에 발전소(화력, 원자력)는 그 용량을 클 뿐만 아니라 출력조정폭이 좁고 부하추종성이 좋지 않으며 기동손실이 크다.

④ 기 이용 화석에너지 자원의 고갈현상에 의한 화석연료의 무기화 및 고가로 고효율발전설비의 도입이 요망되고 또 대체에너지의 개발결과로 등장하는 원자력, 조력, 태양열등의 발전소의 출력특성은 경제성등의 이유로 부하의 Load cycle과 무관하므로 이들의 유효이용을 위해서는

〈표-2〉 SMES의 발전 cost평가의 시대추이

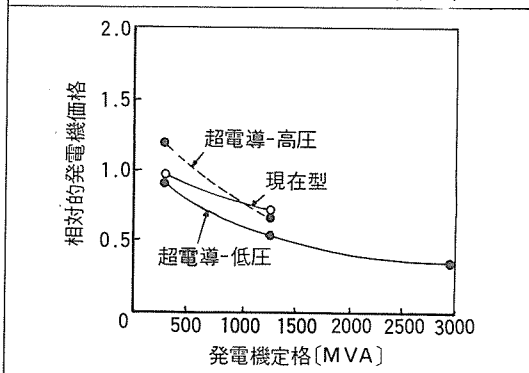
평가연대	발전 Cost (mill 1KWH)	
	연간 365일 가동	연간 260일 가동
1970	10.1	
1974	22.1	
1976	18.7	
1978	19.2	24.8

특히 전력저장이 필요하게 된다. 전력회사에서는 상기한 문제점에 대하여 수력, 화력, 가스터어빈, 원자력, 양수발전등을 적절히 조합하여 심야의 경부하에서 첨두부하 사이로 수시 변동하는 부하요구에 가장 효과적으로 응할 수 있도록 전력설비의 계획과 운용을 행하고 있다. 변동부하에 대처하는 것으로는 현재 수력과 중소용량의 효율이 낮은 첨두부하용 화력과 양수발전인데, 이 중에 양수발전은 전력저장설비로서의 의미를 갖고 있으나 그 효율이 65~70%로 낮아서 밀이 뚫린 항아리에의 저장과 같아서 전력의 저장이라기 보다는 첨두시에 수급관계의 개선용이라고 볼 수 있다. 이상과 같은 문제점은 고효율의 전력저장설비의 출현시 전력설비의 계획과 운용은 발전과 전력저장이란 二元的 측면에서 쉽게 해결할 수 있으며 피크셰이빙(peak shaving)을 행하여 전력설비의 부하율향상(설비의 유효이용)과 발전효율향상을 통하여 원에너지의 절약은 물론 염가의 전력을 공급할 수 있다.

초전도에너지저장은 다른 어떤 저장방법과는 달리 전기에너지를 직접저장(자기에너지형태) 및 방출을 하므로 효율이 높고(90%이상) 속응성이 우수하며(수십ms정도) 이외에 대규모 전력저장에 있어서 현행의 양수발전에 비하여 저장에너지밀도가 높고(2~3배) 또 대용량화 및 입지조건에서 상당히 유리하므로 발전설비의 대형화에 따른 이점을 최대한으로 활용할 수 있게 하는 명실상부한 전력저장장치라 할 수 있다.

따라서 이것이 실용화되면 원에너지 절약 및 염가의 전력공급에 큰 몫을 할 수 있는바 이 지면을 통하여 초전도에너지저장방법과 문제점을 소개하며 우리나라에서도 이에 관심을 갖고 조 기적용의 바탕을 구축함이 바람직하다고 본다.

〈그림-3〉 각종 발전기의 제조가격 비교



• 초전도전력에너지저장장치의 경제성

실용단계가 아니고 연구개발단계에서 추정한 cost는 cost산정의 기준으로 되고 있다. 가령 그것이 불안정한 요소를 포함하고 있어 정확하다고 할 수 없으나 미국 위스컨신대학의 연구진이 행한 발전 cost는 <표-2>와 같이 설계방침, 신재료의 개발등으로 해를 거듭할수록 경제성이 향상되고 있고, 또 가스터어빈보다는 경제적임을 보인다.

그리고 본 SMES는 대형화 할 수록 <표-3>에서 보는 바와 같이 유리함(Scale Merit)을 보인다.

이 장치의 경제성 도모는 초전도코일선재의 임계치(임계전류, 임계자속밀도, 임계온도)의 상승에 의한 재료절약, Quench방지를 위한 안전화 기법 개선에 의한 재료절약, Quench 및 누설자속에 대한 안정성향상, 강력한 전자력의 지지를 위한 열절연지지재 및 지지방법의 개발, 양호한 운전특성 및 효율을 위한 전력계통과의 인터페이스부분의 부품 및 제어방법 개발, 냉각계통의 열절연 및 냉각효율향상, He의 소요량감소 및 회수방법의 개발등을 통하여 계속 연구중에 있으며, 1900년대 후반에 현재의 양수발전규모가 실용화될 전망이다.

초전도에너지저장의 전력계통에의 응용으로서는 충방전시간이 긴 양수발전규모의 전력저장용과 충방전시간이 짧고 용량은 적어도 되는 전력계통 안정용 및 무효전력보상용을 들 수 있는데 이중 전력저장용은 높은 효율(90%이상), 우수한 속응성(수m/sec), 대용량화의 용이성, 입지선정의 자유도가 큰 점등에서 명실상부한 전력저장장치로서 이것이 실용화되면 현행 양수발전에 대치될 것이며 이의 실용화는 1900년대 후반으로 전망된다.

이 초전도에너지저장장치는 1차에너지 자원이

<표-3> 용량별 상대적 건설단가

용량	상대적 건설 단가
10,000 (MWH)	0.46
5,000 (MWH)	0.58
1,000 (MWH)	1.00
100 (MWH)	2.14

없는 우리나라로서는 차선책으로 원자력에 의한 발전에 크게 기대함과 동시에 그의 잉여전력저장장치로서 초전도 에너지저장장치를 이용하기 위하여 일찍부터 서울대학교와 한국전력이 공동으로 이의 연구에 착수, 장치의 기초설계기술을 확립하고 에너지저장 및 계통의 유무효전력제어 등에 관한 연구를 수행 한바 있고 앞으로도 계속 미해결 기초이론과 대형화 연구를 계속하기로 되어 있다.

◎ 초전도 케이블

• 초전도케이블의 필요성과 그 특징

인류는 경제의 발달에 따라 생활이 향상되고, 생활향상에 따라 전력수요도 증대해 갈 것이다. 따라서 막대한 전력을 발생하게 되고 이를 사용하기 위해서는 소오지까지 수송을 해야한다. 즉, 현재의 몇배에 달하는 막대한 전력을 수송해야 한다. 이 문제를 해결하기 위해 현재까지 고려되어 온 것이 가스절연냉각케이블, 저온케이블, LNG 냉각케이블, 마이크로웨이브전력선 등이다. 그러나, 이들은 초전도케이블의 전단계에서는 적용될 수 있으나 더욱 고밀도대전력을 수송하기 위해서는 현재로서는 초전도기술에 의하지 않고서는 해결할 길이 없다.

초전도체는 현재 사용하고 있는 선재인 동에 비해 그 전류밀도가 10^{11} 배 이고 저항이 전혀 없으므로 손실이 전혀 없다. 다만 극저온에서 사용해야 하기 때문에 극저온유지비용이 추가될 뿐이다. 이를 감안할 때 초전도송전의 경제성은 10 MVA 스케일 이상이 되면 그 경제성이 다른 방식에 비해서 월등히 좋아진다.

물론 앞으로 고온초전도체가 출현하면 문제는 또 달라질 것이나 현 상태에서는 10^6 MVA의 경우 현 시점에서 저온초전도체에 의해서도 그 경제성이 성립된다고 보고있다. 즉 고밀도 대량전력을 경제성 있게 수송하자면 초전도송전이 불가피한 것이다.

• 초전도송전의 경제성

초전도송전은 도시주변의 지하케이블로서 사용될 것이고 다음에 교류송전이 이용될 것으로 믿어진다. 지금 교류송전의 경우의 경제성에 대

한 고찰을 해 보기로 한다. 여기에서 우선 미국에서 설계된 초전도송전케이블의 제원을 (표-4)에 표시한다. 이와같은 설계단계에 있어서 경제성평가는 그 정도가 높지는 못하지만 대체적으로 비슷한 값으로 평가기준으로 사용할 수 있다.

이것을 다른 송전방식과 비교한 것이 (그림-4)와 같다.

여기에 초전도송전의 전단계라고 볼 수 있는 저온케이블송전과 경제성이 비교되어 있는데, 초전도송전은 그 용량이 커질수록 유리함을 알 수 있다. 따라서 가까운 장래에 초전도송전이 실현될 것으로 믿어지는데, 만일 고온 내지 상온 초전도체가 출현하는 경우는 다른 어느 방식도 이를 초월할 수 없을 것이다.

◎ 초전도변압기

• 초전도변압기의 필요성과 그 특징

초전도변압기는 초기에는 그 자체의 초전도화는 경제성이 없어 별로 흥미를 끌지 못했었고 다만 초전도송전을 실현할 경우 그 양단의 열침입의 차단등을 고려하여 초전도화의 유리성 정

도가 고려되고 있었는데, 최근에 와서 교류초전도선이 개발되어 그 자체로서도 초전도화의 경우 큰 이득이 있게되어 세계적으로 널리 연구가 진행되고 있다. 초전도변압기는 대전류를 흘릴 수 있기 때문에 철심이 필요없을 것이라고 생각되나 철심을 없이 할 경우 여자전류가 너무 커지고 철심을 안쓰고 여자전류를 적게 하려면 권선을 많이 감아야 하는데, 그렇게 하면 리액턴스가 커져 실용화 할 수가 없게된다. 그래서 철심을 사용할 수 밖에 없는 이 경우 철심에서 발생하는 열이 문제가 된다. 이를 액체헬륨에 담구어 놓을 경우 철에서 발생하는 열 때문에 헬륨이 증발하므로 경제적으로 불리해진다. 그래서 철심은 상온공간에 있게 하고 권선만 액체헬륨용기에 들어 있게 한다.

• 초전도변압기의 경제성

미국의 WH사가 발전소용 초전도변압기를 시작한 바 있는데, 이것과 재래식과의 가격을 비교한 것이 (표-5)이다.

이것을 볼 것 같으면 전비용(Total life cycle cost)가 재래식변압기의 70%밖에 안됨을 알 수가 있다. 변압기자체는 약간 고가이나 손실이 적기 때문에 전비용이 훨씬 적음을 나타내고 있다. 그리고 전비용에 대한 냉동기가격은 20%에 불과하므로 비용상승요인이 된다고 볼 수는 없다.

그러나 금후의 과제로서 고장시의 권선의 안정유지, 고압저온부분에 대해서는 계속 연구가 필요하다고 보고 있다. 이상은 저온 초전도체사용의 경우인데, 고온초전도체를 사용하게 될 경우 그 경제성이 크게 향상될 것은 자명하다.

◎ 초전도의 에너지분야에 있어서의 응용

• MHD 발전

고온가스를 자계중에서 이동시켜 발전하는 것이 소위 MHD발전인데 그 출력밀도는 자속밀도의 자승에 비례한다.

그래서 많은 전력을 발생시키려면 넓은 변화공간과 5T이상의 고자계가 필요하다. 이 경우를 상전도체로 이룩하자면 출력보다 이에 소요되는 에너지가 더 많아야 한다. 그래서 MHD발전은 초전도를 이용하지 않고서는 불가능하므로 초전

(표-4) 超電導送電 케이블 設計諸元

送電電壓 (kV)	69	138	230	345	
磁界強度 (G)	1000	1000	1000	1000	
絶縁内電界強度 (kV/cm)	200	200	200	200	
耐電壓 (kV)	400	600	838	1200	
送電容量 (MVA)	423	1690	4710	10590	
電流 (kA)	3.55	7.10	11.80	17.75	
導體直徑 (cm)	2.0	4.0	6.7	10.0	
直徑 (cm)	5.9	10.0	15.3	22.0	
低溫容器內徑 (cm)	13.4	22.6	34.5	49.8	
絶縁厚 (cm)	5.1	5.1	5.1	5.1	
低溫容器外徑 (cm)	24.3	33.6	46.7	62.8	
總經費 (千円/MVA·km)	236	83	42	28	
1 km 當經費 (千円)	1×10^4	1.4×10^4	2×10^4	3×10^4	
別經費 (%)	導體	9.6	14.6	20.1	26.3
	低溫容器	24.3	25.6	25.6	23.7
		1.9	4.2	7.4	10.7
		4.1	3.9	3.5	2.8
	冷凍器	16.6	14.7	11.6	8.3
	設置	32.2	26.1	21.9	19.8
	年間經費	11.3	10.9	9.9	8.4

도체에 의한 고자계발생기술이 처음 이용된 것이 MHD발전이었다. 이 경우 그 축적에너지는 기가줄(GJ)급에 달하며 이런 장치의 설계과제는 권선과 구조재료에 가해지는 응력(δ)과 상전도로 이행할 경우의 최대온도상승(Tmax)을 억제함과 동시에 발생시 이에 견디게 하는 것이다.

δ 는 전류밀도j, 자속밀도B, 및 자계중심부에서 권선부까지의 거리r에 비례한다. MHD발전에서 요구하는 j, B, r를 대입할 경우 δ 는 수십 kg/mm² 이상으로서 현재 상전도에 의해 제작된 기기에서는 볼 수 없는 값이다. 또 상전도이전시의 최고온도상승 Tmax는 자기에너지 E에 비례하고 전류밀도 j²에 비례하므로 잘못설계할 경우 코일을 소손시키게 되므로 이점에 대해서도 설계시 큰 주의를 기울여야 된다.

• 고에너지물리연구용 자석

고에너지물리학연구에는 가전입자의 가속이 절대적으로 필요하다. 따라서 고자계가 필요한데 이것을 초전도로 할 경우 예를들어 미국의 Fermilab 에 설치된 Terratron이라고 불리는 가속기는 1000개의 초전도자석으로 되어 있는데 이의 냉각용 He값이 연간 5백만불이 소요된다. 그런데 이를 상전도 자석으로 만들 경우 연간 전기료가 1억8천5백만불이 소요된다고 한다. 이것으로 미루어보아 초전도화가 절대적으로 필요함을 알 수 있을 것이다. 그리고 현재 미국에서는 레이건대통령의 지원하에 약 50억불이 소요되는 초대형 가속기를 제작중에 있는데 이에 10,000개의 초전도자석이 쓰여질 것이며 연간 이득이 상전도에 비해 6억불이 절약된다고 한다. 이것 역시 고온초전도체나 상온초전도체로 할 경우

그 양상이 획기적으로 달라질 것을 미루어 알 수 있다고 믿는다.

• 핵융합발전에서의 초전도응용

인류의 궁극적에너지원은 방사능에 의한 위해가 없고 무진장으로 얻을 수 있는 핵융합에너지에 의한 발전일 것이다.

핵융합발전은 플라즈마에 전류를 흘려 자장을 이용, 이를 폐입시켜 놓고 이를 1억℃로 가열해야 일어난다. 이때 자장발생에 쓰이는 것이 초전도자석이다.

이때에 필요한 자계의 세기는 10~20T로서 초전도자석에 의하지 않고서는 불가능한 것이다.

◎ 초전도전자력 이용

• 자기부상열차

자기부상열차라는 것은 자기에너지에 의해서 발생하는 반발력을 이용해서 무거운 열차를 지표상에 부상시켜 기계적인 마찰없이 주행하는 것을 말한다. 즉 지상과 열차내에 강력한 전자석을 설치, 이것이 서로 반발하게 함에 의해 열차가 부상케 하고 또 내부에 있는 자석과 지상에 설치한 추진코일에 의해서 열차가 추진되도록 한 것이다. 이 경우에 열차내부에 탑재하는 전자석을 초전도코일로 된 영구자석을 사용함으로써 그 중량을 가볍게 하고 강하게 해서 부상하고 빨리 달릴 수 있게 한 것이다. 이에 관한 연구는 1970년 독일에서 시작됐고, 일본에서도 같은해 그전까지의 연구검토한 결과 도시간 고속수송방법으로 초전도자기 부상열차가 가장 적합하다는 결론을 얻어 연구를 개시 1979년 517km/h의 고속주행에 성공했다.

그후 계속 연구를 지속시켜 현재는 인간이 탑승, 실용차에 가깝게 만든 3량연결운행시험을 거듭하여 연구를 계속하고 있다. 이의 이점은 고속, 대량수송, 안전, 쾌적, 무소음에 있다. 만일 이 열차를 우리나라 경부선에 주행시킬 경우 서울 중심부에서 출발하여 부산중심부에 도착하는데 소요시간은 1시간정도로써 항공기보다 훨씬 편리한 수송방법이 될 것이다.

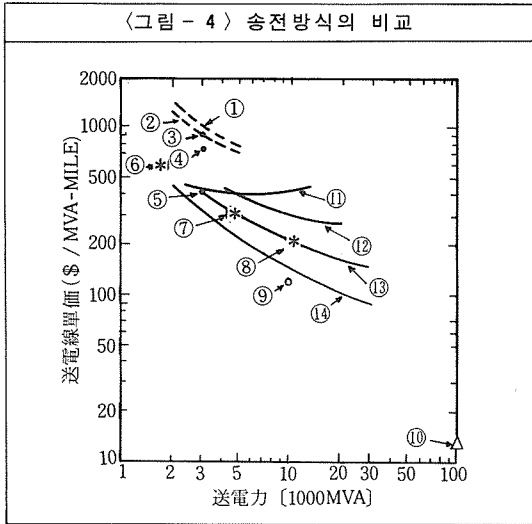
이는 저온초전도체에 의해서도 그 타당성이 있어 가까운 장래에 실용화될 것으로 전망되었

〈표 - 5〉 3φ - 1000 MVA - 22/500kV 變壓器의 超電導器와 従來器와의 비용比較 (%IZ=12(%) 基準)

	超電導器	従來器
一般材料	3.0	5.7
超電導材料	4.1	-
冷凍裝置	14.7	-
損失換算(2000/kW)	48.4	94.8
全 S	70.2	100.0

(注) 従來器의 비용100

(그림 - 4) 송전방식의 비교



- ①③ 500kV AC 液体窒素低温送電
- ②④ 500kV AC 液体水素低温送電
- ⑤ AC超電導送電
- ⑥ 138kV AC超電導
- ⑦ 230kV AC超電導
- ⑧ 345kV AC超電導
- ⑨ 150kV DC超電導
- ⑩ 200kV DC超電導送電
- ⑪ 880 kV DC 液体水素低温送電
- ⑫ 220kV DC超電導送電
- ⑬ 440kV DC超電導送電
- ⑭ 880kV DC超電導送電

는데, 이제 고온초전도체가 출현하였으니 이것이 사용가능하게 될 경우 아마도 제일 먼저 이용되는 것이 자기부상열차일 것이라고 생각된다.

◎ 전자력추진선박

이것은 현재의 선박과 달리 추진프로펠러, 구동용엔진을 갖고 있지 않으며 그 대신 초전도코일을 선저에 설치하여 영구전류를 흘려 선저에서 바다속으로 고밀도의 자속이 발생케 해놓고 선저양측에 +, -전극을 설치, 바닷물에 전류를 흘림으로써 $F = J \times B$ 의 힘이 생기게 하여 선박을 추진케 하는 것이다. 따라서 이 선박은 기계적 회전부가 없어 무진동, 무소음추진이 가능하며, 부수도 아주 간단해지고, 전후진의 변경이 용이할 뿐만 아니라 추진력이 전류제어에 의해 제어되기 때문에 조절이 아주 간편해지고 신속하게 이루어지는 특색이 있다. 또한 자계가 대단히 강해야 하므로 초전도자석에 의하지 않고서는 전자력추진선박은 그 능력을 발휘할 수 없다. 만일 이것으로 잠수함을 만들 경우 필요 추진에너지를 초전도에너지저장장치에 저장된 전력을 이용한다면 일체의 잡음, 진동이 없을 것으로 미루어보아 그 효용의 지대함을 알 수 있을 것이

다. 또 스크류가 필요없어 선저를 평탄하게 만들 수 있어 얇은 항구에도 접안이 가능할 것이다. 이로 미루어보아 초전도전자력추진선박도 머지않아 사용되리라고 생각된다.

◇ 고온초전도체 출현과 그 전망

초전도발전기, 초전도송전, 초전도에너지저장장치를 비롯 에너지분야, 전자력응용분야에 대해서 저온 초전도체를 사용한 경우의 각 장치의 특징과 그 경제성에 대하여 기술하였는데, 고온 초전도체의 출현으로 그 특징이나 경제성이 한층 더 우월하게 되었다. 이에 대해서는 각 항에서 단편적으로 언급한 바 있지만 여기에서 그 효과의 증진에 대해서 구체적으로 언급하고 본고를 끝맺고자 한다.

- 우선 액체질소로 생각해 초전도성을 나타내는 도체를 사용할 경우 송전손실이 0.73%로 상전도체의 경우의 1.68%에 비해 대단히 낮아짐을 알 수 있다.

- 그리고 발전기의 경우는 300MW에 대해 비교해 본 결과 그 연간 손실이 엄청나게 감소함을 알 수 있다.

- 전력변압기의 경우는 그 손실비용이 고온초전도체의 경우 저온초전도체에 비해서 35%로 감소하고 이것을 재래식 변압기에 비하면 60% 절감된다.

- 에너지저장장치에 있어서는 저온초전도체를 사용한 경우 양수발전의 효율이 60~70%인데 비하여 90~93%가 되는데, 이를 고온초전도체로 할 경우는 94~95%로 증가한다.

이상 몇가지 장치에 대해서 고온초전도체사용의 경우 이용향상에 대해서 언급하였는데, 기타 장치에 대해서도 이와 유사한 이득이 있을 것으로 예상되며 열차단 구조의 간단화로 그 제작기술의 난이도도 훨씬 낮아질 것으로 예상되는 바 초전도현상의 발견에 이은 고온초전도체의 출현은 정보산업시대를 도래케한 전자정보통신기술발전과 비교될 만큼 큰 변화를 초래할 것으로서 인류사회발전에 크게 이바지할 것으로 생각된다.