

超電導의 電力設備 適用展望 (下)

Status and Trends on Application of
Superconductivity to Electric Equipments

한전 기술연구원 계통연구실 급전역
권 태 원

4. 超電導의 전력계통분야에서의 應用

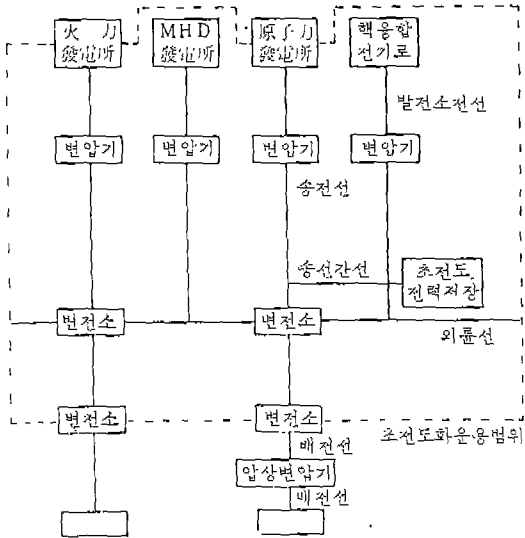
상술한 초전도선을 이용하여 고자계발생 영구 전류통신 및 고밀도 전류통신이 가능하기 때문에 대규모 전력분야에서 볼 때 매력적이지 않을 수 없다. 특히 에너지 정세를 고려해 볼 때 석유공급 구조의 불안정성이 상존해 있고 고신뢰도 전력수요 요구가 날로 상승할 것으로 보인다.

그러므로 에너지 절약형 기술개발은 적극적으로 추진되어야 하며 특히 전력 에너지를 생산공급하는 한국전력은 이 관련분야에 주목해야 할 것이다. 현재 전기기기는 전류와 자속 상호작용에 의하여 동작되는데 이들 자속밀도 한계는 1.5[Tesla], 전류밀도는 $10^2 \sim 10^3$ [A/cm²]이 된다. 이것을 초전도화 하면 자속밀도 20[Tesla], 전류밀도 10^3 [A/cm²]까지 증대시킬 수 있고 무저항이기 때문에 영구전류를 흘려 전력을 직접 저항할 수 있다. 이것은 마치 트랜지스터 발견으로 현대문명에 기여한 것 같이 대전력 전기기기 응용분야에 전력의 발생, 수송, 배분, 저장

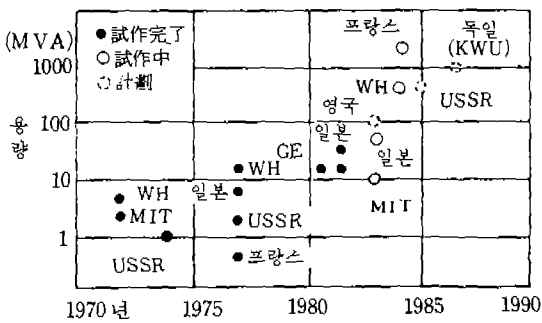
등 모든 면에서 혁신적인 발전이 예상되며 앞으로 적용이 예상되는 초전도 전력 시스템을 구성해 보면 그림 6와 같이 된다. 다음은 초전도 발전기, 송전(Cable), 변압기 및 에너지저장장치에 관해 간단히 기술하고자 한다.

가. 超電導 發電機

전력수요의 증가에 따라 대단위 용량 발전기에 대한 요구가 점차 늘어가고 있으나 냉각기술, 재료의 강도 등의 문제로 발전기의 단위용량 한계점이 나타나고 있다. 대형기(1,000MVA이상)로 갈수록 동기 리액턴스가 증가, 계통의 안정도가 떨어지는데 이것을 방지하기 위하여 공극을 증가시켜야 하고 따라서 제자권선 손실이 증가하고 발전기의 전체효율이 떨어져 대형기 이점이 낮아진다. 또 회전자의 원심력과 진동 때문에 최대단위 용량은 보통 2,000MVA에서 제한된다. 발전기의 출력전압 및 발전기의 현장조립 등의 문제는 대형기의 문제점으로 지적되어 왔고 이러한 문제점을 해결하기 위하여 현재 발



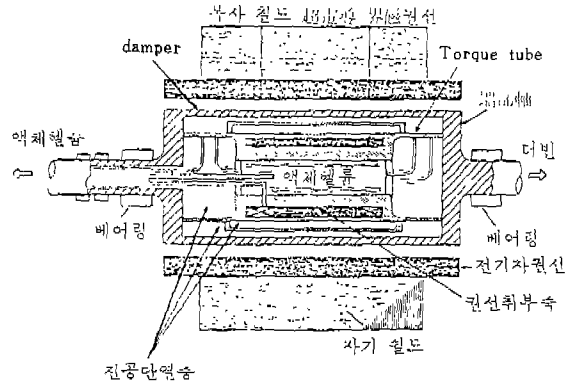
〈그림 6〉 초전도 전력시스템 구성



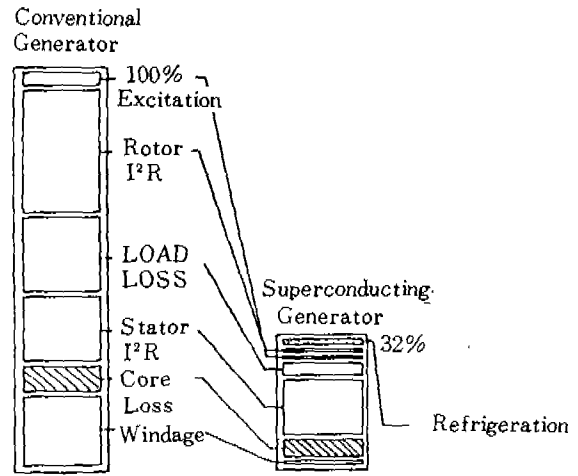
〈그림 8〉 초전도 발전기의 개발현황

전기 구조 및 재료로는 불가능하다는 것이 예견되고 있다. 이에 대한 해결 방안으로 초전도체 자권선 발전기가 제안되었다.

현재 초전도 발전기의 원리를 실증하기 위하여 소형발전기를 제작 시험하였고 이제 그 실용성이 입증되어 프로토타입기의 제작단계에 이르렀다. 최근 교류에 사용될 수 있는 초전도선의 개발로 전기자 권선도 초전도선으로 하여 Core 손실과 전기자 손실을 줄일 수 있는 전기를 마련하였다. 그림 8은 선진국의 초전도 발전기의 개발현황을 표시하고 있다. 현재 실용화되고 있는 발전기 용량까지 제작 시험중에 있다.



〈그림 7〉 초전도 계자권선 발전기 구조



〈그림 9〉 1,200MVA 저압 교류발전기의 손실비교

이와같이 초전도발전기의 이점을 ① 효율향상 및 에너지 절약 ② 전력계통 안정도 향상 ③ 단자 전압의 고압화 ④ 소형 경량화 ⑤ 가격저하 등을 들 수 있다. 그림 9는 1,200MVA 초전도발전기의 손실을 나타낸 것으로 초전도 발전기의 손실은 재래식 발전기의 32~48% 정도가 됨을 알 수 있다.

그림 10를 보면 저압 초전도 발전기는 1,200 MVA급에서 그 제조단가가 현재 발전보다 저렴하게 됨을 보여 주고 있다.

길이, 중량에 있어서도 기존기보다 1/3로 감

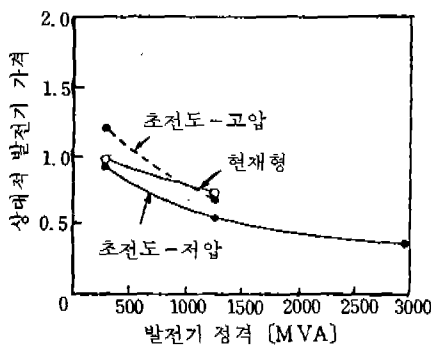
소, 수송비 및 건물공사비 절감 등을 꾀할 수 있으며 전기자 권선은 Slotless로 되어 전기적 전열이 용이하여 종래기에 비하여 높은 단자 전압을 얻을 수 있다. 앞에서 기술한 바와 같이 초전도 발전기는 성능 및 경제성이 현재 발전기보다 우수하여 선진 각국에서 다투어 개발하고 있으며 임계온도가 높은 초전도체 발전과 교류 초전도체 제조 성공으로 전기자 권선에도 초전도화 되면 성능 및 경제성에서 매우 유리하게 되어 1990년대에는 수천 MVA급 초전도 발전기의 실용화가 확실시 되고 있으며 현재 소련에서는 2만kW급 발전기를 계통에 병입, 실용 운전을 하고 있다.

나. 超電導 送電

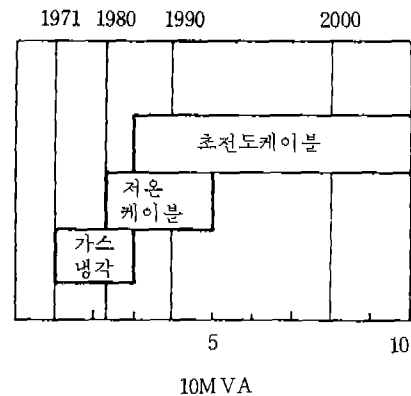
매년 증대되는 전력수요로 인하여 대용량발전소 건설이 증대되고 지하케이블 사용이 점점 요구되는 실정인바 대용량 전기 에너지를 운송하는데 송전 루트 확보는 큰 문제점으로 등장하고 있다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 신송전 방식이 요구되는데 현재 초전도 기술발달로 인하여 초전도 송전방식이 제안되고 있다. 이 방식은 직류송전인 경우 수송 손실이 거의 없고 냉동 시스템을 포함하여 볼 때도 기존방식 보다 경제성이 있다. 장래 지하 케이블 송전의 발전 추이는 그림 11에서 보는 바와 같이 송전용량 증대로 대규모 적용이 1990년대 중반에 실현될 것으로 보인다. 현재 송전 루트 결정의 어려움과

전력수요가 집중되고 안전성 및 미관성이 요구되는 대도시 인입송전에, Nb₃Sn 등 극저온 초전도체 제작기술 향상 및 선재 등의 가격하락에 힘입어 초전도 교류송전이 조기에 적용될 것으로 보인다. 외국의 개발현황을 살펴보면 주로 일본, 미국, 소련에서 연구가 진행되고 있으며 일본의 전자기술연구소에서는 대도시 인입선으로 교류 케이블을 상정하여 길이 20~30km, 용량 2~3GW급의 초전도 케이블 개발연구를 진행하고 있고, 한편 미국에서도 역시 길이 100m, 138kV급 4kA 1GW의 교류 초전도 케이블을 제작, 수년간 통전시험을 하고 있다. 현재까지의 대표적인 초전도 케이블 개발상황을 낸 표 3을 보면 각국에서 연구단체의 시험연구를 오래전부터 진행중임을 알 수 있다. 특히 그림 12에서 보는 바와 같이 초전도 송전의 손실 송전용량이 크고 장거리화 할수록 그 이점은 한층 증가함을 알 수 있다. 초전도 송전은 초전도 특성을 이용하여 대용량화, 고효율화, 고밀도화 및 장거리 송전 등이 용이한 등 많은 특성을 가지고 있으며 현재 직류송전은 대용량 장거리 송전에서 교류송전보다 일반적으로 경제성이 있다. 그림 13은 초전도 케이블 송전방식의 경제성을 타 송전방식과 비교하여 나타낸 것으로 초전도 송전은 교류·직류 공히 송전용량이 증가할수록 경제성이 있음을 알 수 있다.

현재 냉매로 헬륨을 사용한 초전도 교직류 캐



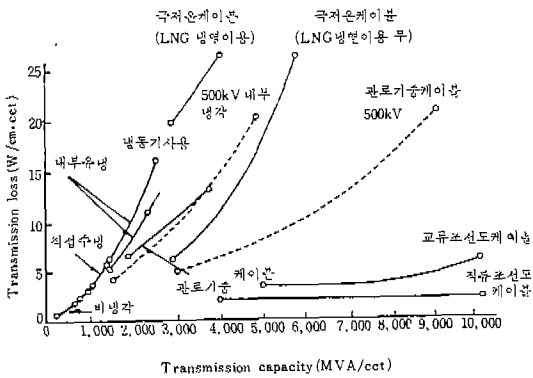
〈그림 10〉 각종 발전기의 제조가격 비교



〈그림 11〉 지하 케이블 송전방식의 추이예상

〈표 3〉 초전도 Cable 개발 현황

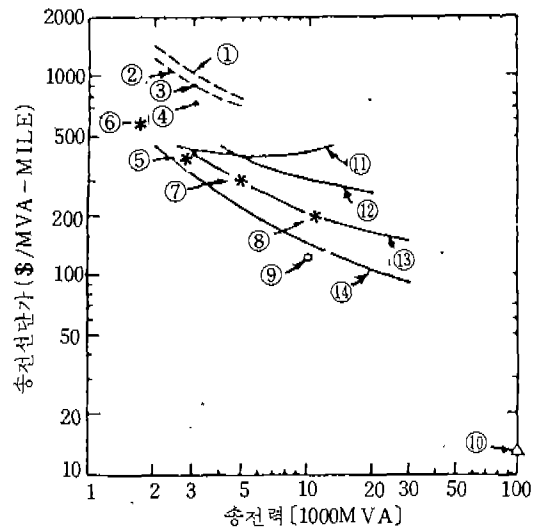
회사명	SIMENS (서독)	BICC (영국)	CGE (프랑스)	BNL (미국)	UCC (미국)	古河 (일본)
송전방식	AC	AC	AC DC	AC	AC	AC DC
목표전압 (KV)	110	35	125±100	138	138/230/345	154±75
목표전류 (KW)	10	13	14 20	4	7.1/11.8/17.75	3 33
송전용량 (MW)	2,000	750	3,000 4,000	1,000	1,690/4,710/10,590	1,000 5,000
초전도체 + 안정화재	Nb와이어 Al, Cu	Nb튜브 Al	Nb조Nb-Ti조 Al Al	Nb Sn조 Al	Nb튜브 Cu	Nb Nb-Ti Cu Cu
실험 상황	35일의 모델 제작완료 110kV, 10kA 단상송전 1973년	3m의 단상 케이블 2,080A 통전	18m의 용기 제작 1975년 완성	삼상100m의 테스트장치 3850A의 통전 교류손실측정 계속중	7m의 실험장치 교류손실측정 1975년 완성	7m의 케이블 통전테스트



〈그림 12〉 각종 Cable 의 송전손실

이블을 제작 시험하고 있으나 최근에 질소냉매가 가능한 고온 초전도체의 발견으로 한층 경제적인 이점을 가질 것으로 보며 전력계통 조기 적용 연구가 지속될 것으로 전망될 뿐만 아니라 고안정·저손실(교류사용) 고온 초전도체 선재화가 이루어진다면 의외로 빨리 전력계통에 적용될 것이다. 그러나 케이블의 신뢰성과 안정성을 위하여 단열제와 열수축 대책, 고진공 배기 기술, 초기 냉각기술 등 미지의 기술이 해결되어야 할 것이다.

다. 超電導 變壓器



- ① ③ 500kV AC 액체질소 저온송전
- ② ④ 500kV AC 액체수소 저온송전
- ⑤ AC 초전도 송전
- ⑥ 138kV AC 초전도 ⑧ 345kV AC 초전도
- ⑦ 230kV AC 초전도 ⑨ 150kV DC 초전도
- ⑩ 200kV DC 초전도
- ⑪ 880kV DC 액체수소 저온송전
- ⑫ 220kV DC 초전도송전
- ⑬ 440kV DC 초전도송전
- ⑭ 880kV DC 초전도송전

〈그림 13〉 각종 송전방식 비교

초전도 현상을 발견한 이래 4분의 3 세기가 경과하였고 지금 직류 초전도선 응용면에서 비약적인 발전을 하였다. 종래의 초전도체는 실용화 관점에서 대부분 직류밖에 사용할 수 없었기 때문에 응용면에서 스스로 한계를 가지고 있었다. 그래서 변압기에 사용되는 초전도 선재는 과도한 교류손실 때문에 대용량 냉동기가 필요하여 경제적인 실현이 어려웠다. 그러나 1983년 프랑스에서 50/60Hz용 교류 초전도체 개발에 성공하여 교류에 초전도를 사용하는 중요한 계기를 마련하였다. 초전도 변압기의 구조는 제작사마다 조금씩 다르지만 종래의 변압기 구조와 비슷하며 액체 헬륨이 가득한 저온용기에 코일과 철심을 넣는 구조로 되어 있다.

이 변압기 개발은 프랑스의 알스톰사에서 50 Hz, 220kVA, 660/4000V의 초전도 변압기(SCT)를 제작 시험중에 있고, 표 4는 종래와 같은 정격의 변압기와의 특성비교이다. 종래형의 전손실은 2,400W인데 비해 1,300W이고, 중량은 1,000kg인데 비하여 100kg으로 저감된다. 또한 WH사 발전소용 SCT(3φ, 60Hz, 1000MVA 22/500kV, %IZ=12(%))를 제작, 이 변압기에 대한 경제성을 평가한 자료를 보면 전코스트(Total life cycle cost)는 종래기의 100에 대하여 70.2로 SCT의 우위를 표시하고 있다. 그러나 전코스트중 재료비 및 냉동장치의 가격이

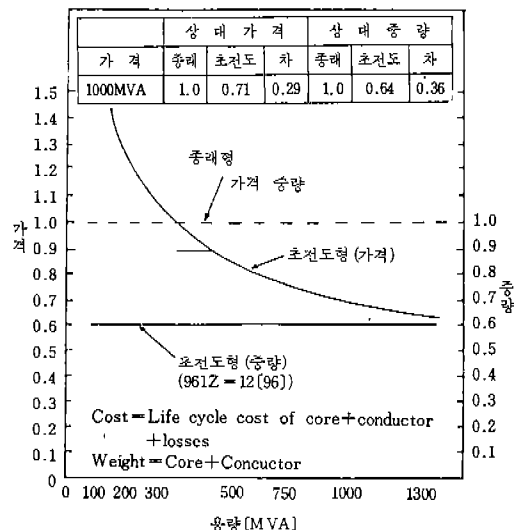
20%을 초과하고 있어 코스트의 압박요소가 되는 것으로 나타났다. 역시 WH사에는 그림 14에서 표시한 바와 같이 300MVA 이상에서는 SCT가 유리하고 중량은 상대적 평가치인 0.64로 경감되는 것을 알 수 있다. 결론적으로 WH사는 ①현기술로 초전도 변압기는 제작 가능하고 ②전코스트는 SCT가 유리하며 ③고장시의 전선의 안정성, 고저압 부상에 관해서는 금후에 연구가 필요하다고 평가했다.

라. 超電導 에너지 貯藏

일반적으로 야간의 전력수요는 주간 전력수요의 1/2 정도 밖에 되지 않는다. 따라서 주간에는 막대한 투자를 하여 건설한 전력시설이 유휴되어 경제성이 나빠진다. 특히 원자력 발전소의 경우 그 경제성은 더욱 악화된다. 이에 대한 현재의 해결책으로 양수발전소를 이용하고 있다. 그런데 이 양수발전기는 부지선정에 한계가 있고 또한 손실이 매우 커서 효율(65~70%)이 나쁘기 때문에 에너지 절약을 위해 초전도 자석에 의한 에너지 저장이 매우 유력한 방법으로 주목되고 있다. 초전도 코일은 전기한 바와 같이 전기저항이 없어 그 시정수가 무한대가 되어 영구

〈표 4〉 Alstoms사 試作 220 kVA 초전도 변압기의 종래품과의 특성 비교

提 示	超電導器	從來器
자속밀도	1.8 T	1.5T
철손(상온공간)	100W	694W
강 손	4 W×500	1,733W
용기도입선에 의한 열철입손	2 W×500	-
전중량	100kg	1,000kg
전손실	1,300W	2,400W
효 율	99.4%	98.9%
단락전류배수	1.5	15

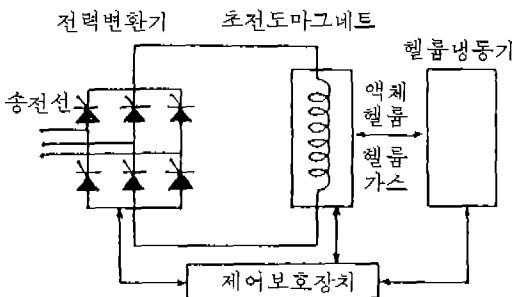


〈그림 14〉 WH사의 초전도 변압기와 종래품의 가격과 중량비교

전류가 가능하게 된다. 따라서 영구히 자기 에너지 ($1/2LI^2$)로서 전력을 직접 저장할 수 있다. 그림 15는 초전도 에너지 저장장치 구성을 나타낸 것으로 송전선과 연결된 전력변환기와 자기 에너지를 저장하는 초전도 마그네트 및 초전도 상태를 유지시켜 주기 위한 냉각 시스템으로 구성된다. 전력변환기는 Thyristor로 사용하기 때문에 점호각에 따라 저장 모드(점호각: $0^\circ \sim 90^\circ$)와 방출모드(점호각: $90^\circ \sim 180^\circ$)를 자유롭게 조정할 수 있을 뿐만 아니라 속응성도 우수하다.

이와같은 장점 때문에 미국, 일본 등 선진국에서 연구를 시작하여 많은 성과를 거두고 있다. 특히 미국은 1970년 Wisconsin 대학에서 이 장치 연구개발에 착수, 양수규모의 대용량 저장장치 (5,500MWh)를 암반에 설치함을 제안한 바 있고 이와 관련한 분야의 연구업적을 쌓아 초전도 저장장치 연구의 효시가 되었다. 특히 BPA의 타고마 변전소에 30MJSMES를 제작하여 실제 통에 적용, 무효전력과 유효전력을 조정하여 계통안정화 효과를 확인한 바 있다. 한편 미국의 EPRI에서 1982년에 행한 경제성 평가에 의하면 이 장치의 경제분기점 투자비(Break Even Captical Cost)는 최대 1,570\$/kW, 평균 900\$/kW이며 최근 질소냉각으로 가능한 초전도체의 발견으로 이 Cost는 상당히 절감될 것으로 예측된다.

이 저장장치는 사용용도에 따라 분류해 보면 양수발전규모의 대전력 저장용 뿐만 아니라 고속 속응성을 이용하면 전력계통의 피크세이빙이



〈그림 15〉 초전도 저장장치의 구성

외에 부하의 급증감시나 사고시 등의 순동에 비력으로, 즉 계통안정용으로나 주파수 조정 또한 무효전력 조정용으로 기능을 발휘할 수 있어 전력의 질적향상에 크게 기여할 것으로 본다.

현재 추세로 볼 때 그림 16에서 보는 바와 같이 2010년경에 실용화될 것으로 보이며 일본의 경우 1986년부터 Pilot시험용인 30MJ SMES를 초전도 연구회의 주관으로 건설을 시작한 바 있고 미국도 Wisconsin대학을 주축으로 20MWh를 시험프랜트로 진행시키고 있다. 고온초전도체의 선재화, 코일 체적설계에 따른 경비절감, 냉각 장치에 관한 연구개발을 통하여 성능이 향상되면 실용화시기는 한층 앞당겨 질 것으로 기대된다.

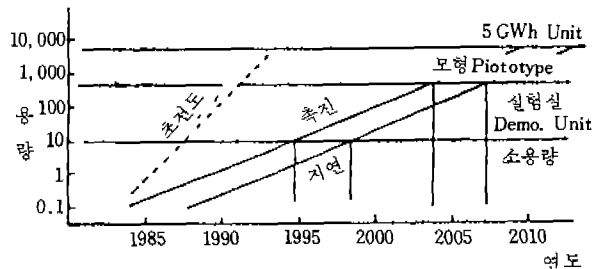
이상에서 서술한 초전도전력응용기기의 기술 개발과 과제를 요약하면 표 5와 같다.

마. 其他應用分野

초전도응용은 서술된 전력계통 적용분야 외에도 실험, 실용화 가능성 및 실용화된 분야로는 초전도 마그네트를 이용한 자기 부상열차, MHD 발전, 핵융합전원, 선박 추진, NMR진단기 등에 이용되고 있다.

5. 結 論

앞에서 서술한 바와 같이 초전도분야 연구 추세로 보아 초전도체 특징을 이용하는 전력계통 분야에 조기적용이 확실해졌다. 특히 미국 C.W.



〈그림 16〉 SMES의 개발 전망

〈표 5〉 초전도 전력응용기기의 기술개발과 과제

적 용 기 기	초 전 도 화 의 장 점		과 제	산화물계 초전도(액체질소냉각)의 효과	
	협 의 의 장 점	광 의 의 장 점			
발 전 기	저속응여자 초속응여자 (계자권선)	· 효율향상 (0.5~1.0%) · 소형화 (50%) · 경량화 (50%)	안정도 향상 (초속응여자 1.7배)	· 회전자 구조 전자자 냉각 · 계자권선의 기계적· 전기적 안정성 · 고정자권선의 기계적· 전기적 안정성	· 회전자구조가 일부간략화되어 구조상 문제점이 경감된다 · 냉동기효율이 50배이상 향상 · 발전기효율이 0.03% 향상
	완전초전도 (계자권선) (전자자권선)	· 효율향상 (0.8~1.3%) · 소형화 · 경량화			
변 압 기		· 효율향상 (0.1~0.2%) · 경량화 (60%) · 소형화 (40%)	고장전류억제	· 전자력 · 절 연 · 권선구조 · 냉 각 · quench시의 운전 방식	· 기기구조간략화(절연면에서도 유리) · 냉각효율향상
교류케이블		· 효율향상 500kV 5 GVA에서 손실이 OF cable의 1/10 · 소형화(상기경우 1/4) · 제조한계용량의 확대	· 허용송전거리의 장거리화 · 전력계통대전류화 저전압화	· 케이블 구조 · 전자력 열수축 고장전류	· 단열구조, 냉각시스템 간략, 건설비 대폭절감 → 경제성의 성립범위가 확대 · 냉각효율 향상
전 력 저 장			· 고효율전력저장 (90% 이상) · 안정도향상 · 한계전력용량증대	· 전자력(암반지지) · quench 대책 · 자기필드	· 단열구조간략화, 건설비저감 · 냉각효율 향상

(주 1) 협의의 장점: 적용기기 자체로서 현기기와 비교할 때의 장점

(주 2) 광의의 장점: 적용기기를 전력시스템에 사용하였을 때의 장점

Chu 교수팀의 액체질소로 냉각이 가능한 초전도체 발견과 일본 오하라 교수팀의 상온(섭씨 14도) 초전도체의 제조 성공은 1948년 트랜지스터 발견으로 현대사회에 영향을 미친 것 만큼이나 전기 분야에 많은 영향을 초래할 것으로 보인다. 이는 선진각국에서 공학분야 조기실용화를 위해 이에 대한 연구와 기기개발을 활성화 시키는 기폭제 역할을 할 것이 분명하고 현재에도 실용화 단계에 접어든 것도 있다. 현재 우리나라의 연구실정을 살펴보면 기술연구원에서 서울 대학교의 협조로 소규모 (25KJ) 초전도저장장치에 관한 3단계 연구중 2단계 연구를 완료했으며, 한국 표준연구소에서는 소규모 응용 기초분야, 한국 과학기술원에서 NMR를 이용하는 연구 및 대학

에서 초전도 재료분야의 기초연구등이 초보적인 단계에 있는 바 국가적으로는 물론 한국전력에서도 대전력 계통 응용분야에 매우 큰 장점이 있기 때문에 이에 대한 관심을 기울여야 할 것으로 생각된다. 특히 초전도 및 응용기술은 전기, 전자, 기계, 금속, 물리, 화학, 극저온 기술 등 많은 전문지식을 필요로 하고 전력계통 응용분야 초전도 기술은 막대한 연구개발비가 투자됨에 따라(일례로 MHD발전시나리오는 15억불 소요)연구소 상호간의 협력은 물론 국가적으로 초전도 종합기술을 확립하기 위한 연구소 설립, 연구분야, 투자방법 및 국내외적으로 협조체제를 구축하여 연구 개발에 착수, 초전도시대에 대비해야 할 것이다.