□ 特輯 : 超電導 □

超電導 交流發電機의 現況

韓 松 曄*

□ 차 례 □

1. 序 論
2. 超電導交流發電機의 구조
2.1 回転子
2.2 回転子 차례
2.3 電機子
2.4 界磁電流 導入線
3. 超電導 發電機의 특징
4. 開發現況
5. 結 論
參 考 文 獻

1 序 論

전력수요의 증가에 따라 大単位容量발전기에 대한 요구가 점차 늘어가고 있다. 그러나 냉각기술, 재질의 강도 등의 문제로 발전기의 단위용량에 한계점이 보이고 있다.

대형기로 갈 수록 同期 리액턴스가 증가하여 계통의 安定度가 떨어지게 되는데 이를 방지하기 위하여는 발전기의 공극을 증가시켜야 한다. 그런데 공극을 증가시키면 계자의 기자력이 커져야 하고 따라서 界磁巻線의 손실이 증가하고 발전기의 전체效率이 떨어져서 대형기의 이익이 없어진다. 이와 같은 현상은 별써 1000MVA 급에서 나타나기 시작한다.

회전자의 원심력 때문에 回転子 직경은 터빈 발전기의 경우 1.3m 이상은 매우 어렵고 따라서 출력을 증가시키려면 길이를 증가시켜야하는데 이것도 회전자의 진동관계로 10m를 초과하기 어렵다. 이와 같은 제한하에서는 최대 단위용량은 약 2000 MVA로 제한된다. [1]

전기자권선의 절연관계로 발전기 출력전압은 약30KV가 최대인데 이경우 2000MVA 발전기의 線電流는 40KA 정도가 된다. 따라서 발전기에서 승압변압기사이의 전기설비가 고가로된다.

또 발전기의 重量이 증가함에 따라 수송상의 제한을 받게 되므로 발전기를 현장에서 조립하여야 되고 따라서 발전기 가격이 증가하게 된다.

이상과 같은 문제점들을 근본적으로 해결하기위하여는 현재의 발전기構造 및 材料개발로는 불가능하다는 것이 예견되었다. 이에 대한 해결방안으로 초전도 계자권선을 가진 발전기가 제안되었다. [2),3),4)]

초전도 발전기 원리의 실증을 위하여 여러 연구기관에서 소형발전기를 시험제작[5)] 하였고 오늘날 에 와서는 그 실용성이 확실히 입증되어 프로터 타이프기의 제작에까지 이르고있다.

超電導 交流発電機에는 여러 종류의 구조가 있는데[6)~9)] 본 해설에서는 현재 가장 많이 개발되고 있는 2중 차폐형 단일 회전자[10)] 발전기에 대하여 중점적으로 취급한다. 먼저 그 구조를 설명하고 超電導 交流発電機의 특징을 다루며 현재 개발현황을 소개하기로 한다.

2 超電導 交流發電機의 구조

현재 세계 각국에서 개발하고있는 超電導 交流発電機의 구조를 보면 그림 1과 같다. 회전계자형으로 되어 있기때문에 回転子의 界磁巻線이 超電導線으로 되어 있으며 電機子는 현재의 교류발전기와 같이 固定되어 있다.

*正會員 : 서울大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博

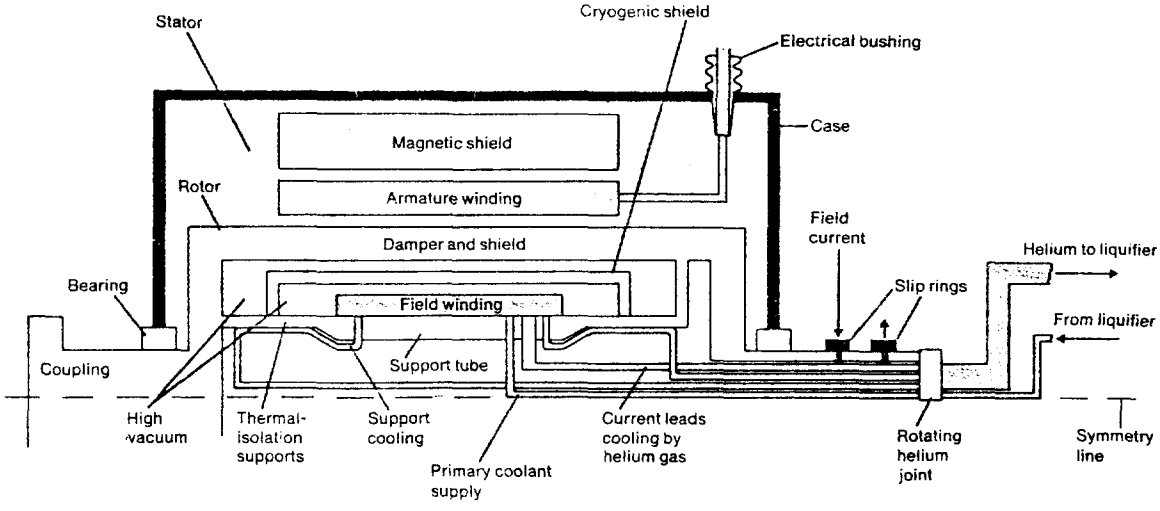
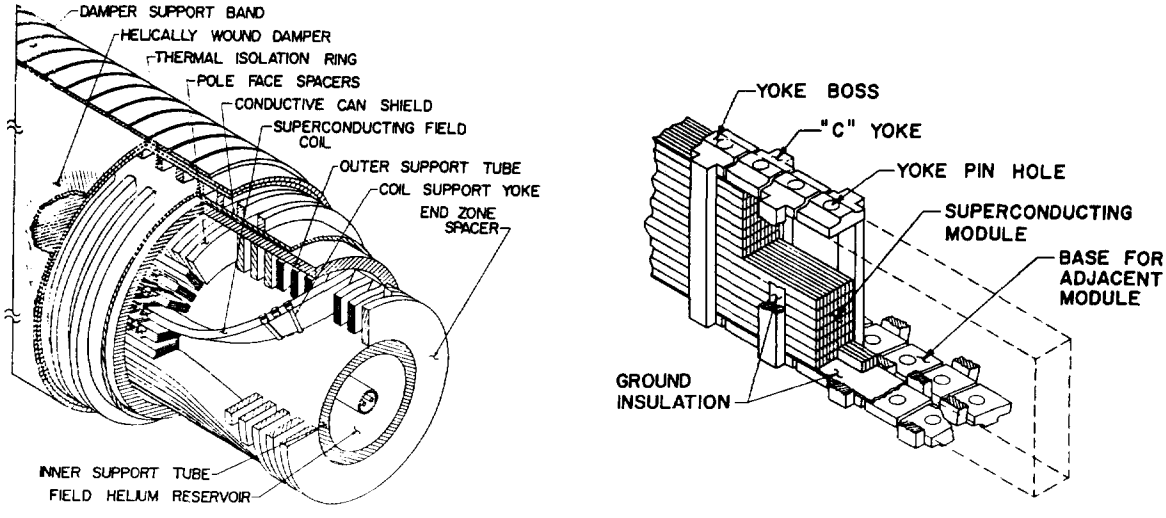


그림 1. 超電導 交流 發電機의 斷面圖



(a) Isometric Section of Rotor (b) Superconducting Coil Module

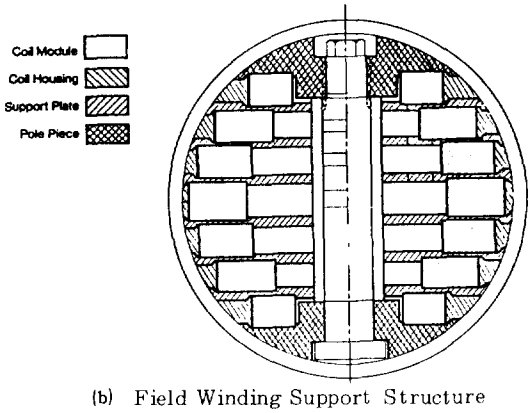
그림 2. 미국의 EPRI 와 Westinghouse 가 개발중인 300 MVA 초전도 발전기의 회전자

2·1 回転子

超電導 界磁巻線은 속이빈 支持銅管 (torque tube 또는 Support tube) 위에 여러개의 型巻을 조립하여 이루어 지는데 導線으로서는 Nb Ti 필라멘트를 꼬아서 銅 마트릭스내에 넣은 超電導線을 사용한다. 그림 2는 미국의 EPRI와 Westinghouse 가 공동으로 개발중에 있는 300 MVA 超電導 交流 発電機의 回転子를 나타낸다. 內部 支持管(Inner support tube) 위에 초전도 계자 코일 (Superconducting field cail) 을 설치하고 그 위에 外部 支持管(Outer support tube) 을 씌워서 코일이 움직이지 않도록 고정시키고 있다. 그림 3은 미국의 General Electric 사가 설계한 300 MVA 초전도 발전기의 回転子 구조를 나타낸다. Racetrack 형의 型巻을 여러개 만들어 이것을 支持管 (Torque tube) 내에 넣어서 만든 것이다.

界磁巻線은 약 4～5K의 超低温으로 유지 되어야 하는데 이것은 회전자 軸을 통하여 들어오는 액체헤리움으로 냉각된다. 액체헤리움은 발전기가 터어빈과 연결되는 커플링의 반대측 軸에 헤리움 연결기구 (Rotating helium joint) 를 설치하에 그축 내부를 통하여 공급되고 기화된 헤리움도 이 축내부를 통하

(a) Racetrach Winding Concept



(b) Field Winding Support Structure

그림 3. 미국의 GE사가 설계한300 MVA 초전도 발전기의 회전자

여 밖으로 나각게 된다.

支持鋼管의 양단은 常溫의 구조물에 기계적으로 연결됨으로 이 부분을 통한 熱손실을 최소한으로 줄여야 하는데 이 부분을 熱절연지지편 (Thermal isolation support 또는 Thermal distance piece)이라 하고 이곳도 액체헬리움으로 냉각시켜 界磁巻線의 온도 상승을 막고 있다.

超電導線의 電流密度는 보통 100~150A/mm^2 정도이고 回転子 中心部에서의 磁束密度는 5 ~ 7 Tesla정도이다. 界磁巻線과 電機子巻線 사이의 간격(air gap)이 매우 크기 때문에(300MVA 경우 30cm정도가 됨) 電機子 巻線에서의 자속밀도는1~1.5Tesla 정도가 된다.

2·2 回転子 차폐

界磁巻線이 超低温을 유지하게 하기 위하여회전자를 熱的 및 磁氣的으로 차례를 한다. 우선 熱損失을 막기위하여 계자권선 외측을 진공(Vacuum)으로 만든다. 이와 같이 하여도 常温부분과 界磁巻線 사이에는 輻射에 의한 열손실이 있으므로 계자권선의 저온 유지가 어렵게 된다. 그리하여 진공부분의 중간에 熱傳導率이 좋은 銅 또는 알루미륨 차폐를 설치하여 輻射熱을 회전자의 양단으로 바이패스 시키고 있다.

이 차폐막 (Cryogenic shield)의 온도는 70~100 K 정도이며 여기서 부터 4K 부분으로 輻射되는 熱은 매우 적어서 전체적인 냉각효과가 높아진다.

超電導線에서는 자체 電流에 의한 抵抗損失은 거의 없다. 그러나 電機子에서의 불평형전류에 의한逆相磁束, 전기자 권선의 스페이스 하모닉스에 의한 고조파 자속, 負何변동에 의한 과도자속 등 非同期磁束이 回転子에 加하여 지면 超電導線에서 損失이 생기게 되고 따라서 초전도선의 온도를 상승시키는 원인이 된다. 이와 같은 현상을 막기위하여 계자권선 외부에 電磁차례를 실시한다. 이 차폐막 (Electro-magnetic shield)은 導電率이 높아야 하므로 銅 또는 알루미륨管을 사용하게 된다.

이 電磁차례막의 時定数는 위에서 열거한 非同期磁束을 차폐하는 입장에서 볼때 그 값이 클 수록 좋다. 그러나 發電機의 단자전압을 조정할 때는 界磁電流를 변화시켜야 하는데 이때 그 速應性이 떨어져서 過渡特性이 저하한다. 이와 같은 상호 배반적 요구때문에 이차례막의 時定数는 적당한 값을 택하여야 하는데 보통 2 see를 취하고 있다[11]

이상의 두 차례막은 각각 별도로 설치되는 경우와 하나의 차례막으로 두개의 기능을 다하게 하는 경우가 있는데 후자의 경우에는 熱電磁차례(Electrothermal shield)라고 부른다.

回転子에는 외측표면에 制動管(Damper shell)이 설치되어 발전기에서 부하변동이 생겼을때 回転子의 진동이 빠리 감소되도록 하고 있다. 이것은 현재 同期機에서 制動巻線에 해당하는 것으로서 制動作用을 잘하게 하기위한 時定数는 약 0.1see. 정도이다. 여기서 制動管은 물론 電磁차폐의 역활도 하고 있으나 時定数가 짧아서 큰 효과가 없다.

2·3 電機子

電機子는 電機子巻線과 磁氣차폐로 이루어 진다. 앞에서도 설명한 바와 같이 超電導 發電機에서는 界磁에서의 起磁力이 매우 크기 때문에 電機子巻線에서 필요한 1~ 1.5 Tesla의 磁速密度를 얻기 위하여 磁氣回路에 磁性體를 사용할 필요가 없다. 그러므로 電機子의 구조가 현재의 發電機와 매우 다르게 되어있다.

電機子 巻線사이에는 현재의 발전기에서와 같이磁氣回路의 자기저항을 줄이기 위한 규소강판의 齒(Teeth)가 없다. 따라서 전기자 권선은 별도로 제작하여 継鐵 (Yoke, Back iron 또는 Magnetic shield) 의 내부에 끼워넣게 된다. 그림 4는 西獨의 Kraftwerk Union AG가 설계한 電機子의 단면을 나타

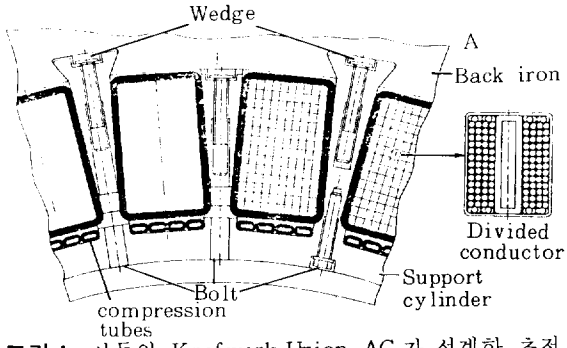


그림 4. 서독의 Krafwerk Union AG가 설계한 초전도 발전기의 전기자 구조

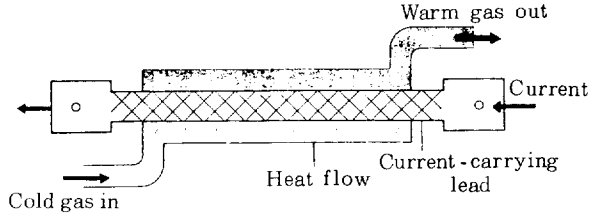


그림 5. 界磁卷線 리이드선의 냉각

낸다. 電機子 卷線은 현재의 발전기에서와 같이 銅線을 사용하고 냉각은 물로써 하고 있다. 卷線에 발생하는 電磁力에 의한 권선의 움직임을 막기위하여 권선들을 플라스틱으로 고정하고 이것을 다시 도브테일형 플라스틱 스페이서를 이용하고 継鐵에 고정시킨다.

継鐵은 규소강판을 적층하여 만드는데 磁氣回路의 저항을 감소시켜주는 역활을 하지만 磁力線이 발전기 외부로 발산해 나가는 것을 방지하는 역활을 한다. 그래서 이것을 磁氣차폐(Magnetic shield 또는 Environmental shield)라 부를때가 더 많다.

2·4 界磁電流 導入線

超電導 발전기에서 界磁電流는 현재의 발전기에서와 같이 회전자 축에 슬립링을 설치하고 이를 통하여 외부 여자기에서 공급된다. 슬립링에서 超電導界磁卷線사이에는 銅線(Lead)으로 연결되어 있다. 그런데 이 선에는 많은 열이 발생하므로 이에 대한 냉각이 중요하다. 그림 5는 리이드선의 냉각 방법을 나타낸다. 일단 초전도 계자권선을 냉각하고 나온저온 헬륨가스를 리이드선의 電流出口 쪽으로 넣어서 이 가스가 리이드선을 따라 電流入口 쪽으로 흐르면서 이 리이드선을 냉각시키고 있다.

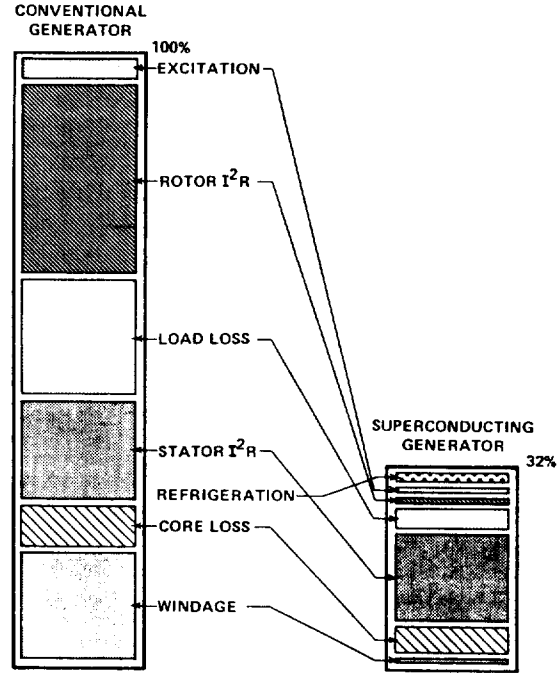


그림 6. 1200 MVA 저압 교류발전기의 손실비교

3 超電導 發電機의 특징

대형 초전도 교류발전기의 이점을 들어보면 아래와 같다.

(1) 손실 감소
(2) 성능 향상
(3) 고전압 기기 가능
(4) 소형 경량화
(5) 가격 지하
(6) 대용량화 가능성

등을 들 수 있다.

1200 MVA급 발전기에 있어서 손실을 비교하여 보면 그림 6과 같다.[12] 초전도 발전기에서는 界磁卷線에 超電導線을 사용함으로 쥬울열 손실이 거의 없다. 또 回転子는 이미 냉각되어 있으므로 현재의 발전기에서와 같은 通風損失이 매우적어 진다. 물론 초전도체를 低温으로 유지하기 위한 헤리움 冷凍機 人力電力은 필요하지만 이것은 그리 크지 않다. 그러므로 전체적으로 보았을때 손실이 $\frac{1}{3}$ 정도로 감소하게 된다.

超電導 發電機는 界磁 起磁力이 매우 크기 때문에 回転子에는 磁氣材料가 없다. 그래서 초전도 발전기는 空心機(Ain-core machine)라고도 한다. 이와 같은 기계에서는 電機子卷線과 界磁卷線사이의 결합계수가 낮아서 同期 리액턴스가 매우적어 진다.

표 1. 1200 MVA 초전도 발전기의 電氣的 特性

形　　式	超電導形	現在形
電　　圧〔kV〕	29	26
X_d	0.221	1.810
X_d'	0.151	0.320
X_d''	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〔%〕	99.690	98.590

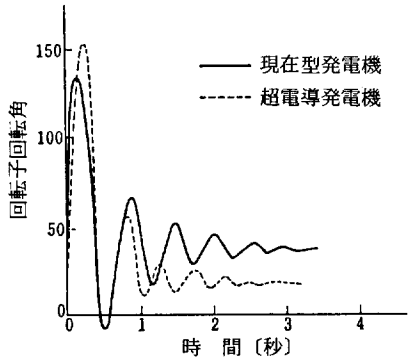


그림 7. 초전도 발전기의 진동감쇠 특성

표 1은 1200 MVA 발전기 전기적 특성을 비교한 것이다. 동기리액턴스가 매우 낮기 때문에 초전도발전기에서는 정격 MVA 내에서는 定態安定度에 제한이 없다.

또한 과도리액턴스도 적기 때문에 CFCT가 크게 되어 계통의 고장에 대하여 계통과의 동기성이 좋아 過渡安定度가 개선된다.

앞에서 설명한 바와 같이 초전도 발전기의 회전자에는 제동관(Damper shell)이 있어 제동작용을 증진시켰는데 그림 7에서 보는 바와 같이 초전도 발전기의 경우가 제동작용이 약간 우세하다. 또한 제동관을 사용하므로써 정상 운전시 不平衡電流(I_2)에의한 $I_2^2\,t$ 耐量을 높혀주는 효과도 얻고있다.

超電導 發電機의 제조단가를 보면 그림 8과 같다[13] 低壓 초전도 발전기의 경우는 300 MVA 급이상에서, 高壓 초전도 발전기의 경우는 1200 MVA 급 이상에서 그 제조 단가가 현재의 발전기보다 저렴하게됨을 알 수 있다. 초전도 발전기는 발전기의 저렴한 것외에 효율이 높기 때문에 운전·유지비에 있어서도 매우 유리한데 예를들어 1000 MW급 초전도 발전기의 이득을 보면 표 2와 같다[13]. 효율이 0.5 % 증가하는

표 2. 1000 MW 초전도 발전기의 경제성 검토

($/KW, 1985년현재가격)

연 료 종 별	중 유	석 탄	원 자 력
발전소 건설비	500	800	1000
연료비(mills/KWH)	30	26	11
발전기 가격	17.80	17.80	25.60
이익 ($\Delta\eta = 0.5\%$)	11.61	11.70	12.20
(1) 발전소 건설비	2.50	4.00	5.00
(2) 발전기 제조비	3.29	3.29	4.73
(3) 연료비	5.29	2.53	1.94
(4) 운전	0.53	0.88	0.53
이익/발전기가격(%)	65.00	66.00	48.00
이익/발전소 건설비(%)	2.32	1.46	1.22

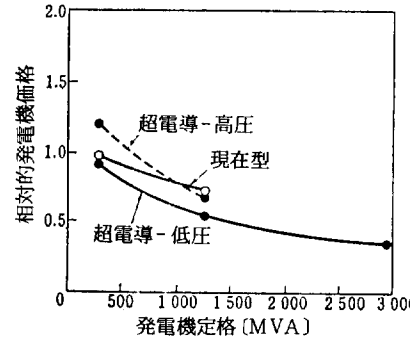


그림 8. 각종 발전기의 제조가격 비교

경우에 대한 비교표인데 KW당 약 12 $의 이익이 있고 이것은 발전소 건설비의 1.22 ~ 2.32 %의 비율을 차지하고 있다.

이 이외에도 초전도 발전기는 길이 및 중량에 있어 약 $\frac{1}{3}$(1200 MVA급)의 감소를 볼 수 있어 수송비의 절감, 자재절약, 건물공사비의 절감을 기할 수 있다. 또한 電機子 巻線이 계철과 별도로 제작되기 때문에 발전기에서 직접 154 KV를 얻을 수 있어 출력승압 변압기를 생략할 수 있으며 大單位容量 발전기의 제작 가능성도있어 앞으로 수 천만 KW급 발전기의 출현도 가능하리라 믿는다. 그림 9는 1000 MW급 초전도 발전기의 효과를 요약한 것이다.

4 開發現況

문헌〔5〕에서 보는 바와 같이 超電導 交流 發電機는 1960년대 후반에 들어와서 미국에서 처음으로 시험제작에 들어갔다. 그후 소련, 불란서, 일본 등에서 개발에 착수하여 현재 일본에서는 50 MVA 급

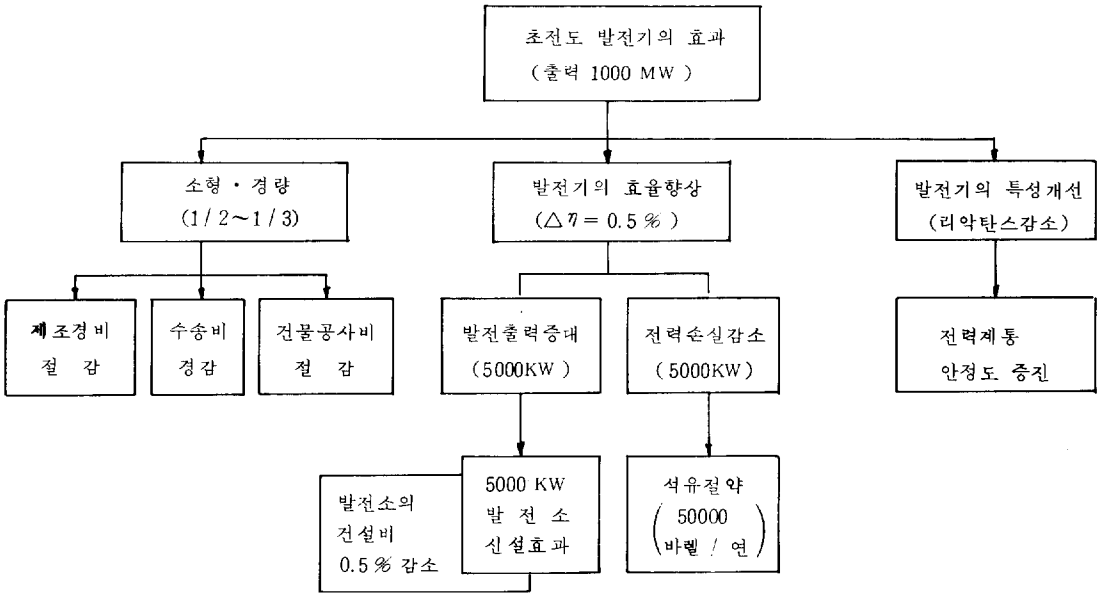


그림 9. 초전도 발전기의 효과 분석도

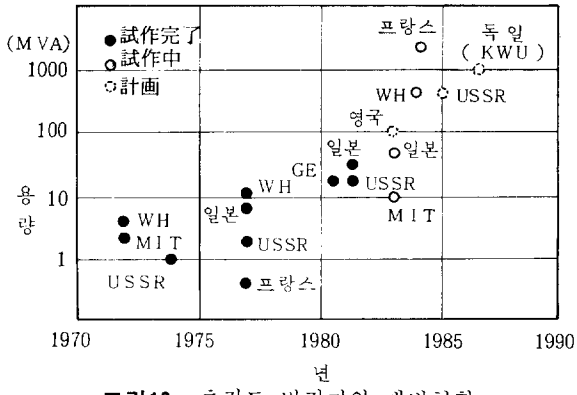


그림10. 초전도 발전기의 개발현황

발전기, 미국에서는 300MVA급 발전기가 試作중에 있다. 그림 10은 초전도 발전기의 개발실적 및 계획을 나타낸다.

미국에서는 MIT공과대학이 超電導 發電機의 연구개발에 선도적 역활을 하고 있는데 1969년에 45 KVA, 1973년에 3MVA발전기를 제작 시험하였고 현재에는 10MVA발전기를 試作중에 있다. Westinghouse는 1973년에 5MVA, 1978년에 10 MVA발전기를 제작하였고 현재는 EPRI의 지원을 받아 용량 300MVA, 2극, 60HZ, 3상, 24KV, 효율 99.4%, 길이 3.5m, 폭 3.4m, 높이 6.4m, 중량 159ton, 회전자 직경 1m의 발전기를 제작중에 있으며 1984년에 시험에 들어갈 것이다. 그리고 GE사에서는 20MVA기를 제작한 바 있다.

소련은 1970년대에 1MVA, 2MVA 발전기를 개발한 바가 있으며 1980년 초에 미국의 GE사와 공동연구를 통하여 20MVA동기조상기를 제작하여 시험을 마쳤다. 이것을 기초로 하여 곧 300MVA 급 프로토타이프기의 개발계획을 확정지으려고 한다.

프랑스에서는 알스톰사가 EDF의 지원을 받아 직경 1m의 모델 회전자를 완성하여 1980년 부터 2년간에 걸쳐 技術試驗을 마쳤다. 이것은 앞으로 1~2 GVA급 발전기의 回転子로 쓰일 것이다.

일본에서는 미쯔비시 및 후지에서 통산성 중요기술 개발비보조로 1974년 부터 3년간 6MVA 초전도 발전기를 試作하여 超電導 發電機의 원리의 실증, 문제점의 발견 등의 기본적 문제를 다루었다. 연구의 제2단계로 1977년 부터 5개년 계획으로 30MVA초전도 동기 조상기를 제작하여 현재 시험중에 있다. 이와는 별도로 현재 히다찌에서 50MVA 발전기가 개발되고 있다.

국내에서는 超電導 發電機에 대한 理論的 연구가 있을뿐 실제 제작은 하지 못하고 있다. 그러나 1983년 말경에는 서울대학교 공과대학에서 액체 헬륨의 발생이 가능하게 될예정이고 이렇게 되면 발전기의 試作도 가능하게 된다. 현재 1MVA급 超電導 發電機의 개발계획을 수립중에 있는데 아직 국내 업계 및정

부의 이해가 부족하여 계획확정이 어려운 실정이다.

5 結 論

超電導 玄流 發電機는 性能 및 經濟性으로 볼때 현재의 발전기 보다 우수하며 앞으로 大單位容量機의 可能性도 커서 세계의 선진각국에서 다투어 연구개발하고 있으며 1990년대에는 수 1000MVA급 초전도 발전기의 實用化가 확실시 되고 있다. 이에 반하여 국내에서는 아직도 超電導性 應用技術에 대한 연구가 부진하여 앞으로 닥아올 초전도 시대에 대한 대비가 전무한 실정이다. 국내 重電機분야의 기술혁신을 통한 선진화작업으로서 超電導性 應用에 대한 연구에 정부 및 기업의 적극적인 뒷바침이 있어야 하겠다.

參 考 文 獻

1) E. Spooner; "Fully slotless turbogenerators", Proc. IEE, Vol. 120, no. 12, pp. 1507-1518, December 1973.

2) H. H. Woodson, J. L. Smith Jr., P. Thullen and J. L. Kirtley; "The application of superconductors in the field winding of large synchronous machine", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-90, no. 2, pp. 620-627, March/April 1971.

3) H. O. Lorch; "Feasibility of turbogenerator with superconducting rotor and conventional stator", Proc. IEE, Vol. 120, no. 2, pp. 221-227, February 1973.

4) M. J. Jefferies, E. E. Fibbs, G.R. Fox, C.H. Holley and D. M. Willeyoung; "Prospects for superconductive generators in the electric utility industry", IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-92, no. 5, pp. 1659-1669, Sept./October 1973.

5) J.L. Smith Jr.; "Application of superconductors to A. C. generators", Fifth International Conference on Magnet Technology, Rome, April 21-25, 1975.

6) Song Y. Hahn, A. Mailfert, A. Rezzoug and L. Boyer; "Transient performances of superconducting three element synchronous machine", Applied superconductor conference, Paper No. LB-6, Pittzbourgh U.S.A. September 1978.

7) Song Y. Hahn, A. Mailfert and A. Rezzoug; "Transient performances of superconducting alternator with damper winding", IEEE PES Winter Meeting, Paper No. A 79010-0, New York, U. S. A., February 1979.

8) Song Y. Hahn, A. Mailfert and A. Rezzoug; "Inertial damping of superconducting three element alternator", IEEE PES Summer Meeting, Paper No. A 79420-1, Bancouver, British Columbia, Canada, July 1979.

9) J. L. Kirtley, Jr.; "Armature motion damping of superconducting generators", IEEE PES Summer Meeting, Paper No. A 79012-6, New York U. S. A., February 1979.

10) D.C. Luck and P. Thullen; "Double shielded superconducting field winding", US Patent No. 3764835, October 1973.

11) J. L. Kirtley and M. Furuyama; "A design concept for large superconducting alternators", IEEE PAS, Vol. PAS-94, No. 4, pp. 1264-1269, July/August 1975.

12) C. Flick et al; "General design aspect of a 300 MVA superconducting generator for utility application", IEEE MAG., Vol. MAG-17, No. 1, pp. 873-879, January 1981.

13) J. S. Edmonds; "Super conducting generator technology - An overview", IEEE MAG., Vol. MAG-15, No. 1, pp. 673-679, January 1979.