

超傳導 交流發電機의 開發現況과 問題點*

韓 松 晔

서울대학교 電氣工學科 教授

1. 머리 말

전력수요의 증가에 따라 대단위용량 발전기에 대한 요구가 점차 늘어가고 있다. 그러나 냉각 기술, 재료의 강도 등의 문제로 발전기의 단위용량 증가에 한계점이 보이고 있다.

대형기로 갈수록 동기 리액턴스(reactance)가 증가하여 계통의 안정도가 떨어지게 되는데 이를 방지하기 위하여는 발전기의 공극을 증가시켜야 한다. 그런데 공극을 증가시키면 제자(field)의 기자력이 커져야 하고 따라서 제자권선(field winding)의 손실이 증가하고 발전기의 전체 효율이 떨어져서 대형기의 이익이 없어진다. 이와같은 현상은 벌써 1000MVA 급에서 나타나기 시작한다.

회전자의 원심력 때문에 회전자 직경은 터어빈 발전기의 경우 1.3m 이상은 매우 어렵고 따라서 출력을 증가시키려면 길이를 증가시켜야 하는데 이것도 회전자의 진동관계로 10m를 초과하기 어렵다. 이와같은 제한하에서는 최대 단위용량은 약 2000MVA로 제한된다⁽¹⁾.

전기자권선(armature winding)의 절연관계로 발전기 출력전압은 약 30kV가 최대인데 이 경우 2000MVA 발전기의 선전류는 40kA 정도가 된다. 따라서 발전기에서 증압변압기 사이의 전기설비가 고가로 된다.

또 발전기의 중량이 증가함에 따라 수송상의 제한을 받게되므로 발전기를 현장에서 조립하여야 되고 따라서 발전기 가격이 증가하게 된다.

이상과 같은 문제점들을 근본적으로 해결하기 위하여는 현재의 발전기 구조 및 재료개발로는 불가능하다는 것이 예견되었다. 이에 대한 해결 방안으로 초전도 제자권선을 가진 발전기가 제안되었다⁽²⁻⁴⁾.

초전도 발전기 원리의 실증을 위하여 여러 연구기관에서 소형발전기를 시험제작⁽⁵⁾ 하였고 오늘날에 와서는 그 실용성이 확실히 입증되어 프 로터 타이프기의 제작에까지 이르고 있다.

초전도 교류발전기에는 여러 종류의 구조가 있는데⁽⁶⁻⁹⁾ 본 글에서는 현재 가장 많이 개발되고 있는 2중 차폐형 단일 회전자⁽¹⁰⁾ 발전기에 대하여 중점적으로 취급한다. 먼저 그 구조를 설명하고 초전도 교류발전기의 특징을 다루며 현재 개발현황을 소개하기로 한다.

2. 초전도 교류발전기의 구조

현재 세계 각국에서 개발하고 있는 초전도 교류발전기의 구조를 보면 그림 1과 같다. 회전 제자형으로 되어 있기 때문에 회전자의 제자권선이 초전도선으로 되어 있으며 전기자는 현재의 교류발전기와 같이 고정되어 있다.

2.1 회전자

초전도 제자권선은 속이빈 지지동선(torque tube 또는 support tube) 위에 여러개의 형권(former-wound)을 조립하여 이루어 지는데 도선으로서는 Nb Ti 필라멘트를 꼬아서 동 매트릭스내에 넣은 초전도선을 사용한다. 그림 2는 미국의 EPRI와 Westinghouse사가 공동으로 개발중에 있는 300MVA 초전도 교류 발전기의 회

* 이 글은 1987년도 본 학회 열 및 유체역학부문 학술강연회(5.30)에서 강연한 내용임.

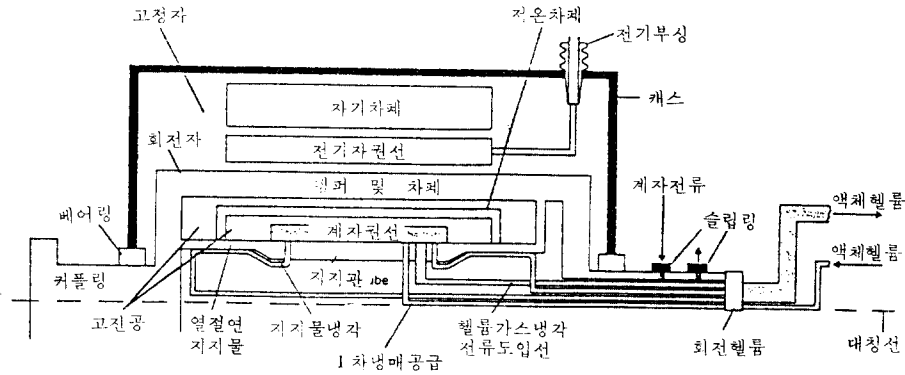


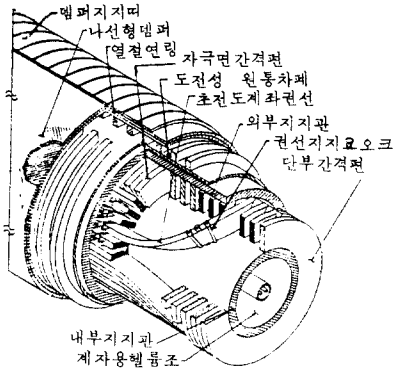
그림 1 초전도 교류 발전기의 단면도

전자를 나타낸다. 내부 지지선(inner support tube) 위에 초전도 계자 코일(superconducting field coil)을 설치하고 그 위에 외부 지지선(outer support tube)을 씌워서 코일이 움직이지 않도록 고정시키고 있다. 그림 3은 미국의 General

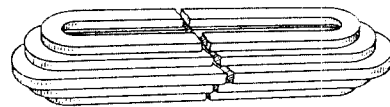
Electric 사가 설계한 300MVA 초전도 발전기의 회전자 구조를 나타낸다. Racetrack 형의 형편을 여러개 만들어 이것을 지지관(torque tube) 내에 넣어서 만든 것이다.

계자권선은 약 4~5K의 초저온으로 유지 되어야 하는데 이것은 회전자 축을 통하여 들어오는 액체 헬륨으로 냉각된다. 액체 헬륨은 발전기가 터빈과 연결되는 커플링의 반대 측 측에 헬륨 연결기구(rotating helium joint)를 설치하여 그 측 내부를 통하여 공급되고 기화된 헬륨도 이 측내부를 통하여 밖으로 나가게 된다.

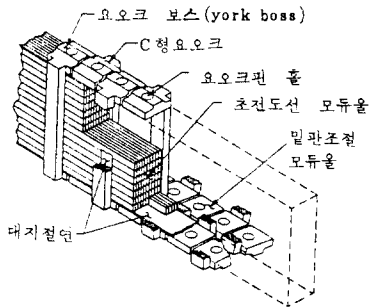
지지강관의 양단은 상온의 구조물에 기계적으



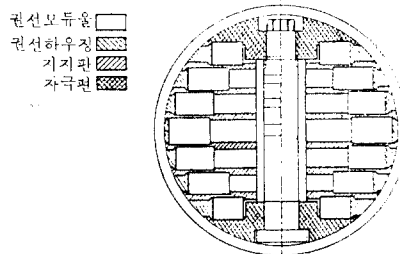
(a) 회전자 단면도



(a) 레이스 트랙(race track) 권선개념



(b) 초전도 코일 모듈



(b) 계자권선 지지구조

그림 2 미국의 EPRI와 Westinghouse가 개발중인 300MVA 초전도 발전기의 회전자

그림 3 미국의 GE 사가 설계한 300MVA 초전도 발전기의 회전자

로 연결됨으로 이 부분을 통한 열손실을 최소한으로 줄여야 하는데 이 부분을 열절연지지편(thermal isolation support 또는 thermal distance piece)이라 하고 이곳도 액체헬륨으로 냉각시켜 계자권선의 온도상승을 막고 있다.

초전도선의 전류밀도는 보통 100~150A/mm² 정도이고 회전자 중심부에서의 자속밀도는 5~7 테슬라(tesla) 정도이다. 계자권선과 전기자권선 사이의 간격(air gap)이 매우 크기 때문에(300 MVA 경우 30cm 정도가 됨)전기자 권선에서의 자속밀도는 1~1.5 테슬라 정도가 된다.

2.2 회전자 차폐

계자권선이 초저온을 유지하게 하기 위하여 회전자를 열적 및 자기적으로 차폐를 한다. 우선 열손실을 막기 위하여 계자권선 외측을 진공(vacuum)으로 만든다. 이와같이 하여도 상온부분과 계자권선 사이에는 복사열에 의한 열손실이 있으므로 계자권선의 저온 유지가 어렵게 된다. 그리하여 진공부분의 중간에 열전도율이 좋은 동 또는 알루미늄 차폐를 설치하여 복사열을 회전자의 양단으로 바이패스 시키고 있다.

이 차폐막(cryogenic shield)의 온도는 70~100 K 정도이며 여기서 부터 4 K 부분으로 복사되는 열은 매우 적어서 전체적인 냉각효과가 높아진다.

초전도선에서는 자체 전류에 의한 저항손실은 거의 없다. 그러나 전기자에서의 불평형 전류에 의한 역상자속, 전기자 권선의 스페이스 하모닉스에 의한 고조파 자속, 부하변동에 의한 과도자속 등 비동기자속이 회전자에 가하여 지면 초전도선에서 손실이 생기게 되고 따라서 초전도선의 온도를 상승시키는 원인이 된다. 이와같은 현상을 막기위하여 계자권선 외부에 전자차폐를 실시한다. 이 차폐막(electromagnetic shield)은 도전율이 높아야 하므로 동 또는 알루미늄판을 사용하게 된다.

이 전자차폐막의 시정수는 위에서 열거한 비동기자속을 차폐하는 입장에서 볼때 그 값이 클수록 좋다. 그러나 발전기의 단자전압을 조정할

때는 계자전류를 변화시켜야 하는데 이때 그 속응성이 떨어져서 과도특성이 저하한다. 이와같은 상호 배반적 요구 때문에 이 차폐막의 시정수는 적당한 값을 택하여야 하는데 보통 2초를 취하고 있다⁽¹¹⁾.

이상의 두 차폐막은 각각 별도로 설치되는 경우와 하나의 차폐막으로 두개의 기능을 다하게 하는 경우가 있는데 후자의 경우에는 열전자차폐(electrothermal shield)라고 부른다.

회전자에는 외측표면에 제동관(damper shell)이 설치되어 발전기에서 부하변동이 생겼을때 회전자의 진동이 빨리 감소되도록 하고 있다. 이것은 현재 동기기에서 제동권선에 해당하는 것으로서 제동작용을 잘하게 하기 위한 시정수는 약 0.1초 정도이다. 여기서 제동관은 물론 전자차폐의 역할도 하고 있으나 시정수가 짧아서 큰 효과가 없다.

2.3 전기자

전기자는 전기자권선과 자기차폐로 이루어진다. 앞서서도 설명한 바와 같이 초전도 발전기에서는 계자에서의 기자력이 매우 크기 때문에 전기자권선에서 필요한 1~1.5 테슬라의 자속밀도를 얻기 위하여 자기회로에 자성체를 사용할 필요가 없다. 그러므로 전기자의 구조가 현재의 발전기와 매우 다르게 되어있다.

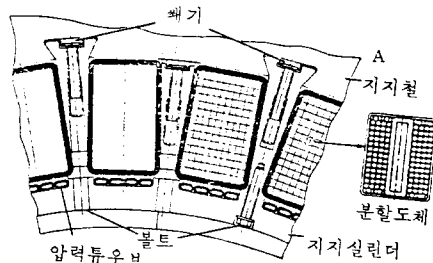


그림 4 서독의 Krafwerk Union AG 가 설계한 초전도 발전기의 전기자 구조

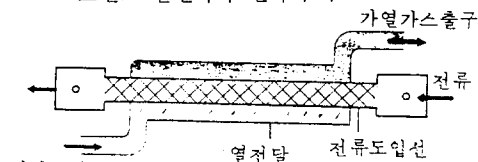


그림 5 界磁卷線 리이드선의 냉각

전기자 권선 사이에는 현재의 발전기에서와 같이 자기회로의 자기저항을 줄이기 위한 규소강판의 이(teeth)가 없다. 따라서 전기자 권선은 별도로 제작하여 계철(yoke, back iron 또는 magnetic shield)의 내부에 끼워넣게 된다. 그림 4는 서독의 Kraftwerk Union AG가 설계한 전기자의 단면을 나타낸다. 전기자 권선은 현재의 발전기에서와 같이 동선을 사용하고 냉각은 물로써 하고 있다. 권선에 발생하는 전자력에 의한 권선의 움직임을 막기위하여 권선들을 플라스틱으로 고정하고 이것을 다시 도브테일형 플라스틱 스페이서를 이용하여 계철에 고정시킨다. 계철은 규소강판을 적층하여 만드는데 자기회로의 저항을 감소시켜주는 역할을 하지만 자력선이 발전기 외부로 발산해 나가는 것을 방지하는 역할을 한다. 그래서 이것을 자기차폐(magnetic shield 또는 environmental shield)라 부를 때가 더 많다.

2.4 계자전류 도입선

초전도 발전기에서 계자전류는 현재의 발전기에서와 같이 회전자 축에 슬립링을 설치하고 이를 통하여 외부 여자기에서 공급된다. 슬립링에서 초전도 계자권선 사이에는 동선(lead)으로 연결되어 있다. 그런데 이 선에는 많은 열이 발생하므로 이에 대한 냉각이 중요하다. 그림 5는 리이드(lead)선의 냉각 방법을 나타낸다. 일단 초전도 계자권선을 냉각하고 나온 저온헬륨가스를 리이드선의 전류출구 쪽으로 넣어서 이 가스가 리이드선을 따라 전류입구 쪽으로 흐르면서 이 리이드선을 냉각시키고 있다.

3. 초전도 발전기의 이점

3.1 대용량기의 제작한계 확대

대용량기 특히 터빈발전기의 제작한계는 주로 냉각기술에 따라서 정하여 진다. 현재에는 전기자권선은 순수에 의한 직접냉각, 계자권선은 수소가스에 의한 직접냉각 또는 순수에 의한 직접냉각이 채용되고 있다. 특히 회전자는 기계적 강도, 진동, 축수에 면에서 크기의 제한을

받아 대용량화의 제작한계를 가지고 있다.

일반으로 발전기 용량[kVA], 회전속도[rpm]과 기계적 크기와의 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{kVA}{rpm} = K \times D^2 \times L$$

여기서 K 는 출력계수, D 는 고정자내경, L 은 철심길이 이다. 그러므로 동일 체적으로 출력을 증가시키려면 출력계수를 크게할 필요가 있는데 표 1은 냉각방식에 따른 출력계수를 나타낸다. 계자권선을 초전도화 하므로서 출력계수가 현저히 증가하며 따라서 대용량기의 제작한계를 확대할 수 있다.

표 1 냉각방식과 출력계수

냉각방식		출력계수
현재 발전기	공기냉각	1
	수소냉각(간접)	2
	수소냉각(직접)	4~6
	순수냉각	7~8
초전도 발전기		10~14

3.2 소형화 및 경량화 가능

초전도 발전기는 출력계수가 크기 때문에 동일 출력의 기계치수가 현재의 발전기 보다 작아진다. 표 2는 수소냉각기와 비교한 초전도 발전기의 소형화율 및 경량화율을 나타낸다. 치수 및 중량에 있어서 거의 절반 정도로 작아짐을 알 수 있다. 이와같이 소형 경량화가 이루어지면 발전소의 건설비가 절감되고 또한 발전기의 수송비용도 적게들게 된다.

표 2 초전도기에 의한 소형 경량화율

항	목	2극1.0GW
치 수	고정자 높이	약 0.9배
	고정자 길이	약 0.6배
	회전자 외경	약 0.9배
	회전자 길이	약 0.6배
중 량	고정자	약 0.5배
	회전자	약 0.5배

3.3 발전기 효율향상

발전기의 손실에는 전기자권선 저항손실, 계자권선 저항손실, 철손과 풍손, 마찰손과 같은 기계손이 있는데 1GW 급에서는 정격의 1~1.5% 정도의 손실이 있다. 초전도 발전기의 경우 그림 6에⁽¹²⁾ 보여주는 바와같이 계자권선 저항손실이 거의 없고 회전자의 기계손이 감소하여 초전도 상태를 유지하기 위한 냉동기 손실을 고려하여도 총손실이 종래에 비하여 반 이하로 된다.

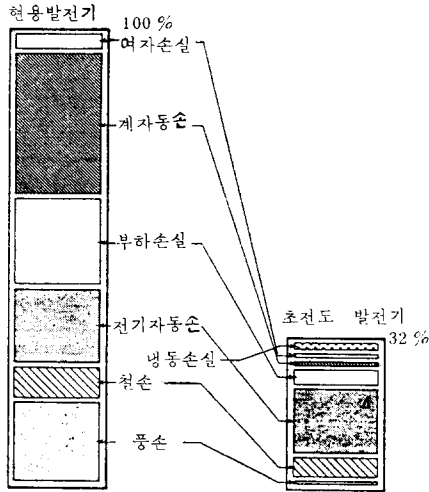


그림 6 1200MVA 저압 교류발전기의 손실비교

3.4 안정도 향상

초전도 동기 발전기의 특성을 종래의 발전기와 비교할때 표 3과 같다. 동기리액턴스가 1/4 정도로 작아지고 시정수가 100 배정도 커짐을 알 수 있다. 전력계통의 안정도는 발전기의 동기리액턴스가 송전선의 리액턴스의 합에 역비례

표 3 초전도 발전기의 전기정수

	초전도기	종래기
출력[MVA]	1000	1000
동기리액턴스[pu]	0.4~0.5	2.0
과도리액턴스[pu]	0.25~0.3	0.3~0.4
차과도리액턴스[pu]	0.1~0.25	0.25
개로서정수[s]	750	5
개로과도시정수[s]	0.2~0.5	0.03

하므로 동기리액턴스의 대폭적인 감소는 송전선의 허용 송전전력의 증대에 큰 공헌을 한다. 최근 대용량 전원은 수요지로부터 대단히 먼 지점에 건설하는 경향이 있는데 계통 안정도가 증진되어 송전선 건설의 필요를 경감하여 주고 따라서 전력가격의 절감에 도움이 된다.

4. 연구개발 현황

초전도 교류 발전기는 1960년대 후반에 들어와서 미국에서 처음으로 시험제작에 들어갔다⁽⁵⁾. 그후 소련, 불란서, 일본, 독일 등에서 개발에 착수하여 이제 1000MVA 급 발전기의 개발이 진행되고 있다.

미국에서는 MIT 공과대학이 초전도 발전기의 연구개발에 선도적 역할을 하고 있는데 1969년에 45kVA, 1973년에 3MVA 발전기를 제작 시험하였고 현재에는 10MVA 발전기를 시작중이었다. Westinghouse 사는 1973년에 5MVA, 1978년에 10MVA 발전기를 제작하였고 또한 EPRI의 지원을 받아 용량 300MVA, 2극, 60Hz, 3상, 24kV, 효율 99.4%, 길이 3.5m, 폭 3.4m, 높이 6.4m, 중량 159톤, 회전자 직경 1m의 발전기를 개발하기 시작하였는데 미국의 전반적인 에너지 수요의 감퇴로 1984년에 개발이 중단되었다. 그리고 GE 사에서는 20MW 기를 제작한 바 있다.

소련은 1970년대에 1MVA, 2MVA 발전기를 개발한 바가 있으며 1980년 초에 미국의 GE사와 공동연구를 통하여 20MVA 동기조상기를 제작하여 시험을 마쳤다. 이것을 기초로 하여 300MVA 급 프로토타이프기의 개발이 끝났고 다시 1200MVA 급의 개발계획이 진행중이다.

프랑스에서는 알스톰사가 EDF의 지원을 받아 직경 1m의 모델 회전자를 완성하여 1980년부터 2년간에 걸쳐 기술시험을 마쳤다. 이것은 앞으로 1~2GVA 급 발전기의 회전자로 쓰일 것이다.

일본에서는 미쯔비시 및 후지에서 통산성 중요기술 개발비 보조로 1974년부터 3년간 6M-

VA 초전도 발전기를 시작하여 초전도 발전기의 원리의 실증, 문제점의 발견 등의 기본적인 문제를 다루었다. 연구의 제 2 단계로 1977년부터 5 개년 계획으로 30MVA 초전도 동기 조상기를 제작하여 현재 시험중에 있다. 이와는 별도로 히다찌에서 50MVA 발전기가 개발되었다. 1985년에 1000MVA 급 발전기의 경제성 검토를 마쳤고 개발에 필요한 연구과제를 도출하였으며 2000년부터 상업운전에 들어갈 계획을 수립한 바 있다.

5. 개발과제

초전도 발전기는 계자권선을 초전도화한 회전자 구조, 전기자 권선의 스포트스트레스화와 같이 종래기와 비교하여 구조가 매우 다르므로 여러 가지 제조상 중요한 개발과제가 있다.

(1) 회전자 : 회전자는 계자권선을 지지하는 토오크 튜브와 2종의 동심원통 뎀퍼로 구성된다. 이와같은 부분은 원심력이나 전자토오크에 견디어야 하고 상온-극저온간의 온도차에 의한 열응력에 대하여 충분히 견디지 않으면 안된다. 중요 연구과제는 축방향 열수축의 대책, 다중원통회전자의 진동특성, 기계가공, 고강도 뎀퍼재의 개발, 용접 및 진공유지기술 등을 들 수 있다.

(2) 계자권선 : 계자권선은 고속회전에 있어서도 안정히 초전도 상태를 유지하여야 한다. 특히 원심력, 전자력에 의한 도체이동을 극소화하고 퀘치를 발생하지 않는 권선지지 방법이 필요하다. 초전도선은 안정성, 가공성, 기계강도의 면에서 NbTi가 유리하나 초전도화의 효과를 높이기 위하여 Nb₃Sn의 채용이나 회전자 구조의 간략화, 속응여자방식을 위한 교류초전도선의 개발등이 필요하다.

(3) 전기자 권선 : 초전도기는 스포트스트레스 방식이 채용되어 전기자권선을 종래기 이상으로 높은 자재공간중에 놓이게 되고 높은 점적율이 얻어져서 출력전압의 고전압화나 전기자권선의

소형경량화가 가능하고 도체내의 와전류손이나 순환전류에 의한 손실대책이 필요하다. 즉 과대전자력에 견디는 지지법, 조립기술 등이 중요개발과제가 된다.

(4) 헬륨 냉각 시스템 : 냉동기로 부터 나오는 액체헬륨은 고속으로 회전하는 회전축 끝부분에서 토오크 튜브내로 주입되어 초전도계자권선을 냉각하고 다시 축 끝부분을 통하여 냉동기로 돌아온다. 여기서 중요한 개발과제는 헬륨이 고속회전부와 정지부 사이에서 새지않게 실링하는 문제와 그의 신뢰성 확보에 있다.

(5) 회전자부의 이상검출 및 보호대책 : 초전도 발전기의 회전자는 비상히 복잡한 구조로 되어 있고 고속으로 회전하므로 운전상태에서 회전자 내부의 이상상태, 즉 초전도 계자권선의 퀘치, 부분적 과열, 진공도 저하 등의 검출과 그의 보호방식에 대한 연구가 필요하다.

6. 맺음 말

초전도 교류발전기는 성능 및 경제성으로 볼 때 종래의 발전기 보다 우수하며 대단위 용량의 가능성도 커서 세계의 선진각국에서 연구개발을 계속하고 있으며 2000년대에는 1000MVA 급 초전도 발전기의 실용화가 확실히 되고 있다. 특히 근래에 교류 초전도체의 개발로 전기자권선까지 초전도화가 가능⁽¹³⁾하게 되고 이것을 계자회로에 이용하면 속응여자(fast response excitation)방식 초전도 발전기도 가능하게 된다. 또한 고온 초전도 재료의 개발은 초전도 발전기의 냉각문제를 더욱 용이하게 할 수 있으므로 초전도 발전기의 실용화는 더욱 앞당겨지리라 생각된다.

초전도 발전기의 개발기술은 정밀가공, 초고진공, 극저온, 초고자력 등 기반기술과 초전도 등 미래기술의 복합체이다. 국내에서는 아직도 이에 대한 연구가 산발적으로 이루어지고 있는 실정인데 앞으로는 국가주도형으로 정하여 장기적이고 조직적인 연구개발이 이루어져야 하겠다.

참 고 문 헌

- (1) E. Spooner, 1973, "Fully Slotless Turbo-generators", Proc. IEE, Vol. 120, No. 12, pp. 1507~1518.
- (2) H.H. Woodson, J.L. Smith Jr., P. Thullen and J.L. Kirtley, 1971, "The Application of Superconductors in the Field Winding of Large Synchronous Machine", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-90, No.2, pp. 620~627.
- (3) H.O. Lorch, 1973, "Feasibility of Turbogenerator with Superconducting Rotor and Conventional Stator", Proc. IEE, Vol. 120, No. 2, pp. 221~227.
- (4) M.J. Jefferies, E.E. Fibbs, G.R. Fox, C.H. Holley and D.M. Willeyoung, 1973, "Prospects for Superconductive Generators in the Electric Utility Industry", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-92, No. 5, pp. 1659~1669.
- (5) J.L. Smith Jr. 1975, "Application of Superconductors to A.C. Generators", Fifth International Conference on Magnet Technology, Rome.
- (6) Song Y. Hahn, A. Mailfert, A. Rezzoug and L. Boyer, 1978, "Transient Performances of Superconducting Three Element Synchronous Machine", Applied Superconductor Conference, Paper No. LB-6, Pittsburgh U. S.A.
- (7) Song Y. Hahn, A. Mailfert and A. Rezzoug, 1979, "Transient Performances of Superconducting Alternator with Damper Winding", IEEE PES Winter Meeting, Paper No. A 79010-0, New York, U.S.A.
- (8) Song Y. Hahn, A. Mailfert and A. Rezzoug, 1979, "Inertial Damping of Superconducting Three Element Alternator", IEEE PES Summer Meeting, Paper No. A 79420-1, Bancouver, British Columbia, Canada.
- (9) J.L. Kirtley, Jr., 1979, "Armature Motion Damping of Superconducting Generators", IEEE PES Summer Meeting, Paper No. A 79012-6, New York U.S.A.
- (10) D.C. Luck and P. Thullen, 1973, "Double Shielded Superconducting Field Winding", US Patent No. 3764835.
- (11) J.L. Kirtley and M. Furuyama, 1975, "A Design Concept for Large Superconducting Alternators", IEEE PAS, Vol. PAS-94, No. 4, pp. 1264~1269.
- (12) C. Flick et al, 1981, "General Design Aspect of a 300MVA Superconducting Generator for Utility Application", IEEE MAG, Vol. MAG-17, No. 1, pp. 873~879.
- (13) Y. Brunet et al, 1987, "Electrical Design of Air-Cored Synchronous Generator Using Superconducting Field and Armature Winding", IEE Proc. Vol. 134, Pt. B, No. 1.

