

特輯
超電導
時代를
연다

超電導 交流發電機

Superconducting AD Generatorss

교수 한 송 엽

서울대학교 공과대학 전기공학과

1. 序 論

전력수요의 증가에 따라 대단위 용량 발전기에 대한 요구가 점차 늘어가고 있다. 그러나 권선의 냉각기술, 회전자 재질의 강도 등의 문제로 발전기의 단위용량 증가에 대한 한계점이 보이고 있다.

발전기의 출력 P 및 동기 리액턴스 X_d 는

$$P = K_p B_s A_s D^2 L \quad (1)$$

$$x_d = K_x \frac{A_s D}{B_s g} \quad (2)$$

와 같이 표시되고 여기서 K_p , K_x 는 상수, B_s 는 전기자 자속밀도, A_s 는 전기자 전류밀도, D 는 전기자권선 직경, L 은 전기자 권선 길이, g 는 공극의 길이이다. 현용기에서 B_s 는 구조강판의 포화 특성 때문에 1.2~1.5(T) 정도 밖에 증가시킬 수 없다. 그러므로 발전기의 체적 D^2L 을

일정하게 하고 P 를 증가시키려면 A_s 를 증가시켜야 한다. 그런데 A_s 를 증가시키면 X_d 가 증가하여 발전기의 안정도가 낮아지게 된다. 이를 방지하기 위하여 g 를 증가시키는데 이렇게 되면 전기자 권선에서 원하는 B_s 를 얻기 위하여 제자 기자력을 증가시켜야 하고 따라서 자기권선의 손실이 증가하고 발전기의 전체효율이 떨어져서 대형발전기의 이익이 없어진다. 이와 같은 현상은 벌써 1000MVA급 발전기에서 나타나고 있다.

회전자의 원심력 때문에 회전자 직경은 터빈 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.

전기자권선의 절연관계로 발전기 출력전압은

약 30kV가 최대인데 이 경우 2,000MVA 발전기의 선전류는 40kA 정도가 된다. 따라서 발전기에서 승압변압기 사이의 전기 설비가 고가로 된다.

또 발전기의 중량이 증가함에 따라 수송상의 제한을 받게 되므로 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 계자권선을 가진 발전기가 제안되었다.

초전도 발전기 원리의 실증을 위하여 여러 연구기관에서 소형발전기를 시험제작 하였고 오늘날 날에 와서는 그 실용성이 확실히 입증되어 프로터 타이프기의 제작에 까지 이고르 있다.

초전도 교류발전기에는 여러 종류의 구조가 있는데 본 해설에서는 현재 가장 많이 개발되고 있는 이중 차폐형 단일 회전자 발전기에 대하여

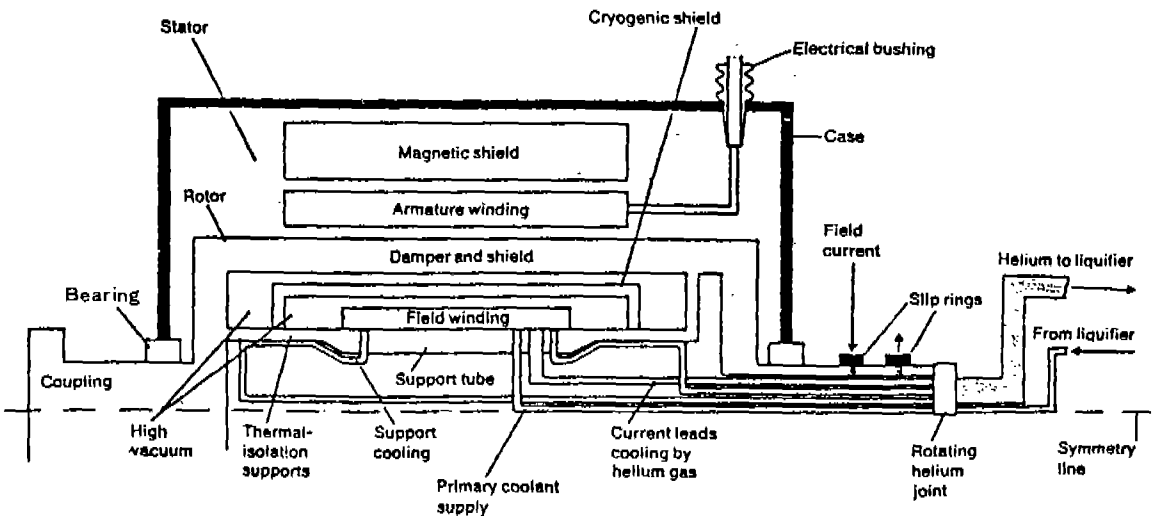
중점적으로 취급한다. 먼저 그 구조를 설명하고 초전도 교류발전기의 특징을 다루며 현재 개발 현황을 소개하기로 한다.

2. 超電導 交流發電機의 구조

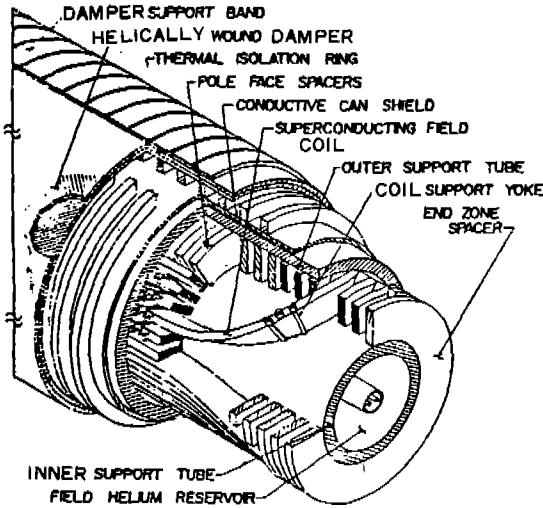
현재 세계 각국에서 개발하고 있는 초전도 교류발전기의 구조를 보면 그림 1과 같다. 회전자 자형으로 되어 있기 때문에 회전자의 계자권선이 초전도선으로 되어 있으며 전기자는 현재의 교류발전기와 같이 고정되어 있다.

가. 回轉子

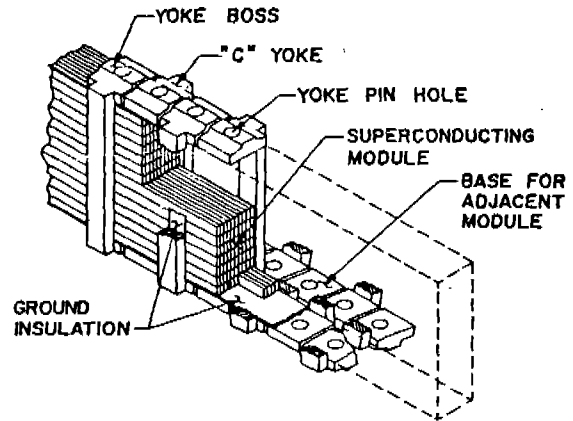
초전도 계자권선은 속이 빈 지지강관(Torque Tube 또는 Support Tube) 위에 여러개의 형권을 조립하여 이루어지는데 도선으로서는 NbTi 필라멘트를 꼬아서 동 매트릭스내에 넣은 초전도선을 사용한다. 그림 2는 미국의 EPRI와 Westinghouse가 공동으로 개발한 300MVA 초전도 교류 발전기의 회전자를 나타낸다 내부지



(그림 1) 초전도 교류발전기의 단면도

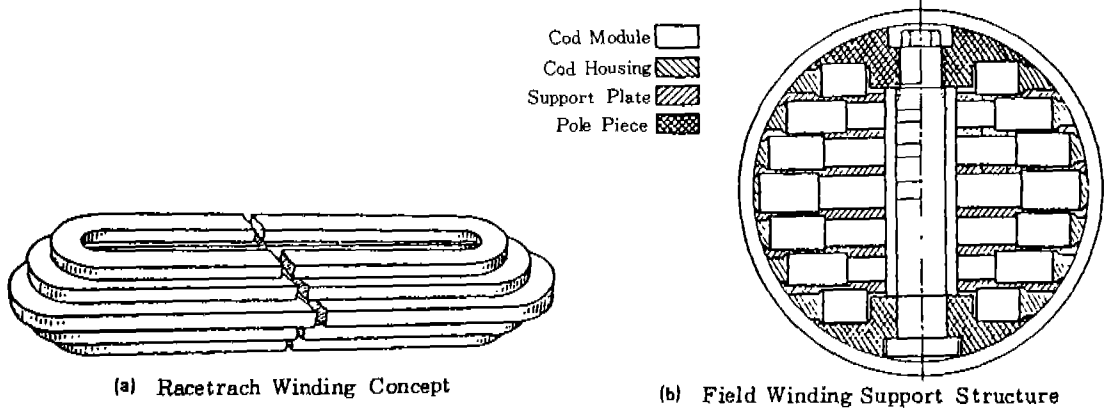


(a) Isometric Section of Rotor



(b) Superconducting Coil Module

〈그림 2〉 미국의 EPRI와 Westinghouse가 개발한 300MVA 초전도 발전기의 회전자



(a) Racetrack Winding Concept

(b) Field Winding Support Structure

〈그림 3〉 미국의 GE사가 설계한 300MVA 초전도 발전기의 회전자

지지관(Inner Support Tube) 위에 초전도 계자 코일(Superconducting Field Coil)을 설치하고 그 위에 외부지지관(Outer Support Tube)을 씌워서 코일이 움직이지 않도록 고정시키고 있다. 그림 3은 미국의 General Electric사가 설계한 300MVA 초전도 발전기의 회전자 구조

를 나타낸다. Racetrack형의 형권을 여러개 만들어 이것을 지지관(Toupue Tube)내에 넣어서 만든 것이다.

계자권선은 약 4~5K의 초저온으로 유지되어야 하는데 이것은 회전자 축을 통하여 들어오는 액체 헬륨으로 냉각된다. 액체 헬륨은 발

전기가 터어빈과 연결되는 커플링의 반대측 축에 헬륨 연결기구 (Rotating Helium Joint) 를 설치하여 그 축 내부를 통하여 공급되고 기화된 헬륨도 이 축내부를 통하여 밖으로 나가게 된다.

지지장관의 양단은 상온의 구조물에 기계적으로 연결되므로 이 부분을 통한 열손실을 최소한으로 줄여야 하는데 이 부분을 열 절연 지지편 (Thermal Isolation Support 또는 Thermal Distance Piece)이라 하고 이곳도 액체 헬륨으로 냉각시켜 계자권선의 온도상승을 막고 있다.

초전도선의 전류밀도는 보통 $100 \sim 150A/mm^2\mu$ 정도이고 회전자 중심부에서의 자속밀도는 $5 \sim 7$ Tesla 정도이다. 계자권선과 전기자권선 사이의 간격 (Air Gap)이 매우 크기 때문에 (300MVA 경우 30cm 정도가 됨) 전기자 권선에서의 자속 밀도는 $1 \sim 1.5$ Tesla 정도가 된다.

나. 回轉子 遮蔽

계자권선이 초저온을 유지하게 하기 위하여 회전자를 열적 및 자기적으로 차폐를 한다. 우선 열손실을 막기 위하여 계자권선 외측을 진공 (Vacuum)으로 만든다. 이와같이 하여도 상온 부분과 계자권선 사이에는 복사에 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 $70 \sim 100K$ 정도이며 여기서 부터 $4K$ 부분으로 복사되는 열은 매우 적어서 전체적인 냉각효과가 높아진다.

초전도선에서는 자체 전류에 의한 저항손실은 거의 없다. 그러나 전기자에서의 불평형 전류에 의한 역상자속, 전기자 권선의 스페이스 하모닉

스에 의한 고조파 자속, 부하변동에 의한 과도 자속 등 비동기 자속이 회전자에 가하여지면 초전도선에서 손실이 생기게 되고 따라서 초전도선의 온도를 상승시키는 원인이 된다. 이와같은 현상을 막기 위하여 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 볼 때 그 값이 클수록 좋다. 그러나 발전기의 단자전압을 조절할 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.

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 생겼을 때 회전자의 진동이 빨리 감소되도록 하고 있다. 이것은 현재 동기기에서 재동편선에 해당하는 것으로서 제동작용을 잘하게 하기 위한 시정수는 약 0.1초 정도이다. 여기서 제동관은 물론 전자차폐의 역할도 하고 있으나 시정수가 짧아서 큰 효과가 없다.

다. 電機子

전기자는 전기자권선과 자기차폐로 이루어진다.

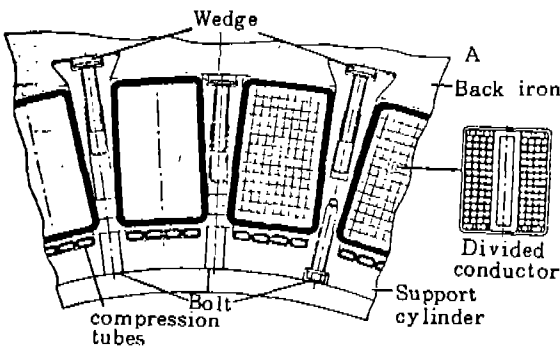
앞에서도 설명한 바와 같이 초전도 발전기에서는 계자에서의 기자력이 매우 크기 때문에 전기자권선에서 필요한 $1 \sim 1.5$ Tesla의 자속밀도를 얻기 위하여 자기회로에 자성체를 사용할 필요

가 없다. 그러므로 전기자의 구조가 현재의 발전기와 매우 다르게 되어 있다.

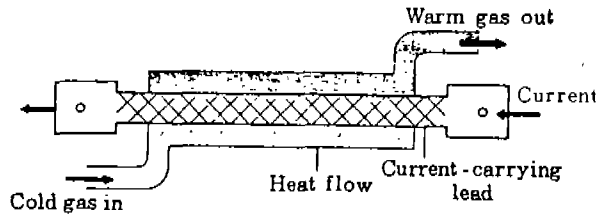
전기자 권선 사이에는 현재의 발전기에서와 같이 자기회로의 자기저항을 줄이기 위한 규소강판의 치(Tooth)가 없다. 따라서 전기자 권선은 별도로 제작하여 계철(Yoke, Back Iron 또는 Magnetic Shield)의 내부에 끼워넣게 된다. 그림 4는 서독의 Kraftwerk Union AG가 설계한 전기자의 단면을 나타낸다. 전기자 권선은 현재의 발전기에서와 같이 동선을 사용하고 냉각은 물로 하고 있다. 권선에 발생하는 전자력에 의한 권선의 움직임을 막기 위하여 권선들을 플라스틱으로 고정하고 이것을 다시 도브테일형 플라스틱 스페이서를 이용하여 계철에 고정시킨다.

계철은 규소강판을 적층하여 만드는데 자기회로의 저항을 감소시켜 주는 역할을 하지만 자력선이 발전기 외부로 발산해 나가는 것을 방지하는 역할을 한다. 그래서 이것을 자기차폐(Magnetic Shield 또는 Environmental Shield)라 부를 때가 더 많다.

라. 界磁電流 導入線



〈그림 4〉 서독의 Kraftwerk Union AG가 설계한 초전도 발전기의 전기자 구조



〈그림 5〉 계자권선 리이드선의 냉각

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

3. 超電導 發電機의 특징 및 이점

초전도발전기의 구조상 특징은 첫째로 공심기(Air-Cored Machine)이다. 즉 계자권선을 초전도선으로 하였고 이것을 액체헬륨으로 냉각하기 때문에 극저온에서도 고강도를 낼 수 있는 구조재를 사용하여야 한다. 이와 같은 재질로 현재는 비자성체인 스테레스강을 사용하고 있다. 그러므로 회전자의 자기회로에는 자성체가 전혀 없는 구조가 된다. 그러나 초전도권을 사용하였기 때문에 계자기자력을 크게 증가시킬 수 있어 전기자 권선에서 요구하는 자속밀도는 쉽게 얻을 수 있다. 두번째 특징은 전기자 권선선용 스톱이 없다. 이것은 전기자 권선에 필요한 자장을 얻기 위하여 치(teeth)를 둘 필요가 없기 때문이다. 그러므로 전기자 권선에는 치부분이 없

기 때문에 권선밀도를 높일 수 있고 권선의 절연이 매우 용이하게 된다. 세번째 특징은 동기 리액턴스가 매우 적어져서 안정도가 향상되는 것이다. 이것은 초전도 발전기가 공심기이기 때문이다. 이상과 같은 특징으로부터 많은 이점을 얻을 수 있는데 그중 중요한 것을 열거하면 아래와 같다.

가. 大容量機의 제작 한계 확대

대용량기 특히 터빈발전기의 제작한계는 주로 냉각기술에 따라서 정하여진다. 현재에는 전기자권선은 순수에 의한 직접냉각, 제자권선은 수소가스에 의한 직접냉각 또는 순수에 의한 직접냉각이 채용되고 있다. 특히 회전자는 기계적강도, 진동, 축수의 면에서 크기의 제한을 받아 대용량화의 제작한계를 가지고 있다.

일반으로 발전기 용량(kVA), 회전속도(rpm)와 기계적 크기와의 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{kVA}{rpm} = KD^2 L \quad (3)$$

여기서 K 는 출력계수, D 는 고정자내경, L 은 철심길이이다. 그러므로 동일 체적으로 출력을 증가시키려면 출력계수를 크게할 필요가 있는데 표 1은 냉각방식에 따른 출력계수를 나타낸다. 제자권선을 초전도화함으로써 출력계수가 현저히 증가하며 따라서 대용량기의 제작한계를 확

〈표 1〉 냉각방식과 출력계수

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

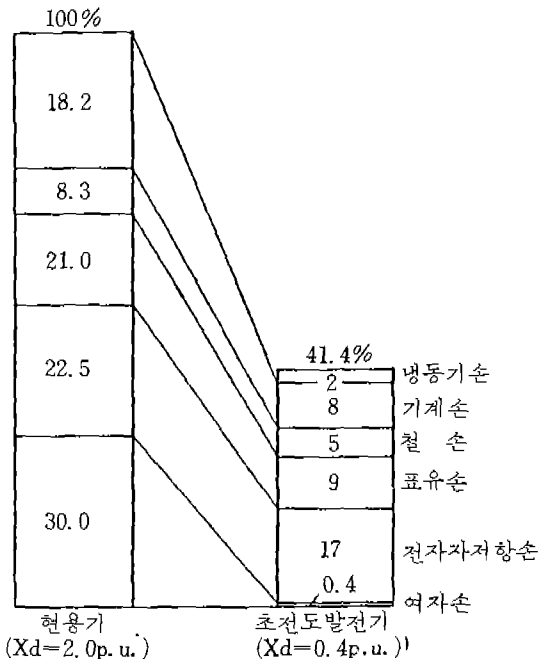
대할 수 있다.

나. 小形化 및 輕量化 可能

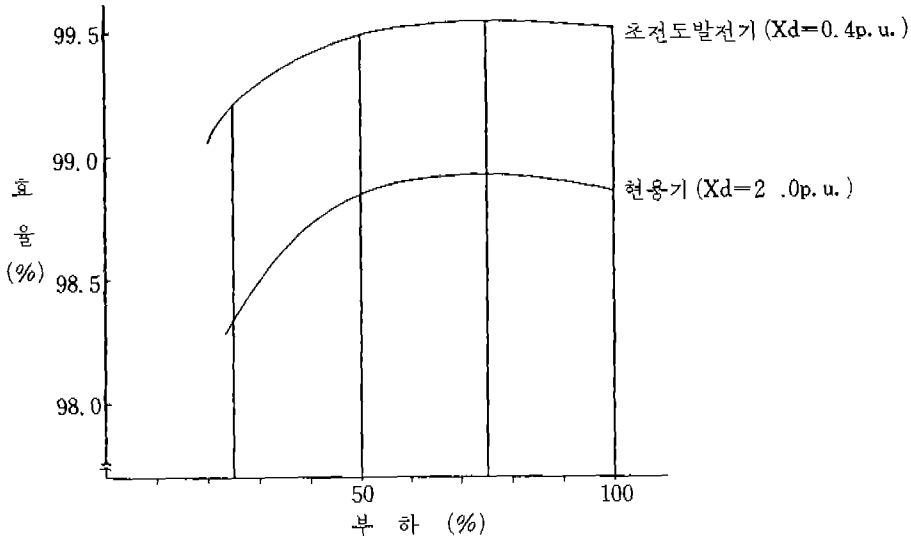
초전도 발전기는 출력계수가 크기 때문에 동일 출력의 기계치수가 현재의 발전기보다 작아진다. 표 2는 수소냉각기와 비교한 초전도 발전기의 소형화율 및 경량화율을 나타낸다. 치수 및 중량에 있어서 거의 절반 정도로 작아짐을 알 수 있다. 이와같이 소형 경량화가 이루어지면

〈표 2〉 초전도기에 의한 소형 경량화율

항 목		2극 1.0GW
치수	고정자 높이	약 0.9배
	고정자 길이	약 0.6배
	회전자 외경	약 0.9배
	회전자 길이	약 0.6배
중량	고정자	약 0.5배
	회전자	약 0.5배



〈그림 6〉 2극 1,120MVA 터빈발전기손실 비교



〈그림 7〉 2극 1,120MVA 터빈 발전기부분 부하특성

발전소의 건설비가 절감되고 또한 발전기의 수송비용도 적게 들게 된다.

다. 發電機 効率向上

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

그림 7은 1,120MVA 터빈 발전기의 부하특성으로, 전 부하에 걸쳐 약 0.8%의 효율향상이 있는데 이는 연간 10억원 정도의 경비절감에 해당된다.

라. 安定度 向上

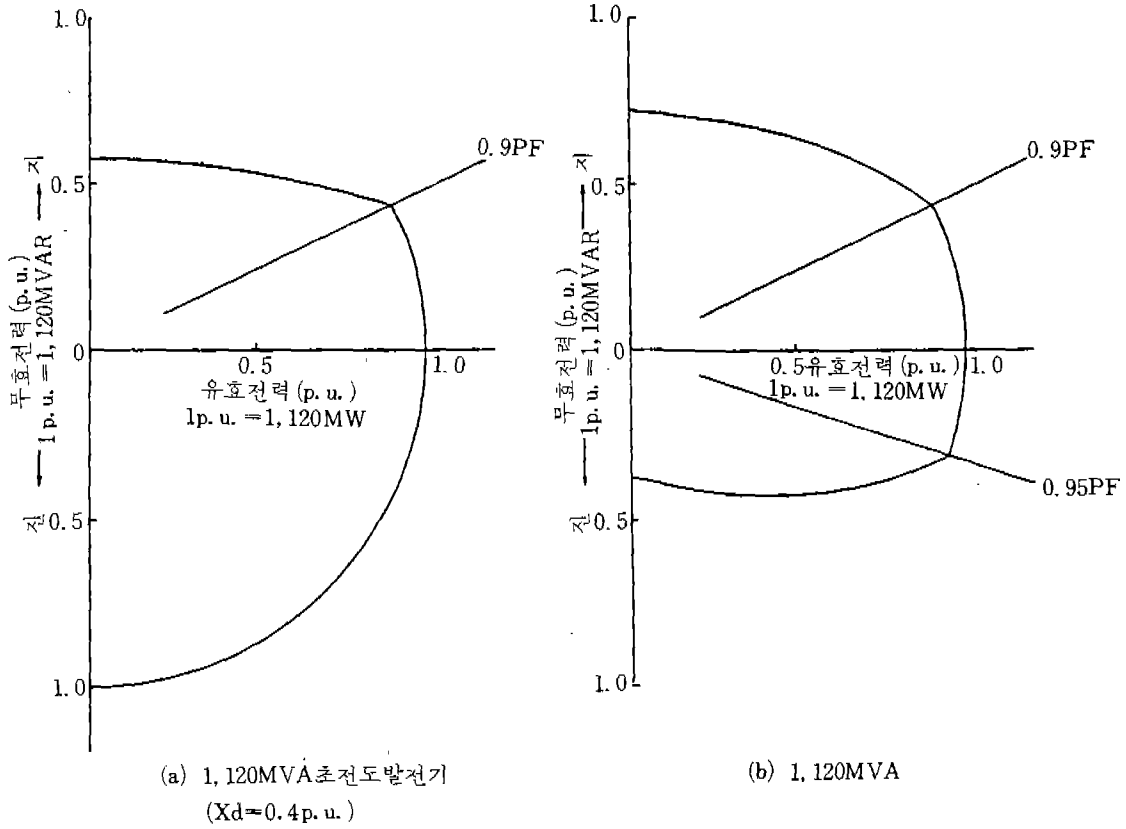
초전도 동기 발전기의 특성을 종래의 발전기와 비교할 때 표 3과 같다. 동기리액턴스가 1/4

정도로 작아지고 시정수가 100배 정도 커짐을 알 수 있다. 전력계통의 안정도는 발전기의 동기리액턴스가 송전선의 리액턴스의 합에 역비례하므로 동기리액턴스의 대폭적인 감소는 송전선의 허용 송전전력의 증대에 큰 공헌을 한다. 최근 대용량 전원은 수요지로 부터 대단히 먼 지점에 건설하는 경향이 있는데 계통 안정도가 증진되어 송전선 건설비를 줄일 수 있고 따라서 전력가격의 절감을 가져다 준다.

그림 8은 초전도 발전기 및 현용 발전기의 가능 출력 특성곡선을 나타낸다. 초전도 발전기

〈표 3〉 초전도 발전기의 전기정수

	초전도기	종래기
출력 [MVA]	1000	1000
동기리액턴스 [pu]	0.4~0.5	2.0
파도리액턴스 [pu]	0.25~0.3	0.3~0.4
차파도리액턴스 [pu]	0.1~0.25	0.25
개로시정수 [s]	750	5
개로파도시정수 [s]	0.2~0.5	0.03



〈그림 8〉 초전도발전기 및 현용발전기의 가능출력특성곡선

는 동기리액턴스가 작기 때문에 진역률(Leading Power Factor)에서도 정격용량까지 출력을 낼 수 있음을 알 수 있다.

4. 結 論

초전도 교류발전기는 성능 및 경제성으로 볼 때 종래의 발전기 보다 우수하며 대단위 용량기의 가능성도 커서 세계의 선진 각국에서 연구개발을 계속하고 있으며 2,000년대에는 1,000MVA 급 초전도 발전기의 실용화가 확실히 되고 있다. 특히 근래에 교류 초전도체의 개발로 전기

자 권선까지 초전도화가 가능하게 되고 이것을 계자회로에 이용하면 속응여자방식 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