

1. 머리말

전력수요의 증가에 따라 대단위용량 발전기에 대한 요구가 점차 늘어가고 있다. 그러나 냉각기술, 재료의 강도등의 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 계자(field)의 기자력이 커져야 하고 따라서 계자권선(field winding)의 손실이 증가하고 발전기의 전체 효율이 떨어져서 대형기의 이익이 없어진다. 이와같은 현상은 벌써 1000 MVA 급에서 나타나기 시작한다. 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 제한 하에서는 최대 단위용량은 약 2000 MVA로 제한된다. 전기자권선(armature winding)의 절연관계로 발전기 출력전압은 약 30 kV가 최대인데 이 경우 2000 MVA 발전기의 선전류는 40 kA 정도가 된다. 따라서 발전기에서 송압변압기 사이의 전기설비가 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 재료 개발로는 불가능하다는 것이 예견되었다. 이에대한 해결방안으로 초전도 계자권선을 가진 발전기가 제안되었다. 초전도 발전기 원리의 실증을 위하여 여러 연구기관에서 소형발전기를 시험제작 하였고 오늘날에 와서는 그 실용성이 확실히 입증되어 브로터 타입의 제작에까지 이르고 있다. 초전도 교류발전기에는 여러종류의 구조가 있는데 본 글에서는 현재 가장 많이 개발되고 있는 2중 차폐형 단일 회전자 발전기에 대하여 중점적으로

취급한다. 먼저 그 구조를 설명하고 초전도 교류발전기의 특징을 다루며 현재 개발현황을 소개하기로 한다.

2. 초전도 교류발전기의 구조

현재 세계 여러나라에서 개발하고 있는 초전도 교류발전기의 구조를 보면 그림 1과 같다. 회전계자형으로 되어 있기 때문에 회전자의 권선은 초전도선으로 되어 있으며 전기자권선은 종래의 교류발전기와 같이 고정되어 있다.

2.1 회전자

초전도 계자권선은 속이빈 지지관(torque tube 또는 support tube) 외에 여러개의 형권(formed coil)을 조립하여 만들어진다. 도선으로는 기계적 강도가 좋은 초전도선을 사용한다. 형권을 고정시키는 방법으로는 지지관위에 권선지지오우크를 여러개 설치하고 그사이에 초전도 권선을 끼워넣으며 원심력에 대하여 충분히 견딜수 있도록 외부지지관을 설치하고 있다. 또 다른 방법은 형권을 레이스 트랙(race track)형으로 만들어 이것을 잘 삼은후 전체를 지지관 속에 넣고 모으는 하는 것이다. 계자권선은 약 4-5K의 초적으로 유제 되어야 하는데 이것은 회전자 축을 통하여 들어오는 액체 헬륨으로 냉각된다. 액체헬륨은 발전기가 터빈과 연결되는 커플링의 반대 축 축에 헬륨 연결기구(rotating helium joint)를 설치하여 그 축 내부를 통하여 공급되고 기화된 헬륨도 이 축내부를 통하여 밖으로 나가게 된다. 지지관의 양단은 상온의 구조물에 기계적으로 연결됨으로 이 부분을 통한 열손실을 최소한 줄여야 하는데 이 부분을 열절연지지편(thermal isolation support 또는 thermal distance piece)이라 하고 이곳도 액체헬륨으로 냉각시켜 계자권선의 온도상승을 막고있다. 초전도선의 전류밀도는 보통 100-150 A/mm² 정도이고 회전자 중심부에서의 자속밀도는 5-7 테슬라(tesla) 정도이다. 계자권선과 전기자권선 사이의 간격(air gap)이 매우 크기 때문에(300 MVA 경우 30 cm 정도가 됨) 전기

초전도 교류발전기의 개발현황과 과제

자 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 복사열의 한 열손실이 있으므로 계자권선의 저온 유지가 어렵게 된다. 그리하여 진공부분의 중간에 열전도율이 좋은 동 또는 알루미늄 파이프를 설치하여 복사열을 회전자의 양단으로 바이패스 시키고 있다. 이 차폐막(cryogenic shield)의 온도는 70-100K 정도이며 여기서부터 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 하모닉스에 의한 고평파 자속, 부하변동에 의한 과도자속 등 비동기자속이 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 알루미늄관을 사용하게 된다. 이 전자차폐막의 시정수는 위에서 일정한 비동기자속을 차폐하는 입장에서 볼때 그 값이 클수록 좋다. 그러나 발전기의 단자전압을 조정할 때는 계자전류를 변화시켜야 하는데 이때 그 속응성이 떨어져서 과도특성이 저하한다. 이와같은 상호배반적 요구 때문에 이 차폐막의 시정수는 적당한 값을 택하여야 하는데 보통 2초를 취하고 있다. 이상의 두 차폐막은 각각 별도로 설치되는 경우와 하나의 차폐막으로 두 개의 기능을 다하게 하는 경우가 있는데 후자의 경우에는 열전차폐막(electrothermal shield)라고 부른

다. 회전자에는 외측표면에 제동관(damper shell)이 설치되어 발전기에서 부하변동이 생겼을 때 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. 앞에서 설명한 바와같이 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. 전기자권선 사이에는 현재의 발전기에서와 같이 자기회로의 자기저항을 줄이기 위한 구조강판의 이(teeth)가 없다. 따라서 전기자 권선은 별도로 제작하여 계철(yoke, back iron 또는 magnetic shield)의 내부에 끼워넣게 된다. 전기자 권선은 현재의 발전기에서와 같이 동선을 사용하고 냉각은 물로써 하고 있다. 권선에 발생하는 전자력에 의한 권선의 움직임을 막기 위하여 권선들을 폴라스틱으로 고정하고 이것을 다시 도브테일형 폴라스틱 스페이서를 이용하여 계철에 고정시킨다. 계철은 구조강판을 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 부를때가 더 많다.

3. 초전도 발전기의 이점

3.1 대용량기의 제작한계 확대

대용량기 특히 터빈 발전기의 제작한계는 주로 냉각

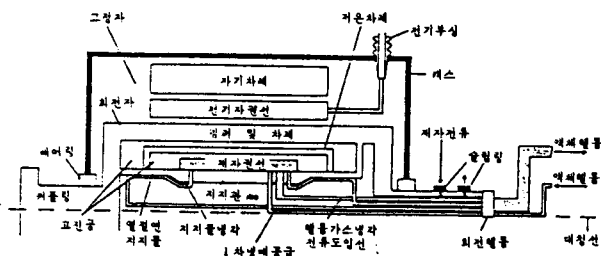


그림 1 초전도 교류발전기의 단면도

기술이 따라서 정하여진다. 현재에는 전기자권선은 손수에 의한 직접냉각, 계자권선은 수소가스에 의한 직접냉각 또는 수수에 의한 직접냉각이 채용되고 있다. 특히 회전자는 기계적 강도, 진동, 추수에 면에서 크기의 제한을 받아 대응량화의 제작한계를 가지고 있다. 일반적으로 발전기 용량 [KVA], 회전속도 [rpm] 과 기계적 크기와의 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

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

여기서 K는 출력계수, D는 고정자 내경, L은 철심길이이다. 그러므로 동일 체적으로 출력을 증가시키려면 출력계수를 크게 할 필요가 있는데 표 1은 냉각방식에 따른 출력계수를 나타낸다. 계자권선은 초전도화 하므로써 출력계수가 현저히 증가하며 따라서 대응량화의 제작한계를 확대할 수 있다.

표 1 냉각방식과 출력계수

냉각방식		출력계수
내회전발전기	공기냉각	1
	수소냉각(간접)	2
	수소냉각(직접)	4 - 6
	수수냉각	7 - 8
초전도발전기		10 - 14

3.2 소형화 및 고효율화 기동

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

3.3 발전기 효율향상

발전기의 손실에는 전기자권선 저항손실, 계자권선 저항손실, 철손과 풍손, 마찰손과 같은 기계손이 있는데 1GW급에서는 전자의 1-1.5% 정도의 손실이 있다. 초전도 발전기의 경우 계자권선 저항손실이 거의 없고 회전자의 기계손이 감소하여 초전도 상체를 유지하기 위한 냉동기 손실을 고려하여도 총손실이 동력에 비하여 반

표 2 초전도기에 의한 소형 고효율화율

항목	비교대상	2극 1.0
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

이하로 된다.

3.4 안정도 향상

초전도 동기 발전기의 특성을 종래의 발전기와 비교할 때 표 3과 같다. 동기리액턴스가 1/4 정도로 작아지고 시정수가 100배정도 커짐을 알 수 있다. 전력계통의 안정도는 발전기의 동기리액턴스가 송전선의 리액턴스의 합에 극비례하므로 동기리액턴스의 대폭적인 감소는 송전선의 허용 송전전력의 증대에 큰 공헌을 한다. 최근 대응량 전원은 수요적도 부족 대단히 먼 지점에 건설하는 경향이 있는데 계통 안정도가 증진되어 송전선 건설의 필요를 경감하여 주고 따라서 전력가격의 절감에도움이 된다.

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
개회시정수 [s]	750	5
개회과도시정수 [s]	0.2 - 0.5	0.03

4. 연구개발 현황

초전도 교류 발전기는 1960년대 후반에 들어와서 미국에서 처음으로 시험제작에 들어갔다(5). 그후 소련, 폴란드, 일본, 독일 등에서 개발에 착수하여 1000 MVA급 발전기의 개발이 진행되고 있다. 미국에서는 MIT공과대학이 초전도 발전기의 연구개발에 선도적 역할을 하고 있는데 1969년에 45kVA, 1973년에 3MVA 발전기를 제작

초전도 교류발전기의 개발현황과 과제

시험 하였고 현재에는 10 MVA 발전기를 시작중에 있다. Westinghouse 사는 1973년에 5 MVA, 1978년에 10 MVA 발전기를 제작하였고 또한 EPRI의 지원을 받아 용량 300 MVA, 2극, 60 Hz, 3상, 24 kV, 효율 99.4%, 길이 3.5 m, 폭 3.4 m, 높이 6.4 m, 중량 159톤, 회전자 직경 1m의 발전기를 개발하기 시작하였는데 미국의 전반적인 에너지 수요의 감퇴로 1984년에 개발이 중단되었다. 그리고 GE 사에서는 20 MW 기를 제작한바 있다. 소련은 1970년대에 1 MVA, 2 MVA 발전기를 개발한 바가 있으며 1980년 초에 미국의 GE 사와 공동연구를 통하여 20 MVA 동기조상기를 제작하여 실험을 마쳤다. 이것을 기초로 하여 300 MVA급 프로토타입기의 개발이 끝났고 다시 1200 MVA급의 개발 계획이 진행중이다. 프랑스에서는 알스톰사가 EDF의 지원을 받아 직경 1m의 모델 회전자를 완성하여 1980년부터 2년간에 걸쳐 기술시험을 마쳤다. 이것은 앞으로 1-2 GVA급 발전기의 회전자로 쓰일 것이다. 일본에서는 미쓰비시 및 후지에서 통산성 중요 기술 개발비 보조로 1974년부터 3년간 6 MVA 초전도 발전기를 시작하여 초전도 발전기의 원리의 실증, 문제점의 발견 등의 기본적인 문제를 다루었다. 연구의 제 2단계로 1977년부터 5개년 계획으로 30 MVA 초전도 동기조상기를 제작하여 현재 시험중에 있다. 이와는 별도로 히다치에서 50 MVA 발전기가 개발되었다. 1985년에 1000 MVA 급 발전기의 경제성 검토를 마치고 개발에 필요한 연구과제를 도출하였으며 2000년부터 상업운전에 들어갈 계획을 수립한바 있다.

5. 개발과제

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

(1) 회전자 : 회전자는 계자권선을 지지하는 토오코 류우브와 2종의 동심원통 담퍼로 구성된다. 이와같은 부분은 원심력이나 전자토오코에 견디어야 하고 상온-극저온간의 온도차에 의한 열응력에 대하여 충분히 견디지 않으면 안된다. 중요 연구과제는 축방향 열수축의 대책, 다중원통 회전자의 진동특성, 기계가공, 고강도 담퍼재의 개발,

용접 및 진공유지기술 등을 들 수 있다.

(2) 계자권선 : 계자권선은 고속회전에 있어서도 안정된 초전도 상태를 유지하여야 한다. 특히 원심력, 전자기력에 의한 도체이동을 극소화 하고 퀘칭을 발생하지 않는 권선지지 방법이 필요하다. 초전도선은 안정성, 가공성, 기계강도의 면에서 NbTi 가 유리하나 초전도화의 효과를 높이기 위하여 Nb₃Sn 의 채용이나 회전자 구조의 간략화, 속응여자방식을 위한 교류초전도선의 개발 등이 필요하다.

(3) 전기자권선 : 초전도기는 스토트레스 방식이 채용되어 전기자권선을 종래기 이상으로 높은 자계공간중에 놓이게 되고 높은 점적율이 얻어져서 출력전압의 고전압화나 전기자권선의 소형경량화가 가능하고 도체내의 와전류손이나 순환전류에 의한 손실대책이 필요하다. 주 과다전자력에 견디는 지지법, 조립기술 등이 중요 개발 과제가 된다.

(4) 헬륨 냉각 시스템 : 냉동기로 부터 나오는 액체헬륨은 고속으로 회전하는 회전축 끝부분에서 토오코 류우브 내로 주입되어 초전도 계자권선을 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 비상이 복잡한 구조로 되어 있고 고속으로 회전하므로 운전상태에서 회전자 내부의 이상상태, 즉 초전도 계자권선의 퀘칭, 부분적 과열, 진동도 저하 등의 검출과 그의 보호방식에 대한 연구가 필요하다.

6. 맥음말

초전도 교류발전기는 성능 및 경제성으로 볼때 종래의 발전기 보다 우수하며 대단위 용량기의 가능성도 커서 세계의 선진국에서 연구개발을 계속하고 있으며 2000년에는 1000MVA 급 초전도 발전기의 실용화가 확실히 되고 있다.

국내에서는 아직도 이 에대한 연구가 산발적으로 이루어지고 있는 실정인데 앞으로는 국가주도영으로 정하여 장기적이고 조직적인 연구개발이 이루어져야 하겠다.