

30kVA 초전도발전기 개발 (I) : 구조와 제작

손명환*, 백승규, 권영길, 고락길, 배준한, 이연용, 진흥범, 류강식
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

Development of 30kVA Superconducting Generator (I) : Structure and Manufacturing

M.H.Sohn*, S.K.Baik, Y.K.Kwon, R.K.Ko, J.H.Bae, E.Y.Lee, H.B.Jin, K.S.Ryu
Applied Superconductivity Project Team, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - For the first time in Korea, a 30kVA superconducting generator has been designed, developed and successfully tested recently. This is the forerunner of a 1MVA superconducting generator which is currently under development. The paper discusses the structure and manufacturing of a superconducting generator. Helium transfer coupling has 3 passages of the recovered Helium gas and a gas flow control system.

1. 서 론

초전도발전기의 연구개발에 대한 전세계적인 관심이 지난 20여 년 동안 계속되었다.[1,2] 초전도발전기는 기존발전기의 계자코일을 초전도화한 것으로서 원리적으로는 기존의 발전기와 동일하지만 구조적으로는 초전도 계자코일을 냉각하기 위한 복잡한 냉각시스템 및 단열구조를 요구한다. 기존의 발전기를 대신하여 초전도발전기를 사용할 경우 저항손실을 최소화함으로써 (a) 전력계통의 안정성 향상, (b) 효율면에서 약 1%의 향상, 그리고 (c) 크기면에서 약 60%, 무게면에서 약 50%의 감소를 이룰 수 있다.[3] 이러한 초전도기술은 산업문명의 고도화에 따른 전기에너지의 폭발적인 증가가 예상되어 향후 당면할 국가적인 에너지문제를 해결할 수 있는 열쇠가 될 것으로 기대된다.

또 선진국들만의 분야로 알려진 초전도응용 기기분야에서의 고급기반기술을 확보하고자 국내에서도 초전도발전기를 포함하는 차세대 고효율 발전플랜트 기술개발 과제를 1996년부터 과학기술부의 지원으로 한국전기연구소가 수행하고 있다. 1단계의 목표인 1MVA급 초전도발전기 개발의 전 단계로 4극 레이스트랙형 계자코일을 가진 30kVA 초전도발전기를 개발하게 되었다.

본 논문에서는 개발한 30kVA 초전도발전기의 구조와 제작과정을 소개 하고자 한다.

2. 초전도발전기의 구조

2.1 개략적인 구조

초전도발전기는 구리선대신에 초전도선재를 사용하여 계자코일을 만들었기 때문에 액체헬륨을 사용하여 계자코일을 초전도상태로 만드는 냉각구조를 가지고 있다. 냉매인 액체헬륨을 저장하기 위해서는 고진공상태를 유지하는 것이 매우 중요하다. 그림 1에 초전도발전기와 기존발전기의 구조를 비교하여 나타내었으며, 각 부분의 구성을 표 1에 나타내었다.

2.2 회전자의 냉각구조

회전자에 고정된 초전도자석의 냉각은 기본적으로 액체헬륨을 이용한 합침냉각이지만 액체헬륨이 강한 원심력을 받는다는 것, 액체헬륨을 회전체의 축단부와 연결된 정지부로부터 주입시키는 헬륨급배장치(Helium

Transfer Coupling, 이하 HTC)가 필요하다는 것 등이 정지되어 있는 자석과 다른 특징이다. 그림 2에 회전자 속에서의 액체헬륨 및 기체헬륨의 흐름을 나타내었다. 이러한 냉매의 흐름을 원활히 하기 위해 회전하는 HTC를 설계할 때 고려해야 할 중요한 사항들은 다음과 같다.

(1) 운전의 편리성과 신뢰성 때문에, 헬륨액화기 혹은 액체헬륨 듀어는 1800rpm의 회전시스템과 연결되어 있다. 따라서, 이송 중에 액체의 소모를 최소로 하면서 정지한 공급원으로부터 회전부로의 액체헬륨이송을 위한 특별한 결합장치가 필요하다.

(2) 회전자 내부에서 발생하는 기체헬륨은 (a) 구동부축의 토오크튜브에 설치된 열교환기와 (b) HTC측 토오크튜브에 설치된 열교환기 그리고 (c) 전류도입선을 지나는 세 가지 경로로 회수되는데, 각 경로의 다른 압력을 조절하여 회수되는 기체의 속도를 제어할 수 있는 가스배출 조절장치가 필요하다.

(3) 차가운 헬륨가스가 배출되는 회전부와 정지부의 접합부에서의 실링이 매우 중요한데, 실링이 좋지 못하면 HTC는 얼게되어 장치가 파괴되게 된다.

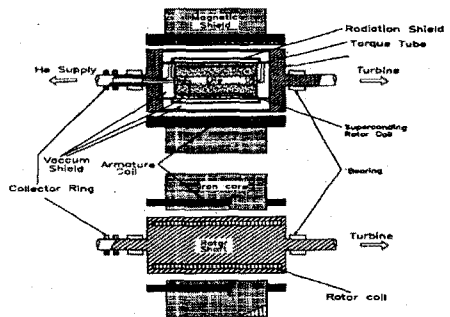


Fig. 1. Structures of Superconducting Generator and Conventional Generator

Table 1. Components of Superconducting Generator and Conventional Generator

		초전도발전기	기존 발전기
회전자	계자코일	초전도선	상전도선
	냉각매체	액체헬륨 (-269℃)	수소가스 (45~110℃)
회전자축	재료	비자성강	자성강
	구조	다중원봉 진공단열구조	단일축구조
고정자	계자코일	상전도선	상전도선
	냉각매체	물	물
	권선방식	공소권선	철심술못내 권선
회전자코일 외주		자기열드	철심

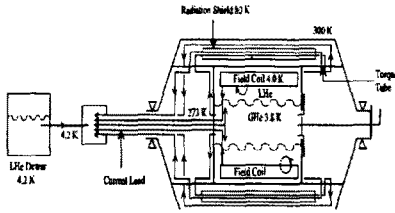


Fig. 2. Cooling System of the Rotor

3. 초전도발전기의 제작

개발한 30kVA 초전도발전기의 단면을 그림 3에 나타내었다. 본 절에서는 각 부분에 대한 제작방법과 실험 결과에 대해 상세히 설명하고자 한다.

3.1 계자코일

그림 4에 발란싱 교정이 끝난 4개의 계자코일이 부속된 샤프트를 나타내었다. 사용된 볼트들은 풀림방지를 위하여 SUS선으로 묶었다. 계자코일은 레이스트랙형으로 만들었으며, 사양은 표 2에 나타내었다.



Fig. 4. Field Coil Shaft

Table 2. Specifications of Field Coil

보빈 한 개당 턴 수	532(turns)
선재의 종류	NbTi
선재의 직경	1(mm)
선재의 임계전류치	580(A)(at 5(T))
선재의 필라멘트 수	60개
보빈 한 개당 소요 선재 길이	약 400(m)
보빈 재질	SUS316L

본 발전기는 4개의 회전자극을 가지므로 각 자극에 하나의 코일 보빈이 사용된다. 보빈의 재질은 비자성체인 FRP나 SUS강을 일반적으로 사용하지만 여기서는 SUS316L을 사용하였다. 보빈과 초전도선 사이의 절연을 위하여 FRP절연판을 사용하였고, 각 권선층 사이에 층간절연지를 사용하였다. 권선장력은 약 5.7kg중이다.

각 코일마다 퀘칭실험을 행하였는데 그림 5에 그 결과를 나타내었다. 퀘칭전류의 트레이닝효과를 확인할 수 있었고, 모두 370A이상의 퀘칭전류를 나타내었다. 4개

의 코일이 모두 부착된 상태에서는 퀘칭전류가 240A로 낮았는데 이것은 각 코일을 연결한 부분이 완벽하게 고정되지 않았기 때문으로 생각되어 예폭시로 고정된 다음 조립을 하였다.

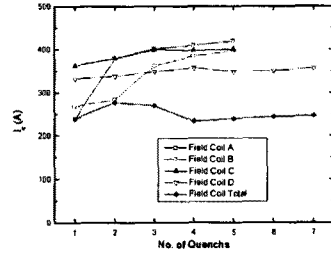


Fig. 5. Variation of quench currents of field coils

3.2. 전기자코일

계자코일의 제작과 마찬가지로 실제 제작 상황을 고려하여, 프로그램의 변수들을 조정하였다. 슬롯내의 점적율은 0.65로 하였고, 슬롯치의 폭은 제작 후의 기계적 강도를 고려하여 6(mm)로 하였다. 전기자의 슬롯의 형상을 그림 6에 나타내었다.

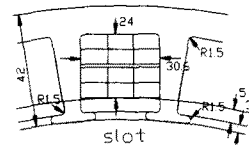


Fig. 6. Armature Slot and Armature Conductors

실제 전기자 코일이 FRP 슬롯에 끼워질 경우 발전기의 운전 중에 발생하는 열이 밖으로 방출되기 어렵다. 슬롯에서의 온도상승을 방지하기 위하여 FRP 슬롯을 적층할 때에 10 mm폭을 가진 3개의 통풍구를 방사방향으로 설치하였고 비자성체를 이용한 스페이서로 지지하였다. 최종 제작된 전기자코일은 예상보다 권선단부가 길어졌는데 이것은 전기자의 슬롯내 점적율을 크게 설정하였기 때문이다.

실제 권선에서는 층간 절연지 등이 들어가기 때문에 계자코일의 점적율(packing factor)이 달라질 수 있다. 예비 권선실험을 통하여 직경 1mm인 선재의 경우 점적율이 0.5447임을 확인하였으며, 이 값을 설계 프로그램의 초기 입력값으로 사용하였다.

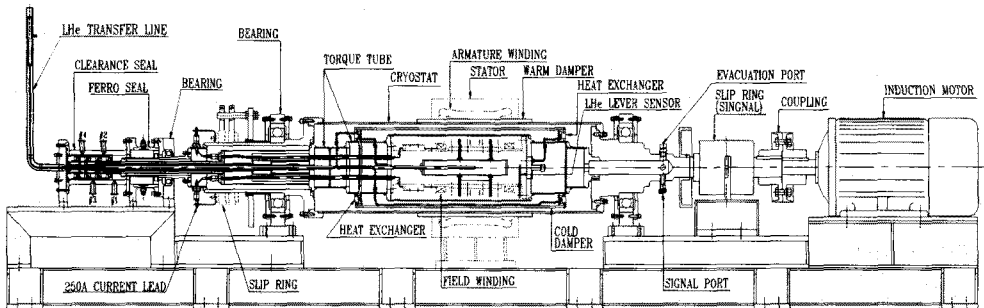


Fig. 3. Longitudinal Section of 30kVA Superconducting Generator

3.3. 다중원통 회전자

액체헬륨 용기의 단열을 위해 용기외부는 진공층과 슈퍼인슐레이션이 되어 있다. 헬륨수송관을 따라 주입된 액체헬륨은 내부의 관들을 냉각시키면서 헬륨용기에 들어오고 충분한 냉각이 이루어진 후에 초전도코일을 냉각시킨다. 주입된 액체와 용기 속에서 기화한 기체를 구분하여 액체헬륨의 주입이 잘 이루어지도록 하였다. 기화한 기체헬륨은 토오코튜브에 설치된 2개의 열교환기와 전류도입선을 통과하여 회전자 밖으로 배출된다. 이때 가스배출 조절장치를 이용하여 각 배출 라인의 압력들이 평형이 되도록 조절할 수 있고, 열교환기의 역할은 양측으로부터 침입하는 열을 최대한 억제한다. 또, 외부로부터 침투하는 복사열을 차단하고 외부 자속의 침투를 막도록 저온 댐퍼판을 진공층에 설치하였고, 회전자의 회전난조를 방지하도록 제동력을 발생시키는 상온 댐퍼판은 진공조의 외벽에 설치하였다.

3.4. 진공 및 실링

회전자 내의 모든 진공은 정지시에 고진공으로 펌핑하는 구조이며, 고진공 및 고압이 요구되지 않는 배기경로들 사이의 차단은 S. Jacob 등[5]이 사용한 clearance seal을 사용하였으며, 외부 하우징의 냉각을 방지하기 위해 3개의 1kW 밴드히터를 사용하였다. 그리고 회전부와 고정부 사이에 만들어지는 진공층(혹은 기체헬륨층)과 바깥의 공기층의 실링은 특히 중요한데, 이곳에 자성유체를 이용한 페로실링(일본 페로테크사)을 사용하였다. 페로실링의 사용온도 범위는 0~80℃이기 때문에 온수를 사용하여 응결을 방지하였다.

3.5. 전류도입선과 슬립링

전류도입선은 가장 큰 열침입 경로 중의 하나이며, 계자코일에 공급하는 전류의 흐름 자체에 의한 열도 고려되어야 하므로 냉각에 신경이 쓰이는 부분이다. 사용한 피드쓰루의 전류용량은 250A이었고, 회전자 내부에 위치한 전류도입선은 저온의 기체헬륨이 배출되는 통로를 만들어 충분히 냉각되도록 설계하였으며, 계자코일에 직류전류를 공급하여 주는 슬립링을 HTC측에 설치하였다.

3.7. 쉘치보호와 센서

발전기와 전원장치 사이에 이상이 발생하면 발전기의 보호를 위해 계자코일에 저장된 에너지를 급속히 소모시켜야 하며, 이를 위해 보호저항이 필요하다. 회전자 바깥 부분의 전류도입용 슬립링에 보호저항을 병렬로 연결하여 내부에서의 발열을 최소로 하였으며, 실험 중에는 액체질소에 잠기게 하였다. 보호저항의 상온에서의 저항은 0.3Ω이었다.

회전하는 cryostat내에 저장된 액체헬륨냉매의 양을 알기 위해 액체헬륨레벨센서를 설치하였으며, 계자코일 샤프트, 저온댐퍼 및 열교환기의 온도변화를 감지하기

위 측정장 및 저온에서 사용이 가능한 UGR 온도센서를 사용하였다. 신호는 모터구동부측에 설치된 신호처리판을 통하여 검출할 수 있도록 하였다.

3.8. 조립 및 설치

각기 제작된 부분품들을 대략 다음과 같은 순서로 조립하였다.

- ① 베드(방진판 12개) 설치 → ② 계자코일 및 샤프트 → ③ 헬륨조(슈퍼 인슐레이션 포함) 및 토오코 튜브 → ④ 열교환기 및 저온 댐퍼(슈퍼 인슐레이션 포함) → ⑤ 진공조 및 양쪽 샤프트 → ⑥ 고정자(전기자코일) → ⑦ 지지 베어링 → ⑧ 슬립링 및 전류도입선 → ⑨ 페로실 → ⑩ HTC → ⑪ 유도전동기 및 커플링

한편, 실제 냉각을 하는 동안의 균일한 열수출을 고려한 저속모터가 추가로 필요하였다. 15rpm으로 회전시켰다. 그림 7은 완성된 30kVA 초전도발전기를 나타낸다. 유도전동기 뒤의 모터가 저속회전용이다.

4. 결 론

회전자 cryostat의 고진공(1×10^{-6} Torr) 단열특성이 우수하여 액체헬륨 주입 및 냉각실험은 성공적이었고, 1800rpm으로 회전시켜 30kVA 발전기의 전자기 특성시험을 행할 수 있었다.

본 연구는 과학기술부 지원 스타프 프로젝트 과제인 "차세대 고효율 발전플랜트 기술개발"로 수행한 연구결과입니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Lambrecht, D., "Superconducting turbogenerator: status and trends", Cryogenics, Vol. 25, 619-627, 1985.
- [2] M. Mich, S.H., Keim, T.A., Chari, M.V.K., Gamble, B., Giffieries, M.J., Jones, D.W., Laskaris, E.T., and P. T. "Design studies of Superconducting generator", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 15, 703-706, 1979.
- [3] Bentley, J.L., "Supercool generations", IEEE Spectrum, Vol. 35, 1983.
- [4] 김준원, 이민래, 손명환, 권영길, "극저온 환경 하에서의 레이저투과형 초전도 계자코일의 쉘치탐지를 위한 음향방출기법 연구에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 '98추계학술발표논문집, 290-305, 1998.
- [5] S. Jacob, S.Kasthurirengan, R. Karunanithi, T. Subramarayana, K.A. Durga Prasad, M.S.N.Raji and J.L. Bhattacharya, "Rotating Helium Transfer Coupler for 200kVA Superconducting Generator", Proceedings of ICEC16 ICMC, 949-952, 1996.



Fig. 7. 30kVA Superconducting Generator