

30kVA 초전도발전기의 회전자 개발과 냉각 특성

손명환, 권영길, 백승규, 고락길, 이언용, 하동우, 조영식, 김경한, 류강식
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

Development and Cooling Properties of 30kVA Superconducting Rotor

M.H.Sohn, Y.K.Kwon, S.K.Baik, R.K.Ko, E.Y.Lee, D.W.Ha, Y.S.Jo, K.H.Kim, K.S.Ryu
Applied Superconductivity Project Team, Korea Electrotechnology Research Institute

mhsohn@keri.re.kr

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 design, development and cooling experience of a superconducting rotor. This 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 초전도계자코일을 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) 크기와 무게면에서 약 40%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 초전도응용기기분야에서의 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 회전자부분 특히 액체헬륨 급배장치와 액체헬륨용기의 구조와 냉각특성에 관하여 설명하고자 한다.

2. 초전도발전기의 구조와 요구조건

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 표1에 나타내었다.

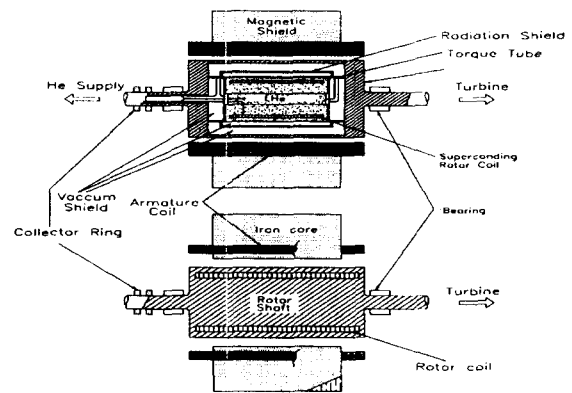


Fig. 1. Structures of Superconducting Generator and Conventional Generator

Table 1. Components of Superconducting Generator and Conventional Generator

			초전도발전기	기존 발전기
회전자	계자코일	종 류	초전도선	상전도선
		냉각매체	액체헬륨 (-269℃)	수소가스 (45~110℃)
회전자축	구 조	재 료	비자성강	자성강
		구 조	다중원동 진공단열구조	단일축구조
고정자	전기자코일	종 류	상전도선	상전도선
		냉각매체	물	물
		권선방식	공소권선	철심슬롯내 권선
전기자코일 외주			자기원드	철 심

2.2 회전자의 냉각구조와 설계요구조건

회전자에 고정된 초전도자석의 냉각은 기본적으로 액체헬륨을 이용한 합침냉각이지만 액체헬륨이 강한 원심력을 받는다는 것, 액체헬륨을 회전체의 축단부로부터 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 때에는 다음 사항들을 고려하여야 한다.

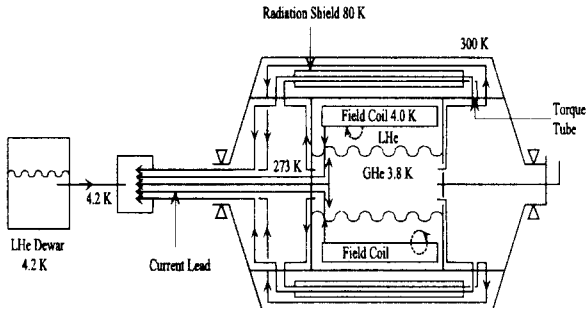


Fig. 2. Cooling System of the Rotor

(1) 운전의 편리성과 신뢰성 때문에, 헬륨액화기 혹은 액체헬륨 듀와는 1800rpm의 회전시스템과 분리될 수 없다. 그래서, 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) 이 기체헬륨은 헬륨액화기가 고장나지 않도록 공기나 베어링의 윤활제로 오염되지 않아야 한다. (4) 여러 가지 실링 시스템은 액체헬륨으로의 열침입을 막기 위해 설치되어야 한다. (5) 액체 이송관의 단열용 진공부분은 회전자의 진공챔버와 통하기 때문에 발전기를 운전하기 전에 진공배기 되어야 한다. (6) 액체 및 기체 헬륨 경로용 동축 파이프라인

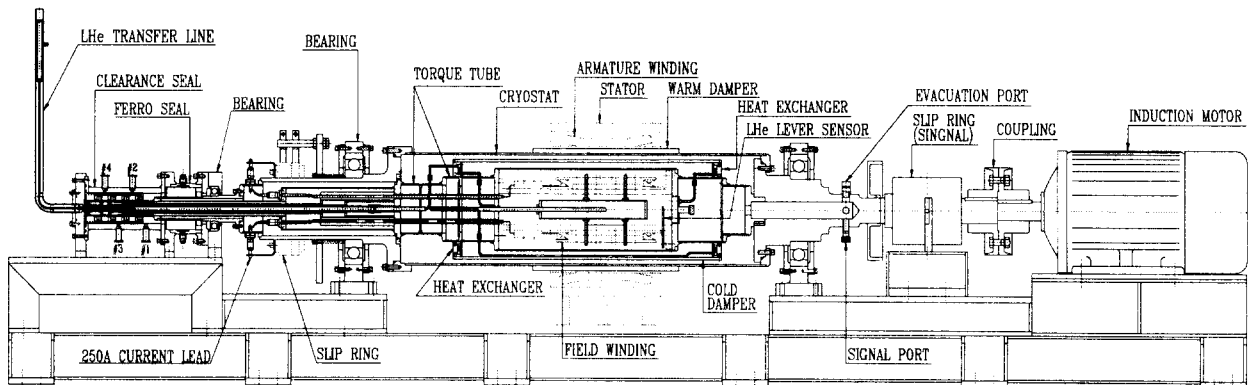


Fig. 3. Longitudinal Section of 30kVA Superconducting Generator

은 조립이 쉬워야 하고 운전 하에서의 기능도 만족되도록 설계되어야 한다. (7) 결합장치는 장시간 동안 어떤 조치 없이도 연속적으로 동작할 수 있어야 하고 우수한 신뢰성을 가져야 한다.

3. 초전도발전기의 제작

개발한 30kVA 초전도발전기의 단면을 그림 3에 나타내었다. 본 절에서는 각 부분에 대한 배치와 기능 등을 설명하고자 한다.

3.1 계자코일

30kVA 초전도발전기의 계자코일은 레이스트랙형 코일로서 만들었다. 각 코일의 퀴치실험을 통하여 퀴치전류의 트레이닝효과를 확인하였는데, 약 370A 정도의 퀴치전류를 나타내었다. [4] 4개의 코일이 모두 부착된 상태에서는 퀴치전류가 240A로 낮았는데 이것은 각 코일을 연결한 부분이 완벽하게 고정되지 않았기 때문으로 생각되어 에폭시로 고정한 다음 조립을 하였다. 그림 4에 발란싱 교정을 한 후의 계자코일 샤프트를 나타내었다. 사용된 볼트들은 풀림방지를 위하여 SUS선으로 묶었다.

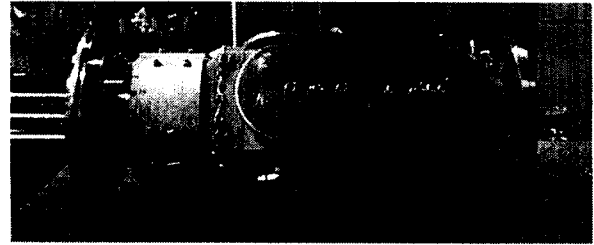


Fig. 4. Field Coil Shaft

3.2. 다중원통 회전자

액체헬륨을 회전자 용기에 저장하기 위해서 용기의 외부는 진공층과 슈퍼인슐레이션으로 되어 있다. 헬륨수송관을 따라 주입된 액체헬륨은 내부의 관들을 냉각시키면서 헬륨용기에 들어오고 충분한 냉각이 이루어진 후에 초전도코일을 냉각시킨다. 주입된 액체와 용기 속에서 기화된 기체를 구분하여 액체헬륨의 주입이 잘 이루어지도록 하였다. 기화된 기체헬륨은 토오크튜브에

설치된 2개의 열교환기와 전류도입선을 통과하여 회전자 밖으로 배출된다. 이 때 가스배출 조절장치를 이용하여 각 배출 라인의 압력들이 평형이 되도록 조절할 수 있다. 열교환기의 역할은 양측으로부터 침입하는 열을 억제하는 것이다. 또, 외부로부터 침투하는 복사열을 차단하고 외부 자속의 침투를 막도록 저온 댐퍼관을 진공층에 설치하였고, 회전자의 회전난조를 방지하도록 제동력을 발생시키는 상온 댐퍼관은 진공조의 외벽에 설치하였다.

3.3. 전류도입선과 피드쓰루

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 설계하였다.

3.4. 슬립링

회전부의 신호를 고정부에서 검출할 수 있도록 신호용 슬립링을 모터구동부축에, 그리고 계자코일에 직류전류를 공급하여 주는 슬립링을 HTC측에 각각 설치하였다.

3.5. 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 냉각을 방지하였다.

3.6. 쉐트보호

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 액체헬륨에 잠기게 하였다. 보호저항의 상온에서의 저항은 0.3Ω이었다.

3.7. 각종 센서

회전하는 cryostat내에 저장된 액체헬륨냉매의 양을 알기 위해 액체헬륨레벨센서를 설치하였으며, 계자코일 샤프트, 저온댐퍼 및 열교환기의 온도변화를 감지하기 위해 자장 및 저온에서 사용이 가능한 CGR 온도센서를 사용하였다.

4. 냉각 실험 및 특성

4.1 냉각실험

그림 5에 실험장치의 배치를 개략적으로 나타내었다. 회전자의 냉각은 액체질소를 이용한 예냉을 거친 다음 액체헬륨을 사용하여 최종적으로 냉각하였다.

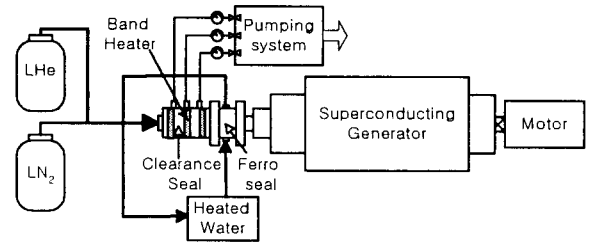


Fig. 5. 30kVA S. G. Test Set-up

먼저 액체질소로 예냉을 하기 위해 주입량을 일정하게 조절할 수 있는 특별히 고안된 액체질소 주입장치를 HTC의 주입구에 연결한다. 진공 펌프를 켜 다음 HTC의 밸브 #1, #2, #3, #4를 열어서 진공 상태를 만든다. 회전자 내부에 질소가스를 주입하여 대기 중으로 불어낸다. 가스주입과 펌핑을 3회정도 반복한 다음 헬륨가스를 주입한다.

감속모터에 벨트를 연결하여 15rpm으로 저속 회전시킨다. #2, #3, #4의 밸브를 열어 진공상태로 만든다. 액체질소 통의 주밸브를 열고 질소 주입장치의 밸브를 조작하여 질소가스를 대기로 방출시킨다. 액체가 나오기 시작하면 대기 배출 밸브를 잠그고 주밸브를 열어서 회전자에 액체질소를 서서히 주입시킨다. 액체질소가 회전자 내부에 차기 시작하면서 온도가 내려간다. 액체질소온도(77K)가 되고 30분 정도 경과한 다음 공급을 중단한다. 2~3시간 온도를 유지한 다음, 열교환기로 데운 헬륨가스를 서서히 흘린다. #2, #3, #4 밸브를 열어 가스가 대기 중으로 배출되게 한다.

약 200K가 되면 #2, #3, #4 밸브를 잠그고 대기압보다 약간 높은 압력상태에서 가스공급을 중단한다. 회전자 내부에 헬륨가스를 채운다음 듀와의 트랜스퍼 튜브를 주입구에 연결한다. 저압을 만들기 위해 진공을 뽑은 다음 액체헬륨 주입밸브를 연다. #2번 출구밸브를 펌프쪽에서 대기상태쪽으로 전환하고, #2 압력게이지의 눈금이 #3, #4 압력게이지 눈금과 같게 #3, #4의 진공 펌프를 조절한다. 계자코일 샤프트의 온도를 계속 감시한다. 온도가 4.2K ~ 5K가 되면 액체헬륨이 저장되기 시작한다. 액체헬륨의 액면 높이가 3cm 정도가 되면 15rpm의 감속모터의 벨트를 분리한다. 구동모터를 속도 300rpm로 회전시킨다. 액체가 헬륨용기의 외벽으로 쏠리기 때문에 액면은 다시 0이 된다. 약 5cm 이상이 되어 계자코일 샤프트가 충분히 액체헬륨에 잠긴 상태에서 실험을 시작하였다.

4.2 냉각특성

회전자 내의 두 계자코일 보빈의 측면이 만나는 모서리쪽 중심에 위치해 있는 온도센서로부터 온도를 감지하였다. 냉각순서에 따른 온도변화를 그림 6에 나타내었다. 액체질소를 이용한 예냉은 약 8시간 소요되었고, 따뜻하게 데운 헬륨가스로 용기 속의 질소를 제거하는데는 20~30시간 가량 소요되었다. 액체헬륨의 저장 즉 레벨감지는 액체헬륨 주입으로부터 약 5~6시간이 경과하고 계자코일보빈의 온도가 5K이하가 되고 나서야 가능하였다.

또 기체질소 및 기체헬륨이 배출되는 곳의 2군데 페로실링의 하우징 외벽과 HTC의 외벽의 온도변화를 K-타입 열전대를 이용하여 감지하였다. 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 배출되는 기체로 냉각되는 clearance seal의 하우징 외벽의 온도는 회전자 내부의 온도변화와 같은 경향을 보였고, 페로실링의 하우징 외벽 온도변화는 사용온도영역인 0~80℃를 유지하였다.

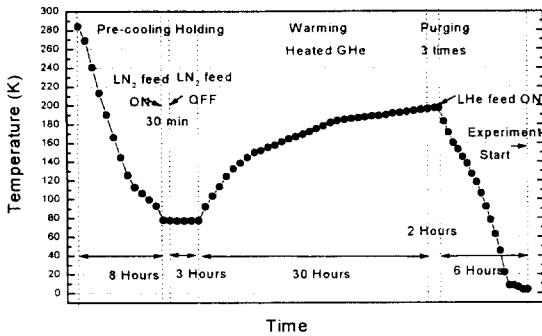


Fig. 6. Temperature Behavior vs. Time of Superconducting Rotor

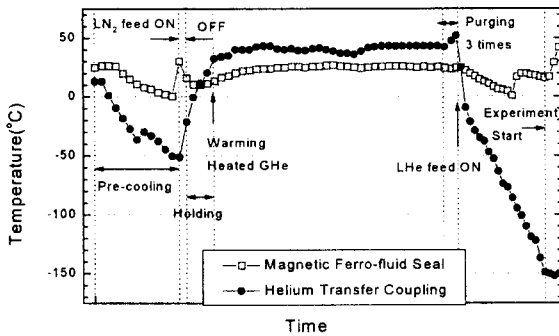


Fig. 7. Temperature Behavior vs. Time of Clearance Seal Housing and Ferrofluid Seal Housing

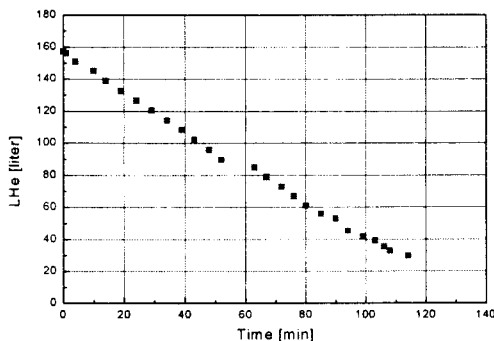


Fig. 8. Transfer LHe vs. Time

그림 8에 액체헬륨이 용기 내에 저장되기 시작할 때부터 회전자에 주입되는 액체헬륨의 양을 나타내었다. 액체헬륨의 주입량은 시간 당 약 60ℓ로 큰 값을 보였는데, 이것은 용기 내에서 발생하는 기체헬륨의 강제적인 배기가 원인으로 판단된다.

또 실험이 끝난 후 내부온도가 상온이 되는데 약 1주일 정도가 경과될 정도로 진공단열 특성이 우수하였다.

5. 결 론

회전자 cryostat의 고진공(1×10^{-6} Torr) 단열특성이 우수하여 냉각은 성공적이었고, 액체헬륨을 저장하여 30kVA 발전기의 전기적인 특성 시험을 행할 수 있었다. 그러나, clearance seal에 사용한 카본링에서 발생한 카본 입자들이 HTC쪽으로 배출되는 기체 속에 섞여 나왔기 때문에 헬륨액화기의 보호를 위해 회수라인을 연결하지 않고 배출되는 기체헬륨을 대기 중으로 방출할 수밖에 없었다. 향후 1MVA급 초전도발전기에 적용하기 위해서는 배출되는 기체헬륨의 회수장치뿐만 아니라 액체헬륨의 소모를 줄이는 보다 개선된 장치 및 방법이 요구된다.

본 연구는 과학기술부 지원 스태프로젝트 과제인 "차세대 고효율 발전플랜트 기술 개발"로 수행한 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Lambrecht, D., "Superconducting turbo generators: status and trends", *Cryogenics*, Vol. 25, 619-627, 1985.
- [2] Minnich, S.H., Keim, T.A., Chari, M.V. K., Gamble, B.B., Jefferies, M.J., Jones, D. W., Laskaris, E.T., and Rios, P.A., "Design studies of Superconducting generators", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 15, 703-711, 1979.
- [3] Kirtley, J.L., "Supercool generations", *IEEE Spectrum*, 28-35, 1983.
- [4] 이준현, 이민래, 손명환, 권영길, "극저온 환경 하에서의 레이스트랙형 초전도 계자코일의 쿨링탐지를 위한 음향방출기법 적용에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 '98추계학술발표회 논문집, 290-305, 1998.
- [5] S.Jacob, S.Kasthuriengan, R. Karunanithi, T.Suryanarayana, K.A. Durga Prasad, K.S.N.Raju and J.L. Bhattacharya, "Rotating Helium Transfer Coupling for 200kVA Superconducting Generator", *Proceedings of ICEC16 ICMC*, 949-952, 1996.