

### 30[kVA] 초전도발전기 제작 및 특성

## Fabrication and Characteristics of 30[kVA] Superconducting Generator

손명환\*, 권영길\*, 백승규\*, 박도영\*, 이연용\*, 조영식\*\*, 류강식\*\*\*, I. Muta#, T. Hoshino#

Myung-Hwan Sohn\*, Young-Kil Kwon\*, Seung-Kyu Baik\*, Doh-Young Park\*, Eon-Yong Lee\*,  
Young-Sik Jo\*\*, Kang-Sik Ryu\*\*\*, Itsuya Muta# and Tsutomu Hoshino#

**Abstract** : A 30(kVA) superconducting generator (SCG) is built and tested at Korea Electrotechnology Research Institute(KERI) in Korea. This superconducting generator has an air-gap winding instead of the typical steel teeth structure. The rotor has 4 field coils of race-track type with NbTi superconducting wires. The rotor is composed of two dampers and a liquid helium container in which the field poles reside. The space between the outermost damper and the container is vacuum insulated. A ferrofluid seal is used between the stationary part connected to the coupling and the rotor. A helium transfer coupling(HTC) has 3 passages of the recovered helium gas and a gas flow control system. The open circuit test and sustained short circuit test are performed to obtain the open circuit characteristics (OCC) and short circuit characteristics (SCC). Also, the test results under the light load (up to 3.6(kW)) are given.

The structure, manufacturing and basic test of the 30[kVA] SCG are discussed.

**Key Words** : Superconducting Generator, Quench Current, Open and Short Circuit Characteristics

### 1. 서 론

전력수요의 급격한 증가에 대처하기 위해 대용량 발전기의 사용이 일반화되었으나, 발전기의 대형화는 동기리액턴스의 증가로 인한 제약이 존재한다. 초전도체를 사용한 발전기는 높은 전류밀도를 활용하여 기존의 발전기로는 실현이 불가능한 대용량 발전기를 구현할 수 있으므로 발전효율을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 안정성 면에서도 우수할 것으로 기대되어져 왔으며, 지금까지 여러 가지 형태의 초전도발전기(Supercon-

ducting Generator: 이하 SCG)에 대한 많은 보고들이 있다. [1]-[7]

일반적으로 SCG라 함은 계자만을 초전도체로 만든 경우를 말하고, 계자 및 전기자 모두를 초전도체로 만든 경우에는 전초전도발전기(fully SCG)라 한다. 알려진 바와 같이, 초전도계자가 초전도상태를 유지하기 위해서는 액체헬륨 속에 잠기어야 한다. 따라서, 회전하는 극저온 용기에 액체헬륨을 지속적으로 공급하기 위해서 초전도회전자는 복잡한 구조를 가진다. SCG에 사용되는 재료와 기술은 기존의 발전기와는 매우 다르다.

SCG의 성공적인 개발을 위해서는 먼저 초전도계자가 초전도상태로 유지되기 위해 임계온도 이하인 액체헬륨온도(4.2(K))까지 냉각이 되어야 하고, 이 냉각된 극저온상태가 지속적으로 유지되어야만 한다. 이를 위해서는 극저온 냉각 기술 및 고진공 단열 기술이 필수적이다.

본 연구에서는 우리나라 최초로 개발에 성공한 30[kVA] SCG의 구조와 제작과정을 소개하고, 계자코일의 퀸치특성시험, 액체헬륨을 이용한 냉각특성 시험 및 전기적 특성 평가 결과에 대해 논의한다.

### 2. 30[kVA] 초전도발전기 구조와 제작

#### 2.1. 구성 및 특징

그림 1은 VVVF 인버터로 구동되는 유도전동기를 가진 30[kVA] SCG를 나타낸다. 제작한 SCG의 길이방향 단면과 수직횡단면을 그림 2와 3에 각각 나타낸다. 또한, 주요 치수와 인자를 표 1에 정리하였다.



그림 1. 30[kVA] 초전도발전기  
Fig. 1. 30[kVA] SCG

\* 정 회 원 : 한국전기연구원  
\*\* 학생회원 : 창원대학교 박사과정  
\*\*\* 정 회 원 : 차세대초전도응용연구개발사업단장  
# 정 회 원 : 교토대 전기공학부 교수  
원고접수 : 2001년 10월 12일  
심사완료 : 2001년 11월 09일

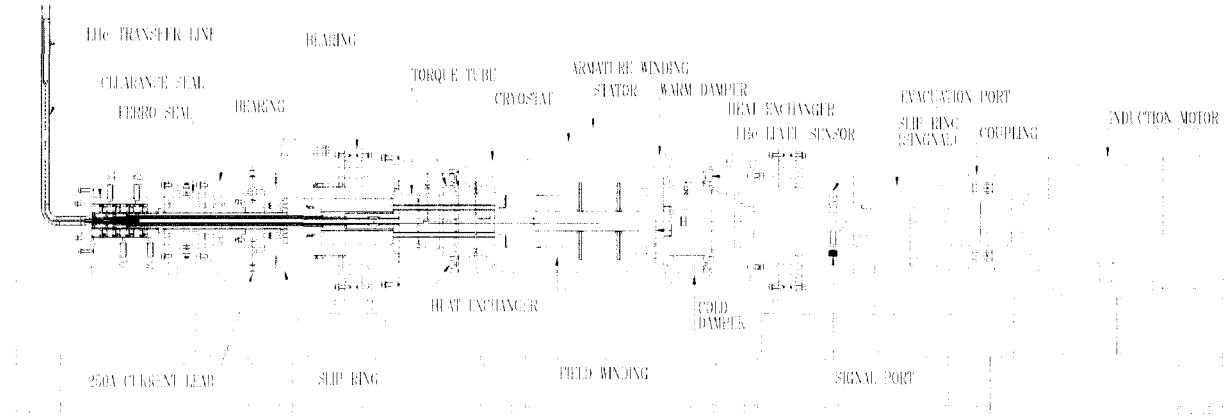


그림 2. 30(kVA) 초전도발전기의 길이방향 단면도.  
Fig. 2. Longitudinal Section Diagram of 30(kVA) SCG.

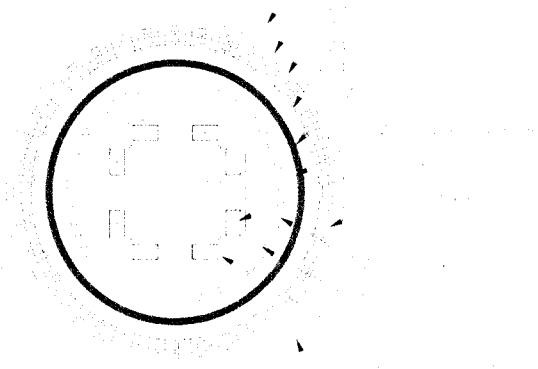


그림 3. 30(kVA) 초전도발전기의 횡단면도.  
Fig. 3. Cross-sectional Dimension of 30(kVA) SCG

표 1. 30(kVA) 초전도 발전기의 사양  
Table 1. Specifications of 30(kVA) SCG

구 분		제 원	
자기차폐부	외반경	278(mm)	
	내반경	250(mm)	
전기자	외반경	250(mm)	
	내반경	213(mm)	
상온 차폐부	외반경	181(mm)	
	내반경	166(mm)	
극저온 차폐부	외반경	144.5(mm)	
	내반경	136.5(mm)	
고정자 슬롯 수		36	
자성체 재질		S23	
상당 Turn 수		60(Turn)	
고정자 길이		192(mm)	
정격전압	220[V]	역률	0.9
극수	4[극]	주파수	60[Hz]

본 연구에서 제작한 SCG의 구성 및 주된 특징은 다음과 같다.

- 회전자는 3개의 동축 어셈블리로 구성된다. 맨 안쪽의 어셈블리는 4개의 레이스트랙형 계자코일, 샤프트, 헬륨공급관, 버퍼탱크 등을 포함하고, 두 번째 어셈블리는 80[K]를 유지하고 복사열 및 외부자장의 침투를 막는 역할을 하는 구리로 된 저온댐퍼와 2개의 열교환기 및 2개의 토크튜브로 구성된다. 최외각 어셈블리는 고진공 챔버이다. 챔버의 외부표면에는 상온댐퍼의 역할을 하는 15(mm) 두께의 구리 원통이 붙어 있다.
- 토크 튜브는 내부의 극저온 용기와 상온의 구동부축 및 고정부축의 샤프트와 기계적으로 연결되어 있다. 전도에 의한 열침입을 막기 위해 각 튜브의 가운데에 열교환기가 설치되어 있다. 계자권선을 냉각하고 기화된 저온의 기체헬륨은 이 열교환기를 약 80-100[K]의 온도를 유지하도록 한다.
- 냉각과정에서 회전자는 열수축을 하게되는데, 이것을 고려하여 구동부축의 샤프트와는 특별한 열수축 조인트를 설치한다.
- 저온의 기체헬륨이 냉각시키는 한 쌍의 전류도입선은 계자권선의 양단을 슬립링과 연결한다.
- 회전하는 헬륨공급장치(HTC)는 고정부축의 샤프트에 연결된다. 이 장치는 정지한 듀위 내의 액체헬륨을 회전하는 초전도계자에 공급한다. HTC는 기화된 기체를 3가지 경로를 통하여 회수한다.
- 효과적인 전자기 차폐와 외부장의 순간적인 변동에 대한 감쇠를 위해 상온 및 저온의 이중 댐퍼를 채택하였다.
- 회전자에 사용한 재료는 모두 비자성이다.
- 고정자는 FRP로 적층한 구조체를 가진 "공심형" 전기자권선, 기계실드 그리고 기존의 고정자 틀로 구성되고, 공냉식이다.
- 전기자는 작은 직경의 구리선 다발로 구성되어 있다.

**2.2. 회전자와 냉각시스템**

계자권선은 4개의 레이스트랙형 코일로 구성되고, 각 코일은 SUS 보빈에 권선되어 있다. 그림 4는 발란스 시험이 끝난 후의 계자이다. 초전도 권선은 액체헬륨에 잠기고, 액체헬륨의 흐름의 분포는 원심력이 작용하는 서머사이혼(thermosyphon) 효과로 유지된다[8]. 기화된 기체는 분리되어 회전자 중심에 있는 버퍼 통 주위로 모아지게 되는데 이 저온의 기체가 회전자 외부로 배출되기 전에 토크튜브와 전류도입선을 지나면서 이들

을 냉각시키게 된다. 이 결과로 회전자 외부로부터의 전도에 의한 열침입을 줄여주는 효과를 가진다.

정지한 듀와(dewar)에서 회전자 내부로 액체헬륨을 연속적으로 공급하고 회수하기 위해, 특별한 장치가 설치되었다. 회전자와 이 장치 사이에 연결되는 부분에 자성유체를 이용한 실링을 사용하였다. 배출되는 기체에 의한 과냉각을 막기 위해 이 실링의 주위에 온수를 흘린다.

헬륨을 공급할 때 기화된 헬륨기체의 압력이 대기압보다 높아지면, 액체헬륨을 회전자 속으로 쉽게 공급할 수가 없다. 이것을 방지하기 위해 내부에 버퍼 캔을 설치하여 공급된 액체와 기화된 기체를 분리하도록 하였다. 회전자로부터 배출되는 기체헬륨은 3가지 경로를 통하여 나온다. 각 경로에서의 압력은 서로 다른데, 각 경로의 흐름을 좋게 하기 위해 외부의 펌핑시스템에서 각 경로의 흐름을 밸브로써 조절할 수 있다.

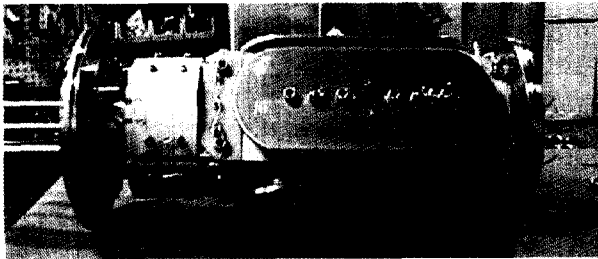


그림 4. 발란싱 시험 후의 계자권선.  
Fig. 4. Field Winding after Balancing Test.

### 2.3. 전기자

전기자는 “공냉식” 권선형이고, FRP의 구조재를 가진다. 강자성의 실드가 둘레를 싸고 있다. 권선은 2중층으로 되어 있다. 상당 턴수는 60이고, 1상은 코일에서의 와전류 손실을 최소화하기 위해 직경 1.4[mm]인 26개의 구리 스트랜드(strand)를 가진다. 스트랜드가 많아 제작하면서 단부의 길이가 예상보다 다소 길어 졌다.

## 3. 설치 및 냉각실험

30[kVA] 초전도발전기를 진동방지가 설치된 베드 위에 설치하였다. 발전기는 회전속도가 각각 1800[rpm]과 15[rpm]인 2개의 유도전동기와 기계적으로 연결되어 있다.

계자에는 초전도마그네트 전원장치로부터 DC 전류가 공급된다. 전원장치는 ramp rate 0.01-10[A/sec]를 갖는 정격 10[V], 500[A] 이다. 초전도 계자권선에서 퀵치가 발생할 때 계자에 저장된 에너지를 재빨리 방전하기 위해 슬립링의 양단에 0.3[Ω]의 방전용 저항을 달았다.

그림 5는 냉각실험장치의 배치를 나타낸다. 냉각 실험을 위해 먼저 정지한 상태에서 초전도 회전자의 진공도가  $10^{-6}$  [torr] 이하가 되도록 진공을 뽑았다. Seal off 밸브를 사용하여 실링한 후 진공배기 시스템을 분리한 다음 원주방향으로의 회전자의 균일한 열수축을 고려하여 회전자를 15[rpm]의 저속으로 회전시켰다. 초기 냉각은 액체질소를 사용하였는데, 상온(284[K])에서 77[K]까지 약 8시간이 경과되었다. 이 때 초전도 권선의 저항은 56.5[Ω] (284[K])에서

8.9[Ω](77[K])으로 떨어졌다.

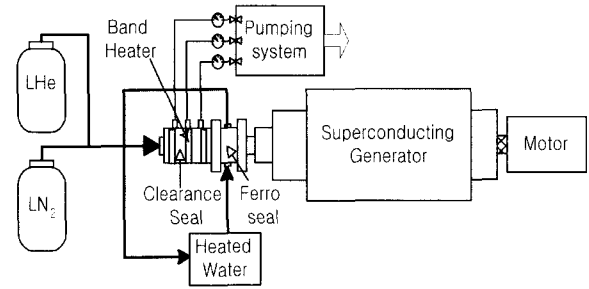


그림 5. 30[kVA] 초전도발전기의 냉각실험장치.  
Fig. 5. Test Set-up for 30[kVA] Superconducting Generator.

그림 6은 극저온 회전자의 냉각특성을 나타내었다. 온도센서는 두 계자코일의 직선부가 마주하는 직선부의 가운데에 설치되어 있다.

액체질소 주입 후 3시간 가량을 유지한 다음 회전자 내부의 온도를 200[K]까지 기다린다. 회전자 내부의 질소를 완전히 제거하기 위해 열교환기로 데운 기체헬륨을 이용하여 퍼징을 한다. 최종적으로 액체헬륨을 공급한다. 약 6시간이 지나면 액체헬륨이 용기에 저장되기 시작하고, 계자권선의 저항을 점차 줄여 마침내 0[Ω]이 된다. 액체헬륨의 액면의 감지는 보빈의 온도가 5[K]이 되면서부터 레벨센서가 감지하기 시작하였다. 액체헬륨이 10[cm]정도 저장되었을 때부터 전기적 특성 시험을 행하였다.

또 기체질소 및 기체헬륨이 배출되는 곳의 2군데 클리어런스 실(Clearance seal)의 하우징 외벽과 페로실(Ferrofluid seal)의 하우징 외벽의 온도를 K-타입 열전대를 이용하여 감지하였다. 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 배출되는 기체로 냉각되는 클리어런스 실의 하우징 외벽의 온도는 회전자 내부의 온도변화와 같은 경향을 보였으며, 페로실의 하우징에는 온수를 공급하여 사용온도영역인 0~ 80[°C]범위를 유지할 수 있었다.

그림 8에 회전자 내에 액체헬륨이 저장되기 시작할 때부터 액체헬륨 듀와에 남아 있는 액체헬륨의 양을 나타내었다. 회전자 내에 주입되는 액체헬륨의 양은 시간 당 약 60[l]로 큰 값을 보였는데, 이것은 용기 내에서 발생하는 기체헬륨의 강제적인 배기가 원인인 것으로 판단되며, 고진공단열 용기제작기술이 발달하고 최적 배기조건을 찾으면 소모량을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

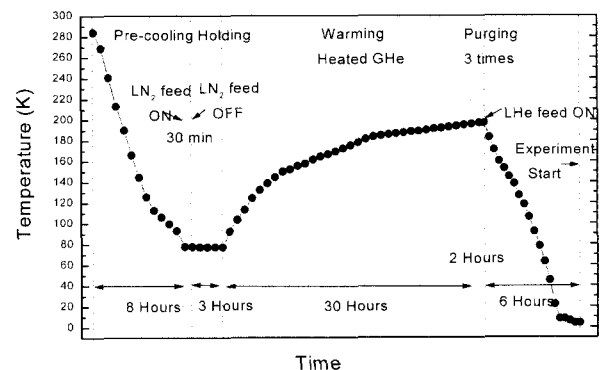


그림 6. 극저온 회전자의 냉각에 따른 온도변화.  
Fig. 6. Temperature Behavior of Cryogenic Rotor vs. Time.

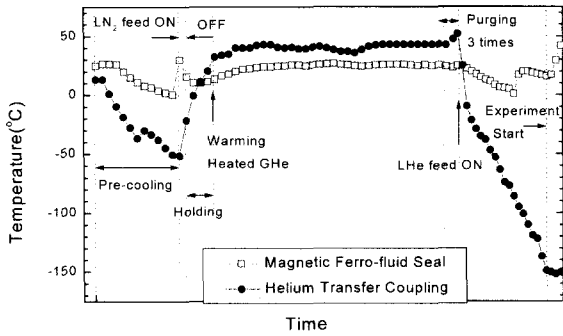


그림 7. 클리어런스 실 하우징과 페로실 하우징의 냉각에 따른 온도변화.  
Fig. 7. Temperature Behavior vs. Time of Clearance Seal Housing and Ferro-fluid Seal Housing

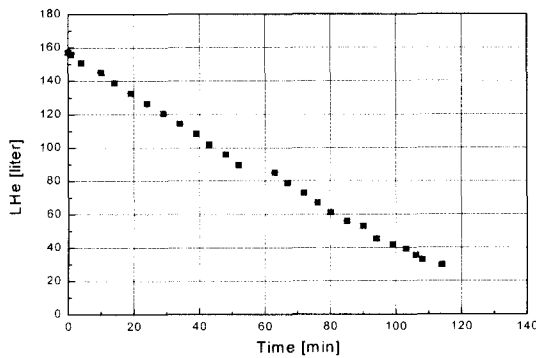


그림 8. 시간에 따른 액체헬륨 주입량  
Fig. 8. Transfer LHe Quantity vs. Time

### 4. 특성시험 결과

#### 4.1. 계자권선 퀘칭 시험

계자권선을 구성하는 각 코일에 대해 퀘칭시험을 하였고, 샤프트에 조립한 다음 계자권선 전체에 대해서도 퀘칭시험을 하였다. 그림 9에 계자코일 각각과 전체를 조립한 계자권선의 퀘칭시험결과를 나타내었는데, 그림에서 알 수 있듯이 코일 A, B, C는 명확한 트레이닝효과(training effect)를 나타내었다.

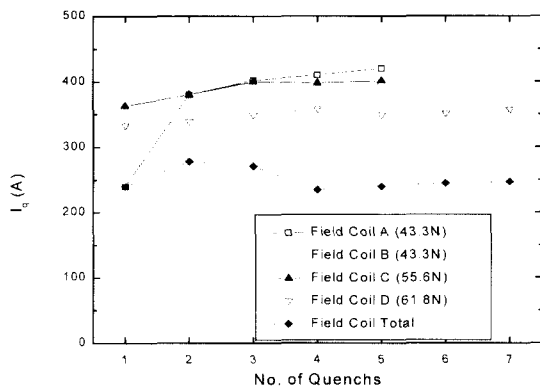


그림 9. 계자코일 및 계자권선의 퀘칭 전류변화.  
Fig. 9. Variation of Quench Currents of Field Coils and Field Winding.

이 트레이닝효과는 진공 함침을 하지 않은 초전도마그네트나 코일에서 항상 관찰할 수 있는 현상이다. 권선장력이 가장 센 D코일에서는 상대적으로 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 포화되는 전류값도 상대적으로 낮았다. 이것은 큰 권선장력에 의한 선재의 임계전류가 감소한 것으로 사료된다.

권선장력이 43.3[N]일 때, 퀘칭전류가 420[A]로 가장 높았다. 조립 후 계자권선의 퀘칭 전류는 각 코일의 경우보다 낮은 244[A]이었다. 이것은 각 코일을 연결한 조인터의 움직임으로 비롯된 것인데, 이것을 줄이기 위해 극저온 에폭시로 조인터를 고정하였으며, 회전자 내부에 액체헬륨을 채운 후 1800[rpm]의 회전속도에서 계자의 퀘칭전류를 측정하였다. 공급전류는 2[A/sec]로 공급하였는데, 277[A]에서 퀘칭이 일어났다. 이 값은 운전전류 200[A]보다도 높고, 정상상태의 퀘칭전류 244[A]보다도 높은 값이다.

#### 4.2. 회전자의 퀘칭 특성

계자코일을 4.2[K]로 냉각시킨 다음 회전자를 1800[rpm]으로 회전시킨 상태에서 인가전류를 2[A/sec]로 증가시키면서 퀘칭시험을 하였다. 퀘칭전류는 277[A]이었고, 이 값은 운전전류 200[A]보다 훨씬 큰 값이다.

#### 4.3. 개방회로 특성

그림 10은 SCG의 계자에 50[A]의 전류를 인가하여 측정한 회전자 회전속도에 따른 주파수와 전기자 선간전압의 실효치  $V_a$ 를 나타낸 것이다. 그림 10으로부터 전기자 단자전압  $V_a$ 와 주파수가 회전자 회전속도에 비례하여 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

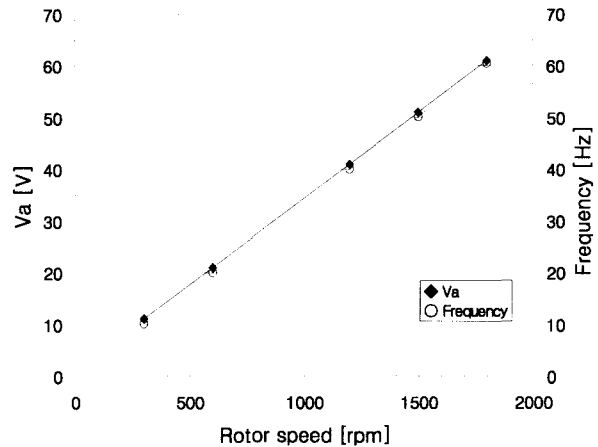


그림 10. 전기자 단자전압과 주파수 및 회전자의 회전속도  
Fig. 10. Terminal voltage and frequency vs. rotor speed

개방회로 특성곡선을 구하기 위해 정격속도에서 계자코일에 인가된 전류를 증가시키면서 전기자의 3상을 개방하여 단자전압을 측정하였으며, 그 결과를 그림 11에 나타내었다. 개방회로 특성곡선에서 무부하시 정격 전기자 단자전압을 얻기 위해 필요한 계자전류는 약 175[A]이었다. 그림 11로부터 제작한 SCG의 전기자가 FRP로 제작된 "공심형"이기 때문에 계자전류

를 정격 이상의 값으로 증가시키더라도 기기 내부의 자속이 포화되지 않기 때문에 전기자 단자전압  $V_a$ 가 계자전류  $I_f$ 에 대해 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

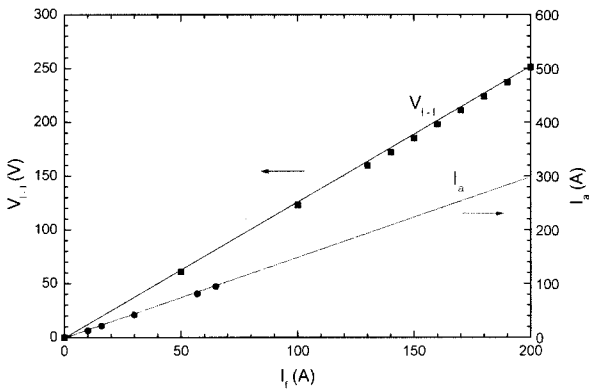


그림 11. 30[kVA]의 개방 및 단락회로 특성  
Fig. 11. OCC and SCC of 30(kVA) S.G.

#### 4.4. 단락회로 특성

전기자를 단락시킨 후 계자코일에 인가되는 전류를 변화시키면서 전기자 단자에 흐르는 전류를 측정하였다. 단락회로 특성을 그림 11에 개방회로 특성과 함께 나타내었다.

단락회로 특성곡선을 구하기 위해 계자에 임의의 전류  $I_f$ 를 인가하고 전기자 단자를 단락시킨 상태에서 전기자전류  $I_a$ 를 측정하였으며, 그 결과를 그림 11에 개방회로 특성과 함께 나타내었다. 그림 11의 단락회로 특성곡선으로부터 계자전류와 전기자전류가 선형적으로 비례함을 확인할 수 있었으며, 정격 전기자전류를 얻기 위해서 필요한 계자전류는 약 55[A]이었다.

그림 11의 개방회로 특성시험 및 단락회로 특성시험 결과로부터 구한 동기 리액턴스와 단락비는 각각 0.3143[pu]과 3.1818[pu]이었다. 단락비 크기는 기기의 일반적인 특성을 유추할 수 있는 유용한 자료로서 단락비가 크면 공극의 폭이 크며 전압변동율이 작은 특성을 갖고, 단락비가 작으면 부하 변동에 따른 여자전류의 변동폭이 큰 특성을 갖는 것으로 알려져 있다[9-11]. 제작된 SCG는 일반적인 발전기의 단락비에 비해 단락비가 매우 크며, 동기 리액턴스는 일반적인 발전기에 비해 매우 작은 것으로 나타났다. 이로 미루어 제작된 SCG는 전압변동율과 부하 변동에 따른 여자전류의 변동폭이 매우 작은 특성을 나타낼 것으로 판단되었다.

#### 4.5. 저항부하 시험

SCG의 계자에 175[A]의 전류를 인가하고 전기자 측에 3.6[kW], 2.4[kW], 1.2[kW]용량의 3상 전등부하를 연결하여 소용량 부하시험을 실시하였다. 그림 12에 전등부하시 전압 전압파형과 부하전류파형을 나타내었는데, 두 파형 모두 60[Hz]의 깨끗하고 왜형이 적은 파형이었다. 각 전압의 RMS 값은 221.23, 220.13, 221.49[V]이었고, 부하전류는 9.442[A]이었다. 부하를 ON, OFF하는 실험도 행하였는데, 별 다른 이상을 감지하지 못하였다.

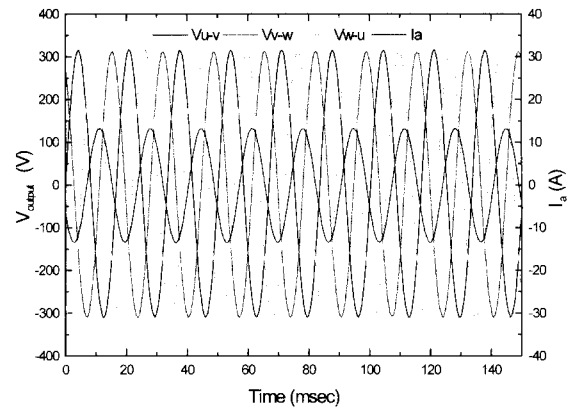


그림 12. 부하실험에서 단자전압의 파형  
Fig. 12. Line-to-line voltage and current waveforms in lamp load test

### 5. 결 론

냉각실험에서 회전자 내부에 버퍼 탱크를 설치하여 기화하는 헬륨가스와 주입되는 액체헬륨을 분리하고, 배출되는 3가지 경로의 압력을 조절함으로써 회전자 내부에 액체헬륨을 성공적으로 저장할 수 있었다. 이것은 회전자 용기 내에서 기화하는 헬륨기체와 주입되는 액체헬륨이 공간적으로 분리된 회전자 구조가 효과적임을 입증하는 것이다. 그러나, 회전용기에 주입되는 액체헬륨의 양이 시간당 약 60[l]로 많았으며, 효율적인 냉각을 위해서는 많은 실험과 고진공 단열기술이 필수적으로 요구된다고 사료된다. 냉각시에는 액체 질소를 사용하여 전냉각(precooling)을 행하였으며, 회전자를 4.2[K]까지 완전히 냉각시키는데 약 40시간이 걸렸다.

제작한 SCG는 초전도성을 유지하면서 정격회전수 1800[rpm]까지 회전을 시켰으며, 이때 계자의 퀀치 전류를 측정된 결과 277[A]이었다. 이 값은 당초 설계한 운전전류 200[A]보다 큰 값으로 SCG의 안정성을 신뢰할 수 있는 수준이고, SCG는 초전도성을 유지하면서 회전수 1800[rpm]에서 안정하게 동작하였다. 개방회로 및 돌발단락시험을 행하고 결과로부터 구한 동기리액턴스  $X_s$ 는 0.3108[p.u.]이었다. 또한 정격 부하에는 못 미치지만 전등부하 3.6[kW]를 연결한 실험도 하였다. 계자전류를 정격 이상의 값으로 증가시켰을 때 전기자 단자전압  $V_a$ 가 계자전류  $I_f$ 에 대해 선형적으로 증가하는 것으로부터 SCG의 철심을 사용하지 않는 "공심형" 전기자의 특징을 확인할 수 있었다. 또한, 전등부하 시험에서 얻은 왜형이 적은 출력 파형으로부터 SCG를 상용화할 경우 양질의 전력을 생산할 수 있음을 확인할 수 있었다.

결론적으로 본 연구에서 제작한 30[kVA] SCG는 출력에 비해 부피가 크다는 점에서 최적은 아니지만, SCG의 특징을 확인할 수는 있었다. 냉각효율은 선진국의 수준에는 못 미치지만 액체헬륨을 회전하는 용기에 저장하는 기본적인 기술은 확보하였다. 본 SCG 기술을 상용화하기 위해서는 냉각 및 설계분야에서 성능향상을 위한 연구가 필요하며, 본 연구에서 확보한 기술은 향후 초전도모터나 기타 다른 초전도전력기기 개발에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

**감사의 글**

본 연구는 과학기술부 스타프로젝트 사업의 지원으로 수행되었습니다.

[11] John H. Kuhlmann, Design of Electrical Apparatus, John Wiley & Sons, Inc, 3rd Edition, 1959

**참고 문헌**

- [1] D. Lambrecht, Superconducting Turbogenerators: Status And Trends , Cryogenics, Vol. 25, 1985, pp.619-627
- [2] S. H. Minnich, T. A. Keim, M.V.K. Chari, B. B. Gamble, M. J. Jefferies, D. W. Jones, E. F. Laskaris, and P. A. Rios, Design Studies Of Superconducting Generators , IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 15, 1979, pp.703-711
- [3] J. A. Fealey, W. D. Jones, T. A. Keim, and T. E. Laskaris, Comprehensive Test And Evaluation Of A 20 MVA Superconducting Generator , presented at 1984 IEEE PES Winter Meeting, January 1984.
- [4] J. L. Smith and A. G. Liepert, Construction Of MIT-DOE 10 MVA Superconducting Generator , IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-21, No. 2, March 1985, pp. 791-794
- [5] W. Ge, S. Tang, L. Yan, C. Yi, and J. Qin, Development And Test Of A 300 Kw Superconducting Homopolar Generator , *ibid*, Vol. MAG-32, No. 4, July 1996, pp. 2280-2283
- [6] A. Katagiri, S. Ohshima, B. Ikeda, K. Kimura, T. Ichikawa, K. Tanimoto, M. kazumori, T. Sonobe, K. Suzuki, and T. Kitajima, Development Of 70MW Superconducting Generators , *ibid*, Vol. MAG-32, No. 4, July 1996, pp. 2361-2364
- [7] T. Suryanarayana, J. L. Bhattacharya, K. S. N. Raju, and K. A. Durga Prasad, Development And Performance Testing Of A 200 Kva Dampless Superconducting Generator , IEEE transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 4, December 1997, pp. 330-336
- [8] 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, 1996, pp.949-952
- [9] Edward Wilson Kimbark, POWER SYSTEM STABILITY Volume III Synchronous Machines, IEEE PRESS, 1995
- [10] Van E. Mablekos, Electric Machine Theory for Power Engineers, New-York Harper & Row, pp.576 ~ 580, 1980

**저 자 소 개**



**손명환 (孫明煥)**

1963년 4월 21일생. 1986년 부산대 자연대 물리학과 졸업. 1988년 동 대학원 물리학과 졸업(이학석사). 1998년 동 대학원 물리학과 졸업(이학박사). 1988년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



**권영길 (權永吉)**

1959년 7월 28일생. 1982년 부산대 기계공학과 졸업. 1984년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1990년 동 대학원 기계공학과(공학박사). 1990년~1991년 한국기계연구원 선임연구원 1992년~현재 한국전기연구원 전략기술연구단 초전도응용연구그룹장



**백승규 (白承珪)**

1972년 11월 19일생. 1995년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 연구원



**이연용 (李彦容)**

1960년 5월 13일생. 1984년 창원기능대학 전기공학과 졸업. 1988년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임기사.



**조영식 ((洪吉童)**

1970년 8월 20일생. 1997년 창원대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(공학석사). 1997~현재 한국전기연구원 위촉연구원. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**박도영 (朴都永)**

1962년 3월 19일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1997년 Queen's University 졸업(공학박사). 1987년~현재 한국전기연구원 Mechatronics연구그룹 선임연구원.



**류강식(柳康植)**

1956년 8월 20일생. 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~현재 한국전기연구원 책임연구원. 차세대초전도응용연구개발사업단장



**Itsuya Muta(牟田一彌)**

1941년 1월 15일생. 1964년 쿠슈대학 전기공학과 졸업. 1966년 동 대학 전기공학과 졸업(공학석사). 1970년 동 대학 전기공학과 졸업(공학박사). 1970년 사가대학 교수. 1995년~현재 교토대학 대학원 공학연구과 교수.



**Tsutomu Hoshino(星野 勉)**

1954년 5월 21일생. 1977년 시바대학 전기공학과 졸업. 1979년 동경공업대 대학원 이공학연구과 석사과정 졸업(공학석사). 1988년 동 대학원 박사과정 졸업(공학박사). 동 년 통산산업성 공업기술원 전자기술종합연구소 연구원. 1988년 사가대학 이공학부 조교수. 1997년~현재 교토대학 대학원 공학연구과 조교수.