

30kVA 초전도발전기 개발(II) : 설계 및 성능평가

백승규, 손명환, 권영길, 고락길, 이연용, 류강식, \*박도영, \*김용주, \*\*안준보, \*\*김국헌  
 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, \*발전기진단연구팀, \*\*발전제어사업팀

30kVA Superconducting Generator Development : Design and Performance Test

S.K.Baik, M.H.Sohn, Y.K.Kwon, R.K.Ko, E.Y.Lee, K.S.Ryu, D.Y.Park, Y.J.Kim, J.B.Ahn, K.H.Kim  
 Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - A 30kVA superconducting generator (S.G.) has been designed, developed and successfully tested in KERI before the end of last year. The design is based on 2-dimensional electromagnetic field analysis of cylindrical coordinate. The field winding of rotor has been wound with superconducting wire of Nb-Ti alloy and tested after assembled with other rotor components. The stator has air-gap type armature windings which allow higher terminal voltage and more sinusoidal voltage waveform than conventional iron cored machines. Steady-state open & short-circuit test and lamp load test have been conducted also. The results of tests are given in this paper and compared with design quantities. Moreover the cooling scheme and characteristics of test system is included.

프로그램을 이용하여 30kVA 초전도발전기를 설계하였다. [4] 개발하고자 하는 30kVA 초전도발전기의 경우는 계자코일의 형태가 1MVA 모델기에서 사용되는 새들(saddle)형과는 달리 4개의 레이스트랙(race-track) 보빈을 사용하기로 하였다. 따라서 설계 프로그램의 해석 모델은 새들형의 계자코일 형상을 띄지만, 레이스트랙형으로 코일을 설계·배치하므로 이로 인한 오차가 최소화 되도록 코일을 설계·배치시켜야 한다. 표 1에 제작하고자 하는 30kVA 초전도발전기의 사양을 정리한다.

Table 1. Specifications of 30kVA S.G.

출 력	30[kVA]
전 압	220[V]
극 수	4극
주 파 수	60[Hz]
역 룰	0.9[lagging]

1. 서 론

초전도발전기의 연구개발에 대한 전세계적인 관심이 지난 20여 년 동안 계속되었다. [1,2] 기존의 발전기를 대신하여 초전도발전기를 사용할 경우 저항손실을 최소화함으로써 (a) 전력계통의 안정성 향상, (b) 효율 면에서 약 1%의 향상, 그리고 (c) 크기와 무게 면에서 약 40%의 감소를 이룰 수 있다. [3] 이러한 초전도기술은 산업문명의 고도화에 따른 전기에너지의 폭발적인 증가로 인해 향후 당면할 국가적인 에너지문제를 해결할 수 있는 열쇠가 될 것으로 기대된다.

선진국들만의 분야로 알려졌던 초전도응용 기기 분야에서의 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 2차원적 자장해석에 근본을 둔 프로그램으로 30kVA 초전도발전기를 설계한 과정과 그 결과를 바탕으로 제작한 계자코일과 전기자코일의 구조설계 및 제작에 관하여 설명하고 개발한 30kVA 초전도발전기의 현재까지의 성능평가 결과에 관하여 설명하고자 한다.

2. 발전기의 2차원 설계

2.1 발전기의 설계 프로그램

2차원 전자장해석의 라플라스 방정식을 사용한 설계

표 1과 같은 발전기의 사양을 설계 프로그램에 입력한다. d축 동기리액턴스  $x_d$ 는 발전기의 정상상태 안정도와 직접적인 관련이 있고, 이 값이 작을수록 안정도 측면에서 더 나은 결과를 가져오며 발전기의 체적 및 중량의 측면에서도 그림 1과 2에서와 같은 이점이 있다. 그림에서와 같이 설계하고자 하는 발전기에 대한  $x_d$ 의 변화추이를 본 결과 그 값이 0.2(pu)일 때부터 설계 값들을 얻을 수 있었다. 기계설계의 내반경에 해당하는 rsi 값은 프로그램 서두에 그 값을 입력하도록 되어 있다. 이 값은 발전기의 단면적을 결정하는 치수이기 때문에 중요한 의미를 지니게 된다. 본 설계 과정에서는 이 값을 계자코일과 덤퍼 및 냉각을 위한 통로와 절연의 여유를 고려하여 0.25(m)으로 하였다.

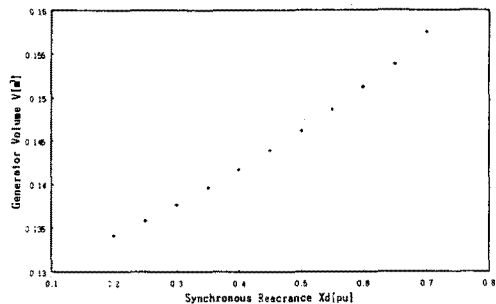


Fig 1. Generator volume variation according to Synchronous reactance

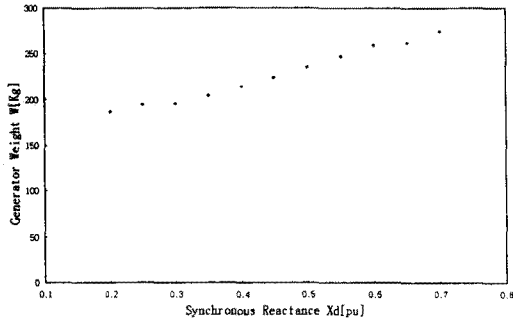


Fig 2. Generator weight variation according to Synchronous reactance

### 2.2 프로그램 결과

초전도발전기의 설계 프로그램에 따른 횡단면 설계 결과를 그림 3에 나타내었다.

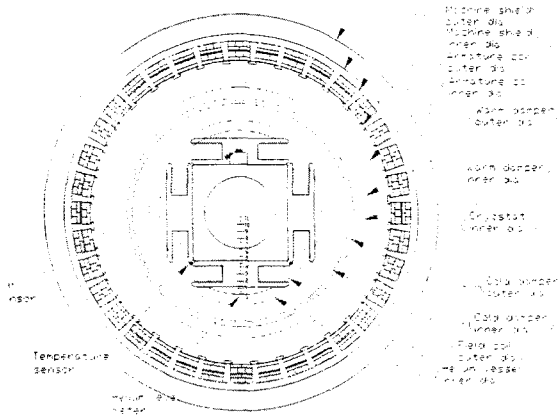


Fig. 3. Cross-sectional Dimension of 30kVA S.G.

가운데로부터 4개의 레이스트랙형 계자코일이 부착된 샤프트, 저온댐퍼, 상온댐퍼 그리고 전기자코일 및 자기철드가 배치되어 있다. 그림에서와 같이 60°의 권선각 안에 있는 서로 이웃한 초전도 계자코일들은 실제 제작할 때에 전류방향이 같도록 결선이 된다.

설계 프로그램의 결과로 구한 댐퍼의 두께는 31mm이었다. 댐퍼는 2개를 설치하였는데, 상온댐퍼의 두께는 15mm로 하였고, 저온댐퍼의 두께는 8mm로 하였다. 댐퍼의 기능은 사용한 재료의 전기전도도와 두께에 관련이 되고 전기전도도는 온도가 낮을수록 큰 값을 나타내기 때문에 저온댐퍼의 두께를 더 얇게 하는 것이 가능하였다.

### 3. 특성평가 실험 및 결과

#### 3.1 발전기의 설치

제작한 30kVA 초전도발전기를 12개의 방진판을 가진 SUS 베드 위에 설치하였다. 냉각을 하는 동안의 저속회전을 위해 감속모터와 37kW 1800rpm의 구동모터가 연결되어 있다. 계자코일은 초전도마그네트용 전원

장치로부터 직류전류를 공급받아 여자된다. 사용한 전원의 용량은 10V, 500A이고, 여자속도범위는 0.01A/sec-10A/sec이다. 권선이 발생할 때 자장으로 저장된 에너지를 신속히 방전시키기 위해 슬러림에 0.3Ω의 보호저항을 연결하였다.

#### 3.2 냉각특성

그림 4에 실험장치의 배치를 개략적으로 나타내었다. 회전자의 냉각은 액체질소를 이용한 예냉을 거친 다음 액체헬륨을 사용하여 최종적으로 냉각하였다.

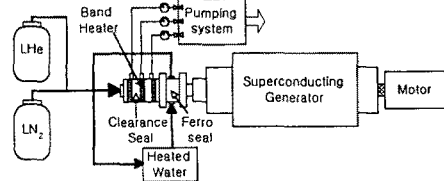


Fig. 4. 30kVA S. G. Test Set-up

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

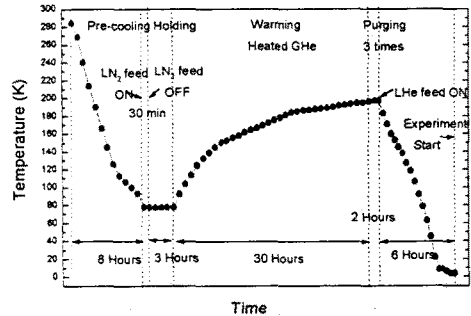


Fig. 5. Temperature Behavior vs. Time of Superconducting Rotor

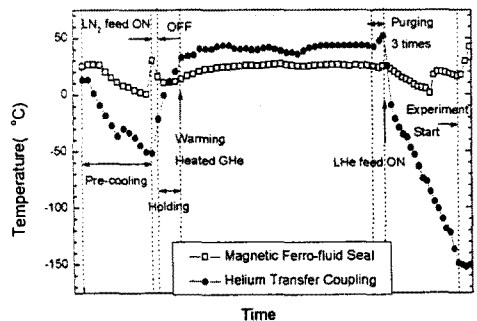


Fig. 6. Temperature Behavior vs. Time of Clearance Seal Housing and Ferrofluid Seal Housing

또 기체질소 및 기체헬륨이 배출되는 곳의 2군데 페로실링의 하우징 외벽과 HTC의 외벽의 온도변화를 K-타입 열전대를 이용하여 감지하였다. 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 배출되는 기체로 냉각되는 clearance seal의 하우징 외벽의 온도는 회전자 내부의 온도변화와 같은 경향을 보였고, 페로실링의 하우징 외벽 온도변화는 사용온도영역인 0~80℃를 유지하였다.

계자코일을 4.2K로 냉각시킨 다음 회전자를 1800rpm으로 회전시킨 상태에서 인가전류를 2A/sec로 증가시키면서 켄치시험을 하였다. 켄치전류는 277A 이었고, 이 값은 설계시 운전전류 200A보다 훨씬 큰 값이다.

### 3.3 전기적특성

#### 3.2.1 켄치 특성

계자코일을 4.2K로 냉각시킨 다음 회전자를 1800rpm으로 회전시킨 상태에서 인가전류를 2A/sec로 증가시키면서 켄치시험을 하였다. 켄치전류는 277A 이었고, 이 값은 운전전류 200A보다 훨씬 큰 값이다.

#### 3.2.2 개방회로 특성

정격속도에서 계자코일에 인가된 전류를 증가시키면서 전기자의 3상을 개방하여 단자전압을 측정하였다. 그림 7에 개방회로특성을 나타내었다. 그림 8은 상전압파형을 나타내고 있다. 이때 계자코일에 인가한 직류전류는 180A이었다.

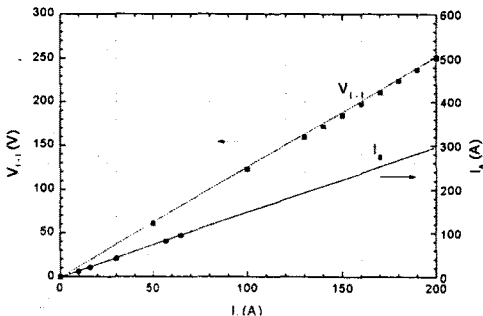


Fig. 7. Open Circuit Characteristic and Short Circuit Characteristic of 30kVA S.G.

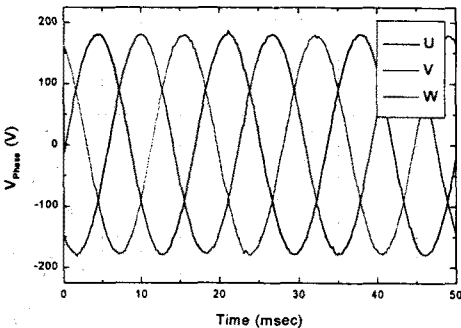


Fig. 8. Three Phase Voltage Waveforms in Open Circuit Test

#### 3.2.3 단락회로 특성

전기자를 단락시킨 후 계자코일에 인가되는 전류를 변

화시키면서 전기자 단자에 흐르는 전류를 측정하였다. 단락회로 특성을 그림 9에 개방회로 특성과 함께 나타내었다.

#### 3.2.4 Lamp 부하 시험

500W 전등 12개를 사용하여 부하시험을 실시하였다. 그림 9에 전등부하시 전간 전압파형과 부하전류파형을 나타내었다. 각 전압의 RMS 값은 221.23, 220.13, 221.49V이었고, 부하전류는 9.442A이었다. 부하를 ON, OFF하는 실험도 하였으며, 이상을 감지하지 못하였다.

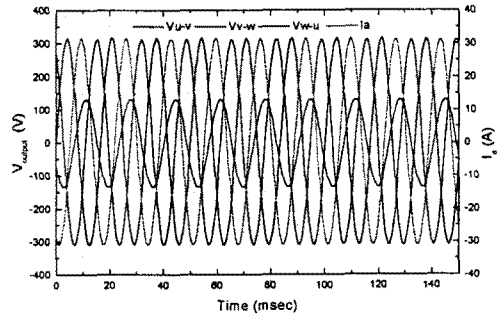


Fig. 9. Line-to-Line Voltage and Current Waveforms in Lamp Load Test

## 4. 결론

30kVA 초전도발전기를 설계 제작하고 성능평가를 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 액체헬륨을 주입하여 계자코일을 초전도화하는 데 성공하였으며, 정격속도에서의 켄치시험을 통하여 켄치전류가 본 발전기의 운전전류 200A보다 높은 값(277A)임을 확인하였다.

2. 측정된 전기적인 특성이 설계치에 가까움을 알았고, 개방회로특성과 단락회로특성으로부터 구한 동기 리액턴스 Xs는 0.306pu이고, 단락비는 3.273이었다.

본 연구는 현재 계속 진행 중이며, 30kVA 초전도발전기의 설계, 제작 및 성능평가 기술들은 향후 개발하고자 하는 1MVA급 초전도발전기 개발에 가치 있는 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

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

#### (참 고 문 헌)

- [1] Lambrecht, D., "Superconducting turbogenerators: 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] 백승규, 손명환, 고락길, 이연용, 배준한, 권영길, 류강식, "30kVA 초전도발전기용 계자코일 설계", '98 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A권, 232-234, 1997.