

30kVA 초전도발전기의 설계 및 성능평가

손명환, 백승규, 권영길, 장국렬, 이언용, 류강식, *박도영, *김용주, **안종보, **김국헌
 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, *발전기진단연구팀, **발전제어연구사업팀

Design and Performance Testing of a 30kVA Superconducting Generator

M.H.Sohn, S.K.Baik, Y.K.Kwon, K.L.Jang, E.Y.Lee, K.S.Ryu, D.Y.Park, Y.J.Kim, J.B.Ahn,
 K.H.Kim

Korea Electrotechnology Research Institute

skbaik@keri.re.kr

Abstract - A 30kVA superconducting generator has been designed, developed and successfully tested recently. The design is based on 2-dimensional electro-magnetic field analysis. The rotor has been wound with superconducting wire of Nb-Ti alloy. The stator has the air-gap type armature windings. Open-circuit test, short-circuit test and lamp load test have been conducted. The details of design program, design, machine-building, test results and conclusions are given in this paper.

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) 효율면에서 약 1%의 향상, 그리고 (c) 크기와 무게면에서 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 알려진 초전도응용 기기 분야에서의 고급기반기술을 확보하고자 국내에서도 초전도발전기를 포함하는 차세대 고효율 발전 플랜트 기술개발 과제를 1996년부터 과학기술부의 지원으로 한국전기연구소가 수행하고 있다. 1 단계의 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 및 제작

2.1 발전기의 설계 프로그램

2차원 전자장해석의 라플라스 방정식을 사용한 설계 프로그램[4]을 이용하여 30kVA 초전도발전기를 설계하였다. 개발하고자 하는 30kVA 초전도발전기의 경우는 계자코일의 형태가 1MVA 모델기에서 사용되는 새들(saddle)형과는 달리 4개의 레이스트랙(race-track) 보빈을 사용하기로 하였다. 따라서 설계 프로그램의 해석모델은 새들형의 계자코일 형상을 띄지만, 레이스트랙형으로 코일을 설계·배치하므로 이로 인한 오차가 최소화되도록 코일을 설계·배치시켜야 한다.

2.1.1 발전기의 사양과 프로그램

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 률	0.9(lagging)

표 1과 같은 발전기의 사양을 설계 프로그램에 입력한다. 설계 프로그램에 사용되는 대표적인 변수들과 플로우차트를 표 2와 그림 1에 나타낸다.

d축 동기리액턴스 x_d 는 발전기의 정상상태 안정도와 직접적인 관련이 있고, 이 값이 작을수록 안정도 측면에서 더 나은 결과를 가져온다. 본 프로그램에서 설계하고자 하는 발전기에 대한 x_d 의 변화추이를 본 결과 그 값이 0.2(pu)일 때부터 설계 값들을 얻을 수 있었다. 기계철드의 내반경에 해당하는 r_{si} 값은 프로그램 서두에 그 값을 입력하도록 되어 있다. 이 값은 발전기의 단면적을 결정하는 치수이기 때문에 매우 중요한 의미를 지니게 된다. 본 설계 과정에서는 이 값을 계자코일 보빈의 모서리와의 여유를 고려하여 0.25(m)으로 하였다.

Table 2. Symbols Used in Design Program

사용기호	사용기호의 의미
rfi	계자코일의 내반경[m]
rfo	계자코일의 외반경[m]
rdi	댐퍼실드의 내반경[m]
rdo	댐퍼실드의 외반경[m]
rai	전기자코일의 내반경[m]
rao	전기자코일의 외반경[m]
rsi	기계실드의 내반경[m]
rso	기계실드의 외반경[m]
x	R_{av}/R_{ao}
y	R_{iv}/R_{io}
z	R_{to}/R_{ao}
bfimax	최대자속밀도값[T]
l	코일의 직선부길이(계자, 전기자)
xd	동기리액턴스(d축)[pu]
xd1	과도리액턴스(d축)[pu]
xd2	차과도리액턴스(d축)[pu]
tdo1	개로과도시정수(d축)
tdo2	개로차과도시정수(d축)
td	댐퍼실드의 시정수
td1	폐로과도 시정수(d축)
td2	폐로차과도 시정수(d축)
alpha	전기자와 회전자 사이의 간격[m]
slotw	전기자 슬롯의 폭[m]
tw	전기자 치의 내측 폭[m]
spi	전기자 슬롯피치의 내경[m]
ja	전기자코일의 전류밀도[A/mm ²]

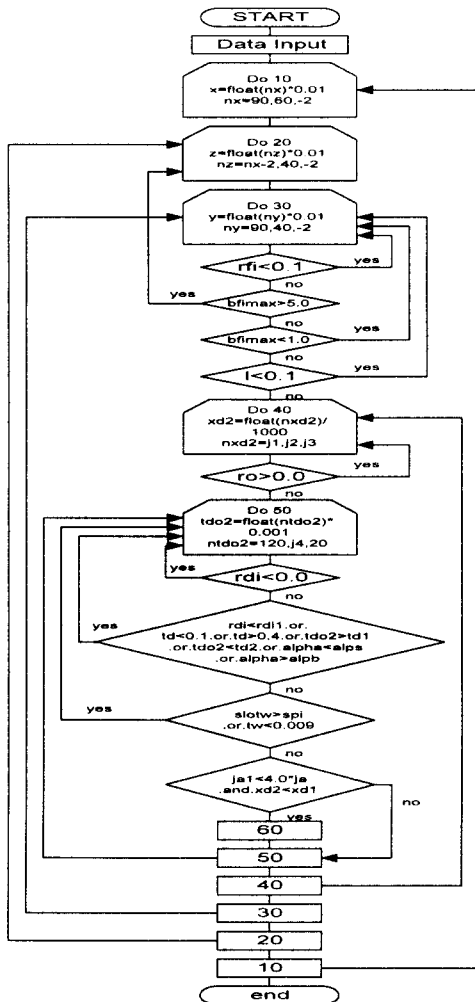


Fig. 1. Flow Chart of Design Program

2.1.2 프로그램 결과

앞 절의 초전도발전기 설계 프로그램에 따른 설계 결과를 그림 2에 나타내었다.

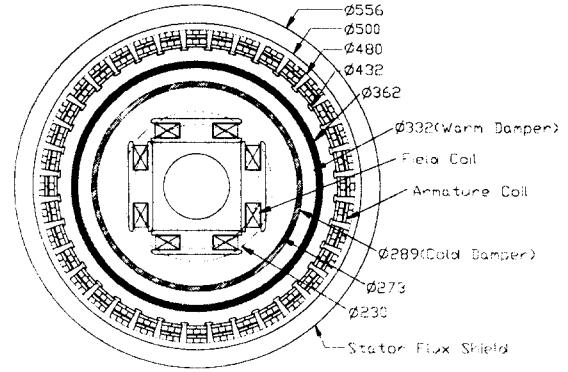


Fig. 2. Cross-sectional Dimension of 30kVA S.G.

가운데로부터 4개의 레이스트랙형 계자코일이 부착된 샤프트, 저온댐퍼, 상온댐퍼 그리고 전기자코일 및 자기실드가 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.

2.2 계자코일의 설계와 제작

제작하고자 하는 발전기는 4개의 회전자극을 가지므로 각 자극에 하나의 코일 보빈이 사용된다. 보빈의 재질은 비자성체를 사용하여야 하고 보통 FRP나 SUS강을 사용한다.

본 30kVA의 시제품에서는 회전자의 대부분이 SUS강으로 제작이 되고, 계자코일의 보빈 또한 이러한 SUS강 중에서 SUS316L을 이용하였다. 보빈의 치수를 결정할 때에 가장 고려되어야 할 부분은 보빈에 계자코일이 감긴 후 회전자 내에 조립이 되었을 경우, 그림 2에서와 같은 단면의 형태를 갖도록 해야 한다는 것이다. 이 조건이 만족되지 않으면 프로그램상의 해석결과와 다른 자장 분포를 나타내게 된다.

실제 권선에서는 중간 절연지 등이 들어가기 때문에 계자코일의 점적율(packing factor)이 달라질 수 있다. 예비 권선실험을 통하여 직경 1mm인 선재의 경우 점적율이 0.5447임을 확인하였다. 이 값을 프로그램에 초기값에 포함시켜 설계하였다.

계자코일의 선재는 직경 1mm의 NbTi 초전도 선을 사용하였다. 프로그램의 결과로 얻어지는 선재의 직경은 1.13mm정도이었으나 본 연

구실에서 보유하고 있는 선재들 중에서 가장 가까운 직경 1mm의 초전도선을 사용하였다. 이것 때문에 발생하는 계자코일 도체 단면적의 차이는 그 턴 수를 늘려서 보충하였다. 즉, 프로그램의 결과상으로 얻어지는 턴 수는 427턴이지만, 더 가는 선재를 사용하는 대신 턴 수를 늘려 532턴으로 제작하였다. 제작한 계자코일의 사양과 보빈의 단면을 표 3과 그림3에 나타내었다.

Table 3. 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

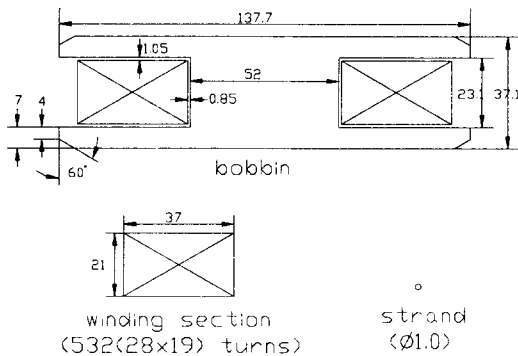


Fig. 3. Cross Section of a Field Coil Bobbin

2.3 전기자의 설계와 제작

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. 그림 2와 같은 전기자의 배치에 의해 설계된 슬롯의 형상을 그림 4에 나타내었다.

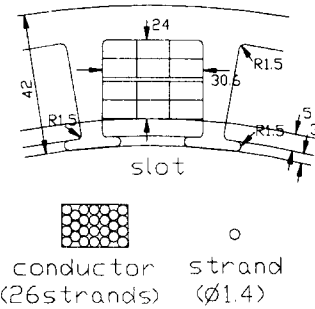


Fig. 4. Armature Slot and Armature Conductors

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. 그림 5에 고정자와 회전자 그리고 구동모터까지 조립이 끝난 30kVA 초전도발전기의 외관을 나타내었다.

3. 특성평가 실험 및 결과

3.1 발전기의 설치

그림 5에서처럼 제작한 30kVA 초전도발전기를 12개의 방진판을 가진 SUS 베드 위에 설치하였다. 냉각을 하는 동안의 저속회전을 위해 감속모터와 37kW 1800rpm의 구동모터가 연결되어 있다. 계자코일은 초전도마그네트용 전원장치로부터 직류전류를 공급받아 여자된다. 사용한 전원의 용량은 10V, 500A이고, 여자속도범위는 0.01A/sec-10A/sec이다. 퀵치가 발생할 때 자장으로 저장된 에너지를 신속히 방전시키기 위해 슬립링에 0.3Ω의 보호저항을 연결하였다.

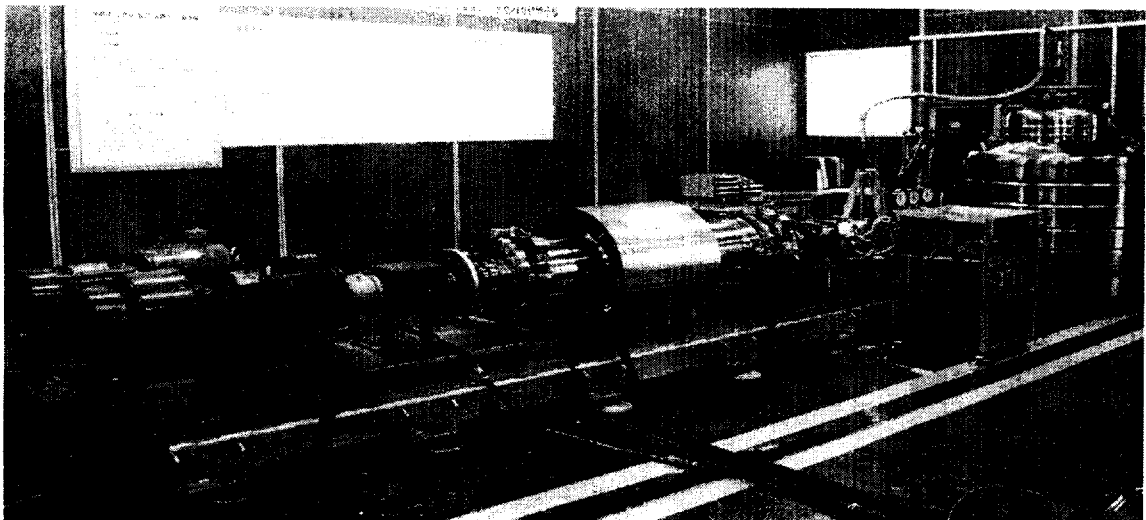


Fig. 5. 30kVA Superconducting Generator

3.2 성능평가

3.2.1 켄치 특성

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

3.2.2 개방회로 특성

정격속도에서 계자코일에 인가된 전류를 증가시키면서 전기자의 3상을 개방하여 단자전압을 측정하였다. 그림 6에 개방회로특성을 나타내었다. 그림 7은 상전압파형을 나타내고 있다. 이때 계자코일에 인가한 직류전류는 180A이었다.

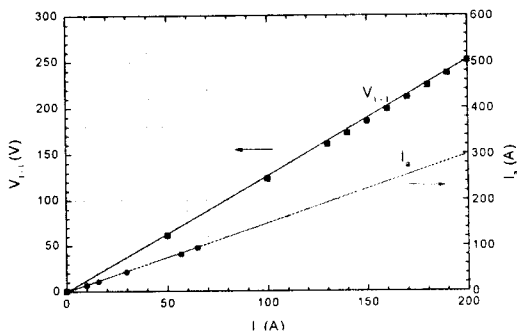


Fig. 6. Open Circuit Characteristic and Short Circuit Characteristic of 30kVA S.G.

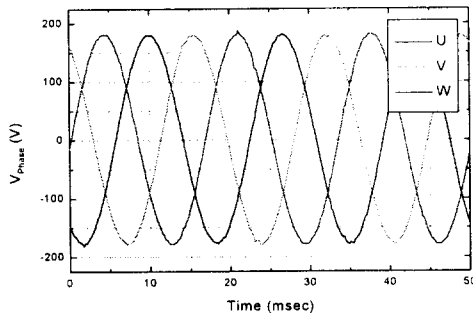


Fig. 7. Three Phase Voltage Waveforms in Open Circuit Test

3.2.3 단락회로 특성

전기자를 단락시킨 후 계자코일에 인가되는 전류를 변화시키면서 전기자 단자에 흐르는 전류를 측정하였다. 단락회로 특성을 그림 6에 개방회로 특성과 함께 나타내었다.

3.2.4 저항부하 시험

500W 전등 12개를 사용하여 부하시험을 실시하였다. 그림 8에 전등부하시 순간 전압파형과 부하전류파형을 나타내었다. 각 전압의 RMS 값은 221.23, 220.13, 221.49V이었고, 부하전류는 9.442A이었다. 부하를 ON, OFF하는 실험도 하였으며, 이상을 감지하지 못하였다.

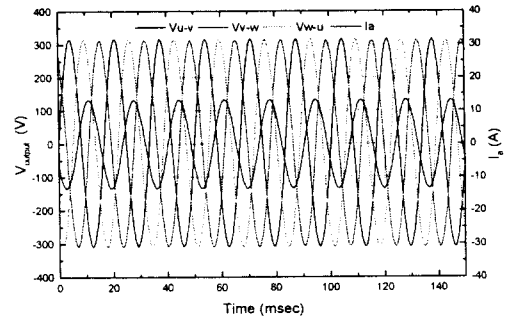


Fig. 8. Line-to-Line Voltage and Current Waveforms in Lamp Load Test

4. 결 론

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

1. 액체헬륨을 주입하여 계자코일을 초전도화 하는데 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 X_s 는 0.6095pu이고, 단락비는 1.6408이었다.

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 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] 백승규, 손명환, 고락길, 이연용, 배준환, 권영길, 류강식, "30kVA 초전도발전기용 계자코일 설계", '98 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A 권, 232-234, 1997.