

개방회로, 단락회로 특성시험 및 부하시험을 이용한 30 kVA 초전도 발전기의 특성해석

論 文

49B-2-2

A Study on 30 kVA Super-Conducting Generator Performance using Open Circuit, Short Circuit Characteristics, and Load Tests

河敬德*·黄敦夏*·朴都永*·金容柱**·勸永吉***·柳康植§

(Kyoung-Duck Ha · Don-Ha Hwang · Doh-Young Park · Yong-Joo Kim · Young-Kil Kwon · Kang-Sik Ryu)

Abstract - 30 kVA rotating-field type Super-Conducting Generator is built and tested with intensive FE(Finite Element) analysis. The generator is driven by VVVF inverter-fed induction motor. The Open Circuit Characteristic(OCC) and Short Circuit Characteristic(SCC) are presented in this paper. Also, the test result under the light load(up to 3.6 kW) are given. From the design stage, 2-D FE analysis coupled with the external circuit has been performed. The external circuit includes the end winding resistance and reactance as well as two dampers. When compared with the test data, the FE analysis results show a very good agreement.

Key Words : 30 kVA Super-Conducting Generator(SCG), Open Circuit Characteristics(OCC), Short Circuit Characteristics(SCC), 2-D FE analysis, external circuit, end winding reactance

1. 서 론

경제성장에 따른 과학기술의 발달은 도시생활의 편리함을 추구하는 사람들의 대도시 집중현상을 심화시키고 있으며 대도시 주변에 대규모의 산업단지과 복합주거단지를 갖춘 위성도시의 개발을 가속화시키고 있다. 대도시 및 위성도시의 집산화, 대형화 추세는 일반가정의 각종 전자제품뿐만 아니라 생산현장에서 사용되는 각종 전력변환설비 또는 전기기기의 사용 증가로 인한 대용량 전력수요를 발생시키고 있다. 이러한 상황에서 양질의 전력을 각종 산업용, 가정용 부하에 안정적으로 공급하기 위한 기술개발노력이 절실히 필요하며, 외국에서는 수년 전부터 21세기 대용량 전력수요에 효과적으로 대처할 수 있는 대안으로 각광받고 있는 초전도 전력기기의 개발 및 응용에 대한 연구를 수행하고 있다. 광범위한 초전도 관련기술 중에서 특히 관련산업의 파급효과와 함께 실용화 가능성이 매우 높은 기술로서 초전도 케이블, 초전도 변압기, 초전도 발전기(Super-Conducting Generator: 이하 SCG), 자기유체역학발전, 초전도 에너지 저장장치 등에 대한 연구가 집중적으로 수행되고 있다.

종래의 발전기에서 일반 동선을 사용하던 계자 권선을 일반 동선보다 부피도 작고 절대온도에서 권선저항이 존재하지 않는 초전도 선재로 대체한 SCG는 계자에 많은 전류를 손실 없이 인가할 수 있으며 고자장의 형성이 가능하다. 따라서 SCG는 소형경량화 제작이 가능하며 대용량의 발전성을 기대할 수 있고 저 동기 리액턴스화에 의한 전력계통

의 안정도 향상이 가능하다.[1] 위와 같은 장점을 보유한 SCG에 대한 연구는 일부 기술보유국에서만 진행되고 있는 상황이며, 일본의 경우 200 MW급 SCG 개발을 최종목표로 현재 70 MW급 SCG를 개발하여 관서전력 구내에서 실증시험을 수행하고 있는 중이다.[2-3]

컴퓨터 기술의 발전속도가 오늘날과 같이 빠르지 않아 컴퓨터의 사용이 일반화되기 전에는 주로 전기기기의 개발시에 시행착오법을 이용하였기 때문에 완제품 제작까지 오랜 시간과 많은 경비가 소요되었다. 그러나 컴퓨터 기술의 개발과 보급속도의 향상은 시행착오법을 대신할 수 있는 유한요소법, 유한차분법, 경계요소법 등의 다양한 수치해석기법의 보급을 널리 확산시켰다. 다양한 수치해석기법의 보급확산은 전기기기의 전자계 특성 해석을 용이하게 수행할 수 있도록 하였을 뿐만 아니라 전기기기 개발시 소요되는 시간과 경비의 절감도 가능하게 하였다.

본 논문에서는 30 kVA SCG의 운전특성 분석을 단시간 내에 빠르고 정확하게 수행하기 위해 2차원 유한요소법과 해석영역에 포함되지 않은 부분을 회로소자로 표현한 외부회로를 결합하여 활용하였다. 또한 30 kVA SCG의 정확한 운전특성 파악을 위해 개방회로 시험, 단락회로 시험, 소용량 부하 운전시험 등을 수행하여 얻은 시험결과와 2차원 유한요소 해석결과를 비교, 분석하였다. 정격부하 인가시에 대한 운전특성과 3상 돌발단락시의 운전특성을 분석하기 위하여 외부회로와 유한요소 영역을 결합하여 유한요소 해석을 수행하였다. 본 논문에서 제시한 30 kVA SCG의 정격부하 운전특성 예측결과는 향후 실험결과와 비교해 볼 수 있는 유용한 자료가 될 것이다. 또한 본 논문에서 활용한 2차원 유한요소 해석기법은 각종 회전기의 개념설계 단계부터 설계통에 적용하여 운전하는 단계까지의 각종 운전특성을 예측하고자 할 경우뿐만 아니라 1 MVA급 SCG 개발시에도 용이하게 적용 가능한 기법으로 사료된다.

*正會員 : 韓國電氣研究所 Mechatronics研究그룹

**正會員 : 韓國電氣研究所 産業電氣研究團長

***正會員 : 韓國電氣研究所 超傳導應用研究그룹長

§正會員 : 韓國電氣研究所 戰略技術研究團長

接受日字 : 1999年 7月 6日

最終完了 : 2000年 1月 8日

2. 초전도 발전기의 구조 및 상세제원

2.1 초전도 발전기의 기본구조

그림 1에 나타낸 것처럼 회전계자형 SCG는 크게 계자, 전기자, 제동차폐부, 자기차폐부로 구성된다. 계자는 비자성체로 구성된 계자극과 액체 헬륨을 사용하여 계자 권선을 초전도 상태로 유지시키는 냉각구조를 가지고 있다. 제동차폐부는 3상돌발 단락과 같은 과도상태시 전기자전류의 급증으로 발생한 다량의 자속이 계자측에 침투함으로써 발생할 수 있는 초전도상태 파괴현상을 방지하는 역할을 하는 상온차폐부와 외부로부터 침투하는 복사열을 차단하는 역할을 하는 극저온 차폐부로 구성된다. 자기차폐부는 일반적으로 투자율이 높은 자성체로 제작하여 SCG의 가장 외측에 설치하며 주변 환경에 대한 자기적 차폐효과를 갖는다.

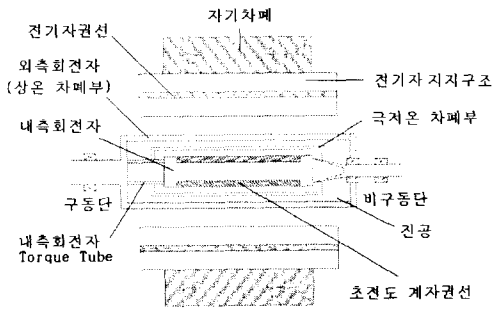


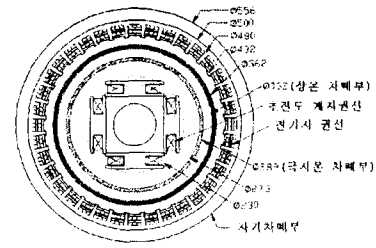
그림 1 회전계자형 초전도 발전기의 구조
Fig. 1 Structure of rotating-field type SCG

2.2 30 kVA 초전도 발전기의 상세제원

본 연구에서 제작·시험한 SCG는 정격용량 30kVA, 정격전압 220V, 주파수 60Hz, 역률 0.9, 정격회전속도 1800rpm이다. 계자는 SUS 316L로 제작하였으며, 계자 권선은 NbTi 계열의 초전도 선재를 사용하여 레이스트랙 형태로 계자극에 감아 사용하였다. 전기자는 FRP로 제작하였으며, 폭 10[mm]의 통풍구를 전기자의 방사방향에 설치하였다. 표 1과 그림 2는 30 kVA SCG의 상세제원과 단면 구조, 전기자 슬롯 및 계자 1극의 구조를 정리하여 나타낸 것이다.

표 1 30 kVA 초전도 발전기의 제원
Table 1 Specification of 30 kVA SCG

구분	제원	
자기차폐부	외반경 (Rmi)	278[mm]
	내반경 (Rmo)	250[mm]
전기자	외반경 (Rai)	250[mm]
	내반경 (Rao)	213[mm]
상온 차폐부	외반경 (Rdi)	181[mm]
	내반경 (Rdo)	166[mm]
극저온 차폐부	외반경 (Rti)	144.5[mm]
	내반경 (Rto)	136.5[mm]
고정자 슬롯 수 (Ns)	36	
자성체 재질	S23	
상당 Turn 수 (Nph)	60[Turn]	
고정자 길이 (ls)	192[mm]	



(a) 단면구조
(a) Cross-sectional dimension



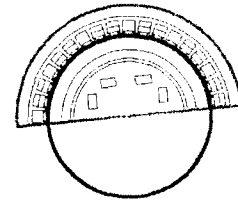
(b) 전기자 슬롯 (b) Armature slot
(c) 계자 1극 (c) Field pole

그림 2 30 kVA 초전도 발전기의 단면구조
Fig. 2 Cross-sectional dimension of 30 kVA SCG

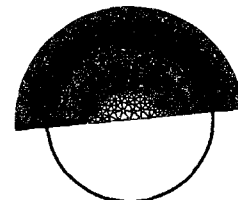
3. 30 kVA 초전도 발전기의 2차원 유한요소 해석

3.1 2차원 유한요소 해석 형상

그림 3은 30 kVA SCG의 2차원 입력형상과 유한요소 분할도로서 유한요소 해석을 위해 입력한 SCG의 형상은 극의 대칭성과 해석의 편이를 고려하여 2극만 모델링하였으며, 상용 2차원 전자기 해석 프로그램인 Flux2D를 이용하여 해석하였다. SCG 운전시의 회전자 위치 변화와 외부회로 소자에서 계산되는 전압 및 전류의 시간에 따른 변화는 회전공극(moving air gap) 기법을 활용하여 계산하였다.[4-6]



(a) 2차원 입력형상
(a) 2 Dimensional input geometry



(b) 유한요소 분할도
(b) Finite element mesh

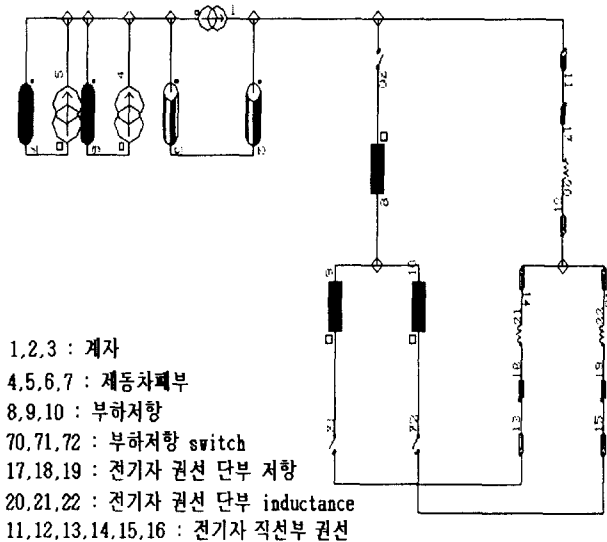
그림 3 30 kVA 초전도 발전기의 2차원 형상과 유한요소 분할도

Fig. 3 2 Dimensional geometry and finite element mesh of 30 kVA SCG

3.2 외부회로의 구성

30 kVA SCG의 제작결과 회전자 축 방향 길이 대 고정자 외경의 비가 약 1 : 2로서 회전자의 축 방향 길이가 고정자 외경에 비해 짧은 구조적 특징을 나타내었으며, 전기자 권선의 단부 길이는 권선을 전기자 슬롯에 삽입하는 과정에서 설계시에 예상하였던 길이보다 증가하였다. 따라서 권선 단부 길이의 증가와 함께 권선 단부 리액턴스의 누설량도 증가할 것으로 예상되었으며, 정확한 운전특성의 분석을 위해서는 권선 단부 누설 리액턴스에 대한 계산이 선행되어야 할 것으로 판단되었다. 그러나 전기기기의 권선 단부 누설 리액턴스의 정확한 측정은 거의 불가능하며 권선 단부 길이, 슬롯당 직렬도체수, 상당 극당 슬롯수, 권선 분포계수, 권선 pitch factor 등을 고려한 경험식을 이용하여 계산하고 있는 것으로 알려져 있다.[7] 본 논문에서도 30 kVA SCG의 설계자료, 구조적 특징, 전기자 권선 단부 길이, 개념설계 단계부터 수행하였던 유한요소 해석결과, 경험식 등을 종합적으로 고려하여 권선 단부의 누설 리액턴스를 계산하였다. 이렇게 계산된 값을 유한요소 해석영역과 결합한 외부회로에 입력하여 개방회로, 단락회로, 소용량 부하, 정격부하 운전시의 특성 계산에 활용하였다.

그림 4는 유한요소 해석영역과 결합하기 위해 회전자, 고정자, 부하를 각각의 회로소자로 표현하여 구성한 외부회로(external circuit)를 나타내고 있다.[8-9] 그림 4에서 회전자는 계자전류원과 계자 권선으로 구분되는 계자, 그리고 상은 차폐부와 극저온 차폐부로 구분되는 제동차폐부로 구성하였다. 고정자는 각 상의 전기자 직선부 권선과 전기자 권선 단부 저항 및 전기자 권선 단부 누설 인덕턴스로 구성하였으며 3상 Y형태로 결선하여 활용하였다. 부하는 부하저항과 부하의 개방과 단락을 조절하기 위한 부하 저항 연결용 스위치로 구성하였다. 외부회로의 부하를 구성할 때 정격부하의 경우 부하 저항에 부하 인덕턴스를 직렬 연결하여 활용하였으나 편의상 그림 4에는 부하 저항만 인가되어있는 외부회로를 도시하였다. 전기자 권선 단부 저항은 전기자 슬롯 외측에 노출된 권선의 단부 길이와 도전율을 고려하여 계산하고 외부회로에 입력하였다.



- 1, 2, 3 : 계자
- 4, 5, 6, 7 : 제동차폐부
- 8, 9, 10 : 부하저항
- 70, 71, 72 : 부하저항 switch
- 17, 18, 19 : 전기자 권선 단부 저항
- 20, 21, 22 : 전기자 권선 단부 inductance
- 11, 12, 13, 14, 15, 16 : 전기자 직선부 권선

그림 4 유한요소 해석영역과 결합된 외부회로
Fig. 4 External circuit coupled with finite element regions

4. 특성시험 결과 및 2차원 유한요소 해석결과의 비교

그림 5는 제작된 30 kVA SCG를 12개의 방진판이 부착된 SUS 강판위에 설치한 모습이다. 여자전원은 초전도 마그네트용 전원장치를 사용하였으며, 여자방식은 직류전원으로부터 전류를 공급받아 계자 권선에 인가하여 여자시키는 타여자방식을 채택하였다. 초전도 마그네트용 전원장치에 사용한 직류전원 용량은 10[V], 500[A]이며, 여자속도범위는 0.01[A/sec] ~ 10[A/sec]이다.

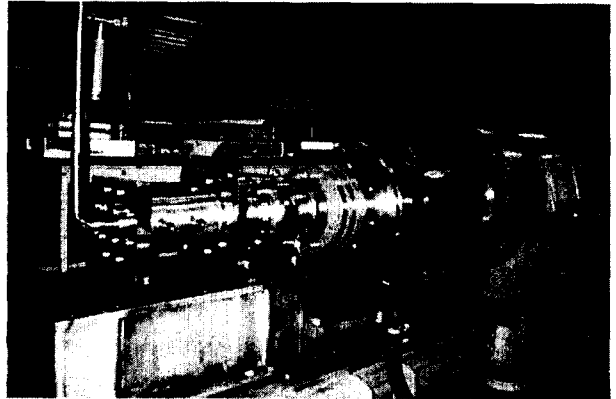


그림 5 30 kVA 초전도 발전기
Fig. 5 30 kVA Super-conducting generator

4.1 개방회로 특성시험 및 유한요소 해석

그림 6은 SCG의 계자에 50[A]의 전류를 인가하여 측정된 회전자 회전속도에 따른 주파수와 전기자 선간전압의 실험치 V_a 를 나타낸 것이다. 그림 6으로부터 전기자 단자전압 V_a 와 주파수가 회전자 회전속도에 비례하여 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

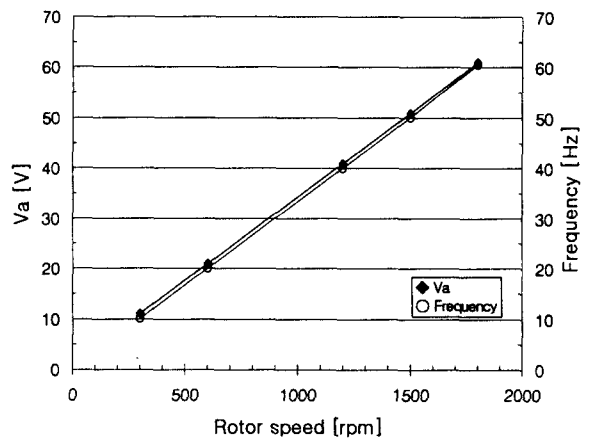


그림 6 전기자 단자전압과 주파수 및 회전자 회전속도
Fig. 6 Terminal voltage and frequency vs. rotor speed

계자전류 증가에 따른 개방회로 특성시험을 통해 측정된 전기자 단자전압과 2차원 유한요소 해석법을 이용하여 계산한 전기자 단자전압 V_a 를 비교하여 그림 7과 표 2에 나타내었다. 개방회로 특성시험 결과와 유한요소 해석결과가 근사하게 일치하고 있음을 그림 7과 표 2로부터 확인할 수 있었다. 또한 그림 7로부터 제작한 SCG의 전

기자가 FRP로 제작되어 계자전류를 정격 이상의 값으로 증가시키더라도 기기 내부의 자속이 포화되지 않아 전기자 단자전압 V_a 가 계자전류 I_f 에 대해 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 그림 7의 개방회로 특성곡선에서 무부하시 정격 전기자 단자전압을 얻기 위해 필요한 계자전류는 약 175[A]이었다.

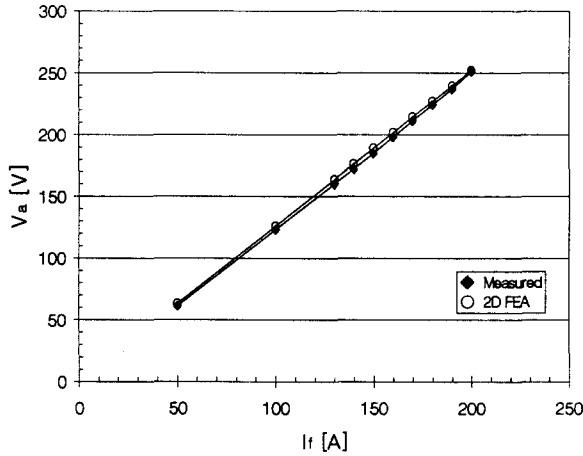


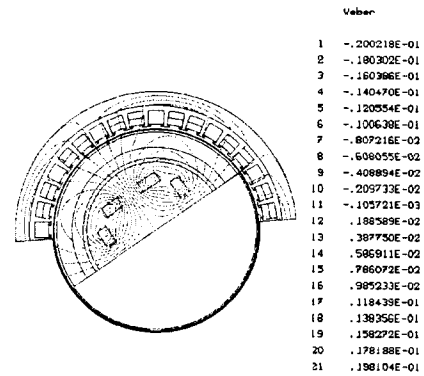
그림 7 특성시험 결과 및 유한요소 해석결과로부터 얻은 개방회로 특성 곡선

Fig. 7 Measured and 2D FEA results of OCC curve

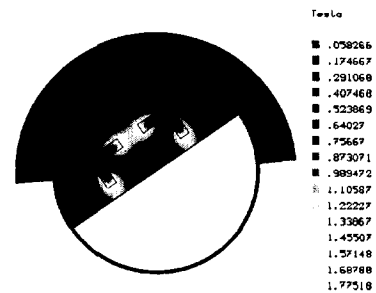
표 2 개방회로 특성시험 결과 및 유한요소 해석결과
Table 2 Measured and 2D FEA results of OCC

계자전류 (I_f [A])	전기자 단자전압 (V_a [V])	
	측정값	2D FEA 계산값
50	61	63.01
100	123	126.02
130	160	163.83
140	172	176.43
150	185	189.03
160	198	201.64
170	211	214.24
180	224	226.84
190	237	239.44
200	251	252.04

그림 8은 SCG의 회전자가 약 15회전(5,430° 회전)한 후의 등자속선과 자속밀도 분포로서 무부하 운전시 전기자 순시단자전압 $v(t)$ 를 계산하기 위해 수행한 유한요소 해석으로부터 얻은 결과이다. 그림 8의 무부하시 등자속선과 자속밀도 분포결과로부터 정상상태 확립여부를 판단할 수 있으며, 정상상태 도달 후에 나타난 최대 자속밀도는 계자 권선 사이의 자속선이 밀집한 부분에서 약 1.78[Tesla], 최소 자속밀도는 전기자 권선이 위치한 부분중 자속선 분포수가 적은 부분에서 약 0.06[Tesla]로 계산되었다.



(a) 등자속선(약 0.503[sec])
(a) Equi-flux line(0.503[sec])



(b) 자속밀도 분포(약 0.503[sec])
(b) Flux density(0.503[sec])

그림 8 무부하시 30 kVA 초전도 발전기의 등자속선도와 자속밀도

Fig. 8 No-Load equi-flux line and flux density of 30 kVA SCG

제작한 SCG의 계자에 175[A]의 전류를 인가하여 측정된 무부하 단자전압 V_a 는 약 220[V]로 나타났으며, 유한요소 해석으로부터 얻은 무부하 단자전압은 약 220.3[V]로 측정값과 매우 근사하게 계산되었다. 그림 9는 무부하시 3상 전기자 단자전압 $v(t)$ 파형을 측정된 결과와 유한요소 해석으로부터 얻은 3상 전기자 단자전압 파형을 비교하여 나타낸 것이다.

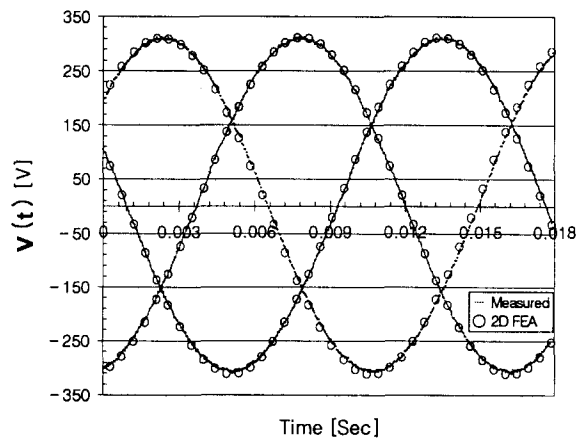


그림 9 무부하시 3상 전압 파형

Fig. 9 No-Load 3 phase voltage waveforms

4.2 단락회로 특성시험과 유한요소 해석

단락회로 특성시험은 계자에 임의의 전류를 인가하고 전기자 단자를 단락한 상태에서 전기자전류를 측정하며, 단락회로 특성 시험으로부터 측정된 전기자전류와 유한요소 해석을 수행하여 계산한 전기자전류의 실효치 I_a 를 비교하여 그림 10에 나타내었다. 그림 10의 단락회로 특성곡선으로부터 계자전류와 전기자전류가 선형적으로 비례함을 확인할 수 있었으며, 정격 전기자전류를 얻기 위해서 필요한 계자전류는 약 55.6[A]이었다.

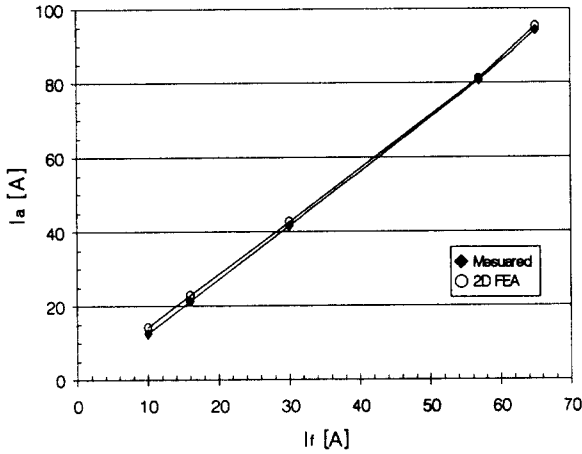


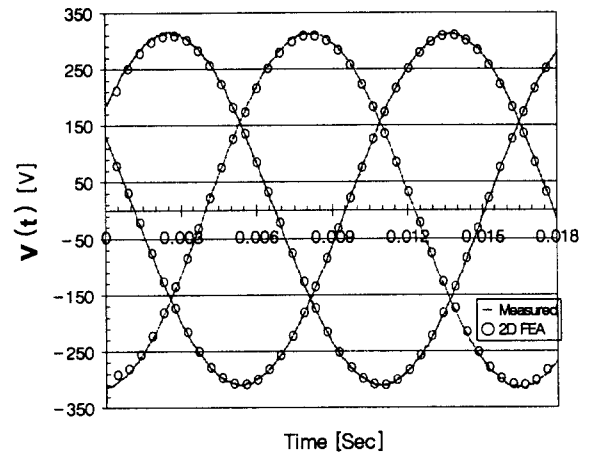
그림 10 특성시험 결과 및 유한요소 해석결과로부터 얻은 단락회로 특성 곡선
Fig. 10 Measured and 2D FEA results of SCC curve

그림 7과 그림 10의 개방회로 특성시험 및 단락회로 특성시험 결과로부터 구한 동기 리액턴스와 단락비는 각각 0.3108[pu]과 3.2176[pu]이었다. 단락비 크기는 기기의 일반적인 특성을 유추할 수 있는 유용한 자료로서 단락비가 크면 공극의 폭이 커져 전압변동율이 작은 특성을 갖고, 단락비가 작으면 부하 변동에 따른 여자전류의 변동폭이 큰 특성을 갖는 것으로 알려져 있다.[10-12] 제작된 SCG는 일반적인 발전기의 단락비에 비해 단락비가 매우 크며, 동기 리액턴스는 일반적인 발전기에 비해 매우 작은 것으로 나타났다. 이로 미루어 제작된 SCG는 전압 변동율과 부하 변동에 따른 여자전류의 변동폭이 매우 작은 특성을 나타낼 것으로 판단되었다.

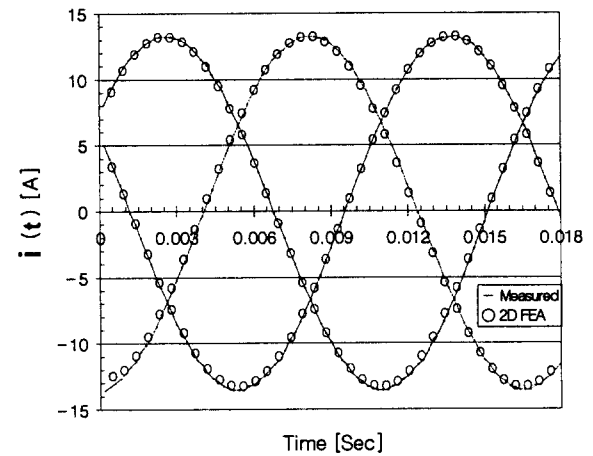
4.3 소용량 부하시험과 유한요소 해석

그림 11은 SCG의 계자에 175[A]의 전류를 인가하고 전기자 단자측에 3.6[kW]용량의 3상 전동부하를 인가하여 측정된 전기자 단자전압과 전기자전류를 동일한 조건으로 유한요소 해석을 수행하여 계산한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그림 11에 나타나 있듯이 부하시험을 통해 측정된 전압, 전류의 파형과 2차원 유한요소 해석을 수행하여 계산한 전압, 전류의 파형이 매우 근사하게 일치하였다.

표 3은 SCG의 계자에 175[A]의 전류를 인가하고 전기자측에 3.6[kW], 2.4[kW], 1.2[kW]용량의 3상 전동부하를 인가하여 측정된 전기자 단자전압, 전류와 동일한 조건으로 유한요소 해석을 수행하고 계산하여 얻은 전기자 단자전압, 전류를 비교한 것이다. 부하시험시에 측정된 전기자 단자전압과 전류가 유한요소 해석으로부터 계산한 값과 근사하게 일치하고 있음을 표 3을 통해 확인하였다.



(a) 측정 및 계산한 전압파형
(a) Measured and calculated voltage waveforms



(b) 측정 및 계산한 전류파형
(b) Measured and calculated current waveforms

그림 11 3.6[kW] 전동 부하시험시의 선간전압 및 전류파형

Fig. 11 Voltage and current waveforms(3.6[kW] Load)

표 3 부하시험 및 유한요소 해석결과(If : 175[A])
Table 3 Measured and 2D FEA results of load tests (If : 175[A])

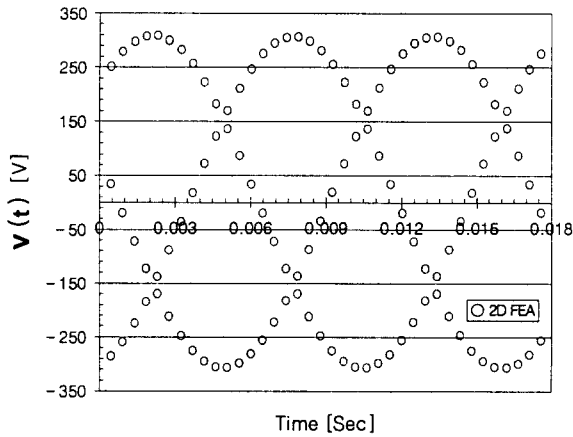
부하용량 (PLoad) [kW]	전기자 단자전압 (Va [V])		전기자전류 (Ia [A])	
	측정값	2D FEA 계산값	측정값	2D FEA 계산값
3.6	223.2	219.4	9.4	9.4
2.4	218	219.6	6.3	6.3
1.2	217	219.9	3.0	3.2

표 3과 그림 7부터 그림 11까지 각각의 표와 그림에 나타난 바와 같이 개방회로 특성, 단락회로 특성, 소용량 부하시험 결과와 유한요소 해석결과가 전반적으로 근사하게 일치함을 알

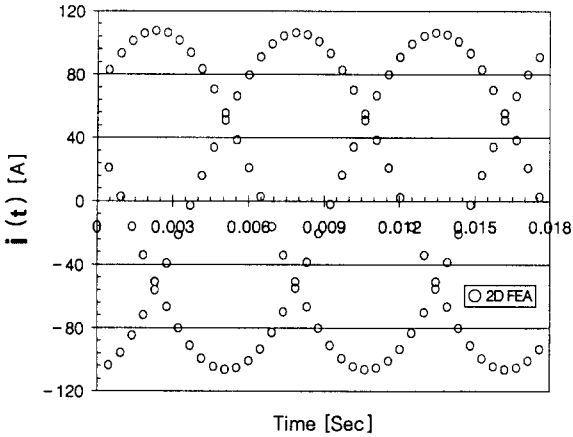
수 있었다. 이로써 본 논문에서 활용한 외부회로를 결합한 2차원 유한요소 해석기법의 타당성과 유용성을 확인하였으며, 정격부하 운전시 SCG의 운전특성 또한 본 논문에서 활용한 기법을 이용하여 해석할 수 있을 것으로 판단되어 이를 수행하였다.

5. 정격부하 운전특성 예측

그림 12는 정격부하 운전특성 예측을 위해 계자에 205[A]의 전류를 인가하고 역률 0.9, 30[kVA]용량의 부하를 전기자측에 인가하여 계산한 정격부하시 전기자 단자전압 $v(t)$ 와 전기자 전류 $i(t)$ 의 파형이다. 그림 12로부터 계산한 정격부하 운전시의 전기자 단자전압 V_a 는 217.1[V], 전기자전류 I_a 는 75.3[A]이었다. 개발한 SCG에 정격부하를 인가하여 운전할 경우 그림 12에 나타낸 결과와 유사한 동작특성을 보일 것으로 예측된다.



(a) 계산한 전압파형
(a) Calculated voltage waveforms



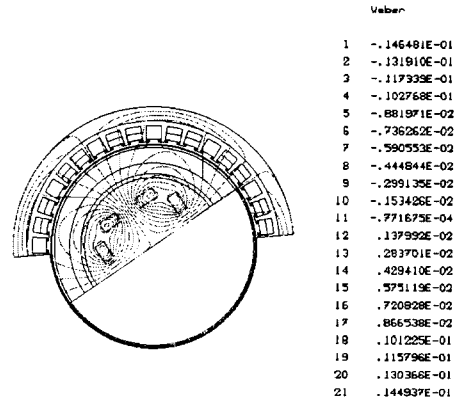
(b) 계산한 전류파형
(b) Calculated current waveforms

그림 12 정격부하시 선간전압 및 전류파형 (유한요소 계산결과)

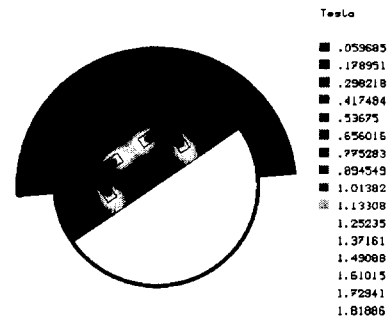
Fig. 12 Line to line voltage and current waveforms for the rated load (2D FEA results)

그림 13은 계자에 205[A]의 전류를 인가하여 정격부하 운전 특성을 계산한 후 얻은 등자속선과 자속밀도 분포로서 SCG의

회전자가 약 15회전한 후의 모습이다.



(a) 등자속선(약 0.503[sec])
(a) Equi-flux line(0.503[sec])



(b) 자속밀도 분포(약 0.503[sec])
(b) Flux density(0.503[sec])

그림 13 정격부하시 30 kVA 초전도 발전기의 등자속선도와 자속밀도

Fig. 13 Rated load equi-flux line and flux density of 30 kVA SCG

6. 3상 돌발단락시 특성 해석

동기속도로 운전하고 있는 동기발전기의 3상 단자를 갑자기 단락시키면 전기자 권선에 정상상태시 인가되는 전류의 수배에서 수십 배에 가까운 단락전류가 흐르게 되며 전기자 권선간에 강한 전자력이 작용하게 된다. 이러한 현상은 전기자 권선의 절연파괴, 권선 단부의 변형 또는 손상을 초래할 수 있기 때문에 적절한 설계를 통해 전기자 권선에 가해지는 피해를 최소화시켜야 한다.

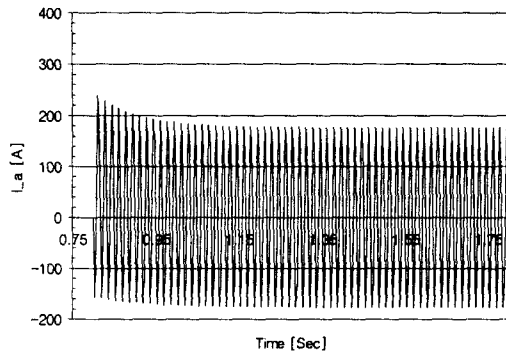
본 절에서는 30kVA 초전도 발전기의 3상 돌발단락 운전 현상에 관한 2차원 전자계 해석을 수행하여 계산된 결과를 분석하였다. 그림 14는 30kVA 초전도 발전기의 3상 돌발단락 운전시의 부하 전류 파형을 나타낸 것이다. 3상 돌발 단락 현상의 발생직후 a상의 부하전류는 약 240[A], b상의 부하전류는 약 360[A], c상의 부하전류는 약 -390[A]로 변동하였다.

3상 돌발단락 곡선으로부터 얻은 각 상별 교류전류 파형의 포락선을 이용하여 계산된 직축 동기 리액턴스 x_d , 직축 과도 리액턴스 x_d' , 직축 차과도 리액턴스 x_d'' 와 OCC 및 SCC 곡선으로부터 계산된 값을 표 4에 정리하여 나타내었다.

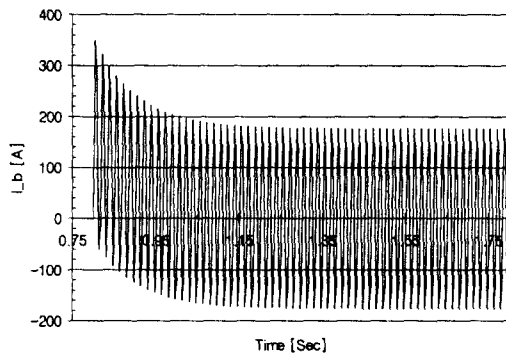
표 4 동기 리액턴스 및 단락비

Table 4 Synchronous reactance and short circuit ratio

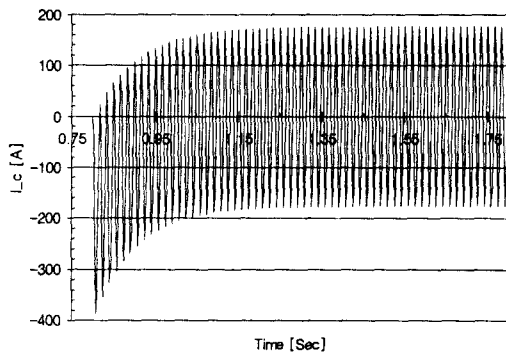
		x_d [pu]	x_d' [pu]	x_d'' [pu]	SCR [pu]
3상 돌발단락 특성 이용		0.3370	0.2650	0.1660	2.9674
개방회로 및 단락회로 특성 이용	2D FEA	0.3174			3.1510
	시험	0.3108			3.2176



(a) a상 전류파형
(a) a phase current waveforms



(b) b상 전류파형
(b) b phase current waveforms



(c) c상 전류파형
(c) c phase current waveforms

그림 14 3상 돌발단락에 의한 전류파형
Fig. 14 Current waveforms of 3 phase sudden short

6. 결 론

본 논문에서는 30 kVA SCG의 개방회로 특성, 단락회로 특성 및 소용량 부하, 정격부하, 3상 돌발단락시의 운전특성 분석을 단시간 내에 빠르고 정확하게 수행하기 위해 2차원 유한요소법과 해석영역에 포함되지 않은 부분을 회로소자로 표현한 외부회로를 결합하여 활용하였다. 외부회로의 전기자 권선 단부 관련소자에 개념설계 단계부터 수행하여 얻은 유한요소 해석결과와 설계자료 등을 참조하여 얻은 권선 단부 누설 리액턴스 값과 계산된 권선 단부 저항을 입력함으로써 실제 전자계 특성과 매우 근사한 계산결과를 얻고자 시도하였다. 그 결과, 개방회로 및 단락회로 특성시험, 소용량 부하 인가 시험을 통해 실측한 값과 유한요소 해석을 수행하여 구한 SCG의 운전특성 계산값이 근사하게 일치함을 확인하였으며, 3상 돌발단락시와 정격부하 인가시의 운전특성을 예측하였다.

30 kVA SCG의 개방회로 특성시험 결과와 유한요소 해석결과를 비교하여 발전기의 단자전압과 주파수가 회전속도에 비례하여 선형적으로 증가한다는 사실을 확인하였다. 또한 개방회로 및 단락회로 특성시험, 소용량 부하 인가시험으로부터 측정된 전기자 단자전압과 전기자전류가 유한요소 해석을 수행하여 계산한 값과 매우 근사하게 일치하였다. 개방회로 및 단락회로 특성시험 결과로부터 동기 리액턴스와 단락비는 각각 0.3108[pu], 3.2176[pu]로 해석결과와 유사하게 계산되었으며, 제작된 SCG는 전압변동율과 부하 변동시에 필요한 여자전류의 변동폭이 매우 작은 특성을 가질 것으로 예상되었다. 각각의 특성시험 및 소용량 부하시험 결과와 유한요소 해석결과가 전반적으로 근사하게 일치하여 본 논문에서 활용한 외부회로를 결합한 2차원 유한요소 해석기법의 타당성과 유용성을 확인하였다. 대용량 부하인가시 SCG 운전특성은 역률을 고려한 정격부하 인가시의 운전특성을 분석하여 그 결과를 제시하였다.

30 kVA SCG의 운전특성 분석을 위해 수행한 본 논문의 연구결과는 향후 SCG 운전시에 측정 가능한 각종 특성값과 비교 할 수 있는 유용한 자료가 될 것이다. 또한 2차원 유한요소 영역과 외부회로를 결합한 전자계 해석 기법은 1 MVA급 SCG를 개발하고자 할 경우 이외에도 다양한 회전기의 설계단계부터 실증시험단계까지의 각종 운전특성 예측에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] James L. Kirtley, Jr., "Large System Interaction Characteristics of Superconducting Generators", Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 3, pp. 449 - 461, March 1993
- [2] H. Nakamura, et al., "Static Excitation Test Results of the Partial Rotor Model for 70 MW class Superconducting Generator with Quick Response Excitation", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 4, pp. 2357 - 2360, July 1996
- [3] K. Arai, et al., "Development of 70 MW Class Superconducting Generators", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No. 4, pp. 1875 - 1878, July 1994
- [4] 하경덕, 황돈하, 박도영, 김용주, "30 kVA 초전도 발전기 설계를 위한 정상상태 전자계 해석", 대한전기학회 전기기기연구회 춘계학술발표회, pp. 5 - 7, 1998. 5

- [5] 하경덕, 황돈하, 박도영, 김용주, "30 kVA 초전도 발전기의 정상상태 및 과도상태 전자계 해석", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 91 - 93, 1998. 7
- [6] Flux2D User's Guide, Version 7.11, Magsoft Corporation, Troy, NY 12180, 1995
- [7] M. Liwschitz-Garik and C. C. Whipple, Electric Machinery Vol. 1; Fundamentals and D-C Machines, D. Van Nostrand Company, Inc. pp. 62 - 76, 1946
- [8] S. J. Salon, Finite Element Analysis of Electrical Machines, Kluwer Academic Publishers, 1995
- [9] Silvio Ikuyo Nabeta, Jean-Louis Coulomb and Gilbert Reyene, "A Time-Stepped Finite - Element Simulation of a Symmetrical Short-Circuit in a Synchronous Machine", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No. 5, pp. 3683 - 3686, September 1994
- [10] Edward Wilson Kimbark, POWER SYSTEM STABILITY Volume III Synchronous Machines, IEEE PRESS, 1995
- [11] Van E. Mablekos, Electric Machine Theory for Power Engineers, New-York Harper & Row, pp.576 ~ 580, 1980
- [12] John H. Kuhlmann, Design of Electrical Apparatus, John Wiley & Sons, Inc, 3rd Edition, 1959

저 자 소 개



하경덕 (河敬德)

1972년 1월 28일생. 1996년 홍익대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 2월~1999년 한국전기연구소 전력전자연구부 발전기진단연구팀 위촉연구원. 1999년~현재 한국전기연구소 산업전기

연구단 Mechatronics 연구그룹 인턴연구원
Tel : 0551-280-1541, Fax : 0551-280-1547
E-mail : simsknow@chollian.net



김용주 (金容柱)

1953년 11월 12일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1984년 R.P.I. 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1988년~1993년 한국전기연구소 전력기기연구실장. 1993년~1999년 한국전기

연구소 발전기진단연구팀장. 1996~1999년 한국전기연구소 고속전철사업그룹장 겸임. 1999년~현재 한국전기연구소 산업전기연구단장 겸 고속전철TFT팀장
Tel : 0551-280-1400, Fax : 0551-280-1547
E-mail : yjkim@keri.re.kr



황돈하 (黃敦夏)

1969년 2월 10일생. 1991년 영남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년~현재 한국전기연구소 Mechatronics연구그룹 선임연구원

Tel : 0551-280-1544, Fax : 0551-280-1547
E-mail : dhhwang@keri.re.kr



권영길 (權永吉)

1959년 7월 28일생. 1982년 부산대 기계공학과 졸업, 1984년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1990년 동 대학원 기계공학과(공학), 1990년~1991년 한국기계연구원 선임연구원 1992년~현재 한국전기연구소 전략기술연구

단 초전도응용연구그룹장
Tel : 0551-280-1501, Fax : 0551-280-1696
E-mail : ykkwon@keri.re.kr



박도영 (朴都永)

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

Tel : 0551-280-1545, Fax : 0551-280-1547
E-mail : dypark@keri.re.kr



류강식 (柳康植)

1956년 8월 20일생. 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1988~현재 한국전기연구소 전략기술연구단장

Tel : 0551-280-1500, Fax : 0551-280-1696
E-mail : ksryu@keri.re.kr