

30 kVA 초전도 발전기의 소용량 부하 인가시 운전특성 해석

하경덕 · 황돈하 · 박도영 · 김용주
한국전기연구소 전력전자연구부 발전기진단연구팀

Performance Analysis of 30 kVA Super-Conducting Generator under Light Load

Kyoung Duck Ha, Don Ha Hwang, Doh Young Park, Yong Joo Kim
KERI, Power Electronics Division, Generator Diagnosis Research Team

Abstract - In this paper 30 kVA Super-Conducting Generator's test and analysis results of OCC and SCC are presented. Also the test and FE analysis results of the generator under 1.2, 2.4, and 3.6[kW] load are described. For FE analysis of the generator's performance, the external circuit is coupled with the FE region. The generator's end winding reactance is obtained based on the design data, actual dimension, preliminary FE analysis, and empirical formulas. The comparison of FE analysis coupled with external circuit to the test results shows a good agreement.

OCC, SCC 시험결과와 2차원 유한요소 해석결과가 근사하게 일치하여 외부회로와 결합된 2차원 유한요소법의 타당성을 검증하였으며, 30 kVA SCG의 단락비와 동기 리액턴스를 계산하였다. 소용량 부하 인가시험 및 2차원 유한요소 해석결과로부터 전기자 단자전압 및 전류가 매우 근사하게 일치함을 확인하였다.

1. 서 론

과학기술의 발달과 경제성장에 따른 도시의 발달은 각종 전력변환설비와 전기기기의 사용증가와 더불어 대용량의 전력을 필요로 하는 수용가를 양산하고 있다. 따라서 수용가 측에 대용량의 전력을 안정적, 경제적으로 공급하기 위한 기술개발노력이 절실히 필요하다. 전력설비의 대용량화, 소형경량화, 고효율화를 추구하고, 향후 지속적으로 증가할 미래의 전력수요에 대처할 수 있는 기술의 개발을 위해 선진 각국에서는 자기유체역학발전(Magneto-Hydro Dynamic), 초전도 에너지저장장치, 초전도 케이블, 초전도 변압기, 초전도 발전기(Super-Conducting Generator : 이하 SCG) 등의 다각적인 연구를 수행 중에 있다.

SCG의 제자권선은 일반 동선보다 부피도 작고 절대온도에서 저항이 존재하지 않는 초전도 선재를 사용하기 때문에 손실 없이 많은 전류를 인가할 수 있어 고자장의 형성이 가능하다. 따라서 SCG는 기존의 발전기에 비하여 소형경량화 제작 및 대용량 발전이 가능하며 저 동기 리액턴스화에 의한 전력계통의 안정도 향상이 가능하다. 이러한 장점을 갖는 SCG에 대한 연구는 일부 기술보유국에서만 연구를 진행 중이며, 일본의 경우 200 MW급 SCG 개발을 최종목표로 현재 70 MW급 SCG를 개발하여 관서전력 구내에서 실증시험을 수행하고 있다.[1-3]

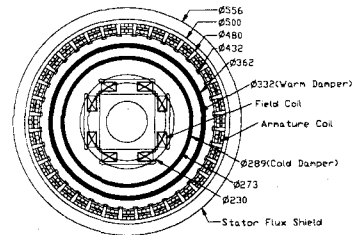
본 논문에서는 정격용량 30 kVA의 회전자형 SCG를 제작, 실험하여 열린 개방회로 특성(Open Circuit Characteristic : 이하 OCC) 및 단락회로 특성(Short Circuit Characteristic : 이하 SCC) 시험결과와 2차원 전자계 해석결과가 매우 근사하게 일치함을 확인하고, SCG의 정격부하 인가시 운전특성을 예측하기 위한 선행연구로서 소용량 부하인가시의 2차원 유한요소 해석결과와 시험결과를 비교하였다.

SCG의 운전특성분석을 용이하고 정확하게 수행하기 위하여 유한요소 해석영역에 포함되지 않는 권선 단부 리액턴스, 부하 등을 회로소자로 표현한 외부회로를 구성하여 2차원 유한요소법과 결합하여 활용하였다. 구성된 외부회로의 각각의 회로소자에 30 kVA SCG 설계자료, 구조적 특징, 개념설계 단계부터 수행하여 얻은 각종 유한요소 해석결과 및 누설 리액턴스 계산을 위한 경험식 등을 종합적으로 고려하여 권선 단부 리액턴스를 결정하여 활용하였다.[4-6]

2. 30 kVA 초전도 발전기의 구조 및 2차원 유한요소 해석

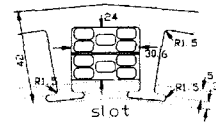
2.1 초전도 발전기의 구조 및 상세제원

본 연구에서 제작, 시험한 SCG의 제원과 단면구조를 그림 1과 표 1에 나타내었다.



(a) 단면구조

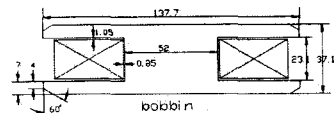
(a) Cross-sectional dimension



conductor strand
(26strands) (Ø1.4)

(b) 전기자 슬롯

(b) Armature slot



winding section
(532(28x19) strands) (Ø1.0)

(c) 계자 1극

(c) Field pole

그림 1 30 kVA 초전도 발전기의 단면구조

Fig. 1 Cross-sectional dimension of 30 kVA SCG

표 1 30 kVA 초전도 발전기의 제원

Table 1 Specifications of 30 kVA SCG

구분	제원	
상수	3	
극수	4	
정격용량	30[kVA]	
정격전압	220[V]	
주파수	60[Hz]	
역률	0.9	
정격회전속도	1800[rpm]	
자기차폐	외반경	278[mm]
	내반경	250[mm]
전기자	외반경	250[mm]
	내반경	213[mm]
고정자 길이	192[mm]	
상당 Turn 수	60[Turn]	
제동차폐	외반경	181[mm]
	내반경	166[mm]
극저온	외반경 144.5[mm]	
방사차폐	내반경 136.5[mm]	
고정자 슬롯 수	60	
자성체 재질	S23	

2.2 외부회로를 활용한 2차원 유한요소 해석

30 kVA SCG의 운전특성 분석을 수행하기 위해 2차원 유한요소법과 해석영역에 포함되지 않은 부분을 회로 소자로 표현한 외부회로를 결합하여 활용하였다. [7-8] 외부회로에서 회전자는 계자전류원과 계자 권선으로 구분되는 계자, 그리고 상은 차폐용 댐퍼와 극저온 차폐용 댐퍼로 구분되는 제동차폐부로 구성하였다. 고정자는 각 상의 전기자 권선 직선부의 저항을 고려하기 위한 권선과 전기자 권선 단부 저항 및 전기자 권선 단부 누설 인덕턴스로 구성하였으며 3상 Y형태로 결선하여 활용하였다. 부하는 부하저항, 부하인덕턴스, 부하저항 연결용 스위치로 구성하였다. 전기자 권선 단부 저항은 전기자 슬롯 외측에 노출된 권선의 단부 길이와 도전율을 고려하여 계산하고 외부회로에 입력하였다. 제동부의 저항률과 자기차폐부 재질의 B-H 곡선은 제작사로부터 입수한 자료를 활용하였다.

3. 개방회로 및 단락회로 특성 시험결과 및 유한요소 해석결과(9)

그림 2는 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.

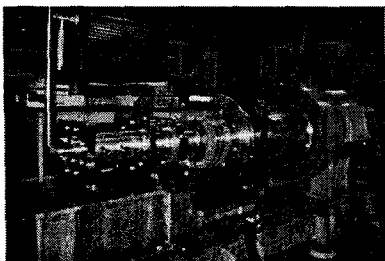


그림 2 30 kVA 초전도 발전기
Fig. 2 30 kVA Super-conducting generator

3.1 개방회로 특성시험

개방회로 특성시험을 수행하여 측정된 전기자 단자전압과 유한요소 해석을 수행하여 계산한 전기자 단자전압의 실효치 V_a 를 비교하여 그림 3에 나타내었다.

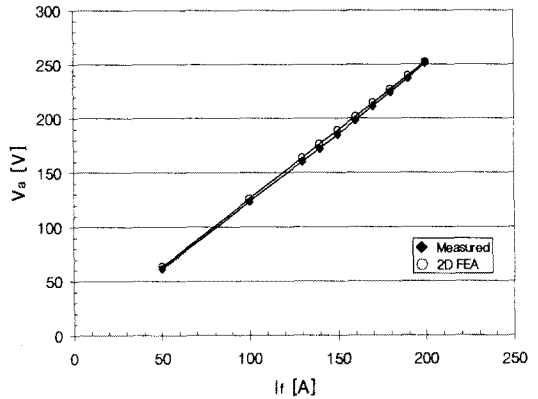


그림 3 특성시험 결과 및 유한요소 해석결과로부터 얻은 개방회로 특성

Fig. 3 Measured and 2D FEA results of OCC

3.2 단락회로 특성시험

단락회로 특성시험을 수행하여 측정된 전기자전류와 유한요소 해석을 수행하여 계산한 전기자전류의 실효치 I_a 를 비교하여 그림 4에 나타내었다.

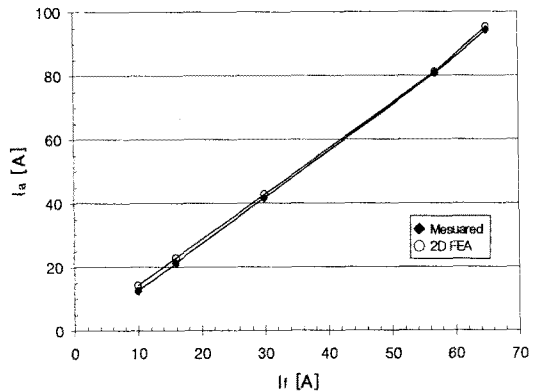


그림 4 특성시험 결과 및 유한요소 해석결과로부터 얻은 단락회로 특성

Fig. 4 Measured and 2D FEA results of SCC

4. 소용량 부하인가 시험결과 및 유한요소 해석결과

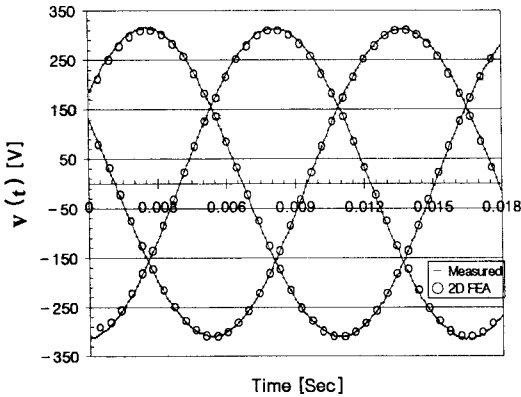
표 2는 SCG의 계자에 175[A] 전류를 인가하고 전기자측에 3.6[kW], 2.4[kW], 1.2[kW]용량의 3상 전동부하를 인가하여 측정된 전기자 단자전압, 전류와 동일한 조건으로 유한요소 해석을 수행하고 계산하여 얻은 전기자 단자전압, 전류를 비교한 것이다. 부하시험시에 측정된 전기자 단자전압과 전류가 유한요소 해석으로부터 계산한 값과 근사하게 일치하고 있음을 표 2를 통해 확인하였다.

표 2 부하시험 및 유한요소 해석결과

Table 2 Measured and calculated results of load tests

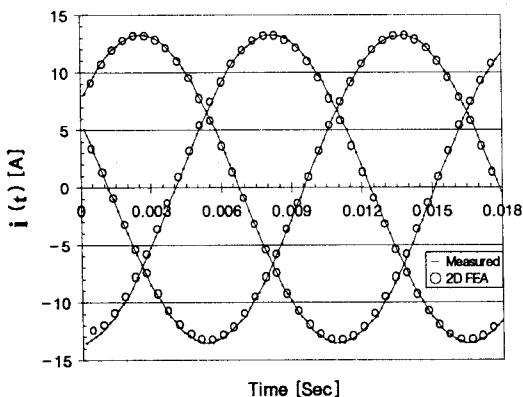
부하용량 (P _{Load}) [kW]	전기자 단자전압 (V _a [V])		전기자전류 (I _a [A])	
	측정값	2D FEA 계산값	측정값	2D FEA 계산값
3.6	223.2	219.4	9.4	9.4
2.4	218	219.6	6.3	6.3
1.2	217	219.9	3.0	3.2
무부하	220	220.3		

그림 5는 SCG의 계자에 175[A]의 전류를 인가하고 전기자 단자측에 3.6[kW]용량의 3상 전등부하를 인가하여 측정된 전기자 단자전압과 전기자전류를 동일한 조건으로 유한요소 해석을 수행하여 계산한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그림 5에 나타나 있듯이 부하시험을 통해 측정된 전압, 전류의 파형과 2차원 유한요소 해석을 수행하여 계산한 전압, 전류의 파형이 매우 근사하게 일치하였다.



(a) 측정 및 계산한 전압파형

(a) Measured and calculated voltage waveforms



(b) 측정 및 계산한 전류파형

(b) Measured and calculated current waveforms

그림 5 3.6[kW] 전등 부하시험시의 선간전압 및 전류파형

Fig. 5 Voltage and current waveforms(3.6[kW] Load)

5. 결 론

무부하 계자전류 175[A]를 인가하여 2차원 유한요소 해석기법으로 구한 무부하 단자전압은 220.3[V]로 실측된 무부하 단자전압 220[V]와 매우 근사하게 계산되었다. 개방회로 및 단락회로 특성시험으로부터 구하여진 단락비와 동기 리액턴스는 각각 3.2176[pu]와 0.3108[pu]으로써, 제작된 SCG는 전압변동율이 작으며 부하 변동에 따른 여자전류의 변동폭도 매우 작은 특성을 가질 것으로 판단되었다. SCG의 OCC 및 SCC 시험결과와 외부회로를 결합한 2차원 유한요소 해석결과가 전반적으로 매우 근사하게 일치하여 본 연구에서 활용한 유한요소 해석기법의 타당성을 검증하였다.

SCG의 정격부하 인가시 운전특성을 예측하기 위한 선행연구로서 수행한 3.6[kW], 2.4[kW], 1.2[kW]의 소용량 부하인가시 운전특성 분석결과, 전기자 단자전압과 전류의 실측값이 2차원 유한요소 해석결과와 매우 근사하게 일치함을 표 2와 그림 5를 이용하여 확인하였다.

본 논문에서 제시한 30 kVA SCG의 소용량 부하 인가시 운전특성 분석과 관련된 연구결과는 향후 정격부하 인가시 운전특성을 예측하기 위한 연구 수행시 매우 유용하게 활용할 수 있는 자료가 될 것으로 판단된다. 또한 본 논문에서 활용한 외부회로와 결합한 2차원 유한요소 해석기법은 각종 회전기의 개념설계 단계부터 설계통에 적용하여 운전하는 단계까지의 각종 운전특성을 예측하고자 할 경우뿐만 아니라 1 MVA급 SCG 개발시에도 용이하게 적용할 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] M. Liwshitz-Garik and C. C. Whipple, Electric Machinery Vol. 1: Fundamentals and D-C Machines, D. Van Nostrand Company, Inc., pp. 62 - 76, 1946
- [5] 하경덕, 황돈하, 박도영, 김용주, "30 kVA 초전도 발전기 설계를 위한 정상상태 전자기 해석", 대한전기학회 전기기기연구회 춘계학술발표회, pp. 5 - 7, 1998. 5
- [6] 하경덕, 황돈하, 박도영, 김용주, "30 kVA 초전도 발전기의 정상상태 및 과도상태 전자기 해석", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 91 - 93, 1998. 7
- [7] S. J. Salon, Finite Element Analysis of Electrical Machines, Kluwer Academic Publishers, 1995
- [8] Flux2D User's Guide, Ver 7.11, Magsoft Corporation, 1995
- [9] 하경덕, 황돈하, 박도영, 김용주, "개방회로 및 단락회로 특성시험을 이용한 30 kVA 초전도 발전기의 특성 분석", 대한전기학회 춘계 합동 학술발표회, pp. 116 - 118, 1999. 5