

30 kVA 초전도 발전기의 정상상태 및 과도상태 전자계 해석

하경덕 · 황돈하 · 박도영 · 김용주
한국전기연구소 전력전자연구부 발전기진단연구팀

Steady-State and Transient-State Electromagnetic Analysis of the 30 kVA Superconducting Generator

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 superconducting generator's transient-state electromagnetic analysis by FEM is described. The transient-state analysis by moving air gap technique was performed to analyze its 3 phase sudden short circuit characteristics. External circuit components were connected to generator model with end-winding resistance and inductance.

1. 서 론

전력수요의 급격한 증가에 대처하기 위해 대용량 발전기의 사용이 일반화되었으나, 발전기의 대형화는 동기 리액턴스의 증가로 인한 제약이 존재한다. 초전도체를 사용한 발전기는 높은 전류밀도를 활용하여 기존의 발전기로는 실현이 불가능한 대용량 발전기를 구현할 수 있으므로 발전효율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대되어져 왔다. 1969년 미국의 MIT에서 45 kVA급 초전도 발전기의 제작시험을 시작으로 프랑스, 일본, 러시아 등의 국가에서 초전도 발전기의 개발에 대한 연구가 오래 전부터 지속적으로 수행되어 오고 있다.^{[1][2]}

본 논문에서는 3상 4극 30 kVA의 회전계자형 초전도 발전기 설계 및 제작을 위해 외부회로를 연결하지 않은 상태에서의 정상상태 전자계 해석을 수행한 결과^[3]를 바탕으로 과도상태에서의 전자계 해석을 수행한 결과를 제시한다. 과도상태 전자계 해석은 전기자 권선 단부의 영향을 분석하기 위한 외부회로와 moving air-gap 기법을 이용하여^{[4][5]} 3상 돌발단락시 초전도 발전기의 특성을 분석하였다. 외부회로는 기존의 FEM해석영역에서 고려할 수 없는 부분으로 구성된 계자 전류원(전압원), 3상 부하, 전기자 권선단부의 inductance와 저항 및 기존의 FEM해석영역의 정보를 활용하는 부분으로 구성된 제동차폐부, 극저온 차폐부 및 전기자로 구분된다.

2. 초전도 발전기의 구조 및 사양

2.1 초전도 발전기의 구조

본 연구에서 해석한 회전계자형 초전도 발전기의 회전부분은 액체 He내에 잠긴 계자 권선, 계자 권선 외측에 위치한 열 손실 방지목적의 극저온 차폐부(방사차폐) 및 발전기 부하 변동시 회전자의 진동을 빨리 감쇄시키기 위한 제동차폐부로 이루어지며, 電氣子部는 FRP로 이루어진

전기자 지지구조 내부에 들어가는 전기자 권선과 자기 차폐부(환경차폐)로 이루어진다. 회전계자형 초전도 발전기의 구조의 개략도는 그림 1과 같다.

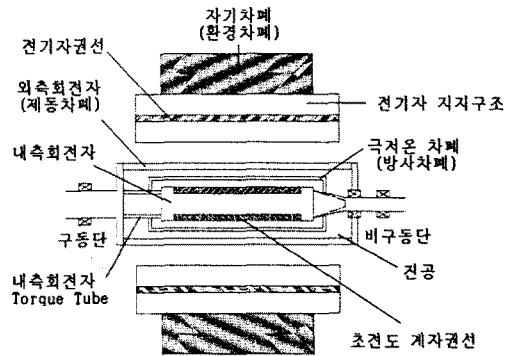


그림 1. 회전계자형 초전도 발전기의 구조

2.2 초전도 발전기의 사양

본 논문에서 해석한 Model의 사양은 정격용량 30 [kVA], 정격전압 220 [V], 정격 계자 전류 200 [A], 정격 회전속도 1800 [rpm]의 특성을 가지며, 설계 model의 치수는 표 1과 같다.

표 1. 설계 model의 치수

설계변수		치 수 [mm]
자기차폐	외반경 (R _{mi})	278
	내반경 (R _{mo})	250
전기자	외반경 (R _{ai})	240
	내반경 (R _{ao})	213
제동차폐	외반경 (R _{di})	196.5
	내반경 (R _{do})	166
극저온 방사차폐	외반경 (R _{ti})	144.5
	내반경 (R _{to})	136.5
고정자 길이 (l _s)		192
고정자 Slot 수 (N _s)		36
상당 Turn 수 (N _{ph})		72 [Turn]

3. 초전도 발전기의 과도상태 전자계 해석

3.1 과도상태 전자계 해석

본 연구에서 설계한 초전도 발전기의 과도특성을 파악하기 위해서 회전자가 1800 [rpm]으로 일정하게 회전하고 있다는 가정하에, 전류원과 전압원을 이용한 3상 무부하개방시와 3상 단락된 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다. 초전도 발전기의 형상은 정상상태 해석시와 동일한 방법으로 극의 대칭성을 고려하여 전체형상의 1/2만 modelling하였으며, 고정 경계조건과 주기 경계조건을 적용하였다.

그림 2는 과도상태 해석을 위해 입력한 초전도 발전기 형상이다. 설계된 발전기의 계자와 전기자간의 공극은 moving air gap 기법의 적용을 위해서 이중 공극을 설정하였다.

참고로, 해석을 위해 사용한 컴퓨터는 MMX 200 [MHz]의 CPU와 128 [Mb] RAM을 탑재한 것으로서 이때 연산시간은 부하 개방시 정상상태 도달을 위한 계산시간(약 14[hour])과 부하 단락시 과도해석시간(약 16 [hour])을 포함하여 총 30 [hour]의 계산시간이 소요되었다. 본 해석은 전자계 해석용 프로그램인 Flux2D를 이용하였다.⁽⁶⁾

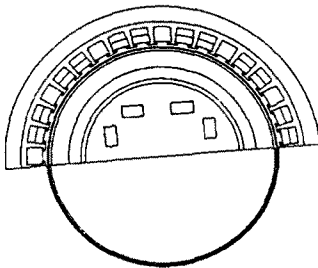
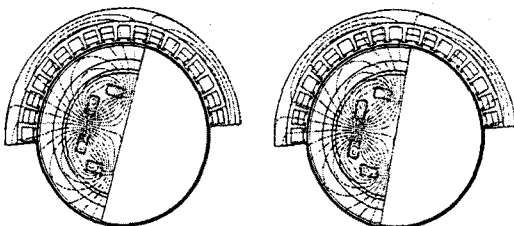


그림 2. 과도상태 해석을 위한 초전도 발전기의 형상

초전도 발전기의 과도상태 특성을 해석하기 위해서 계자 전류원을 활용한 외부회로를 연결하여 무부하 정상상태에 도달하고, 이때 계자 전류원을 계자 전압원으로 교체하여 무부하 정상상태를 몇 주기 해석한 후, 3상 단자를 단락 시킴으로써 초전도 발전기의 3상 돌발 단락특성을 구할 수 있었다.

그림 3 (a)는 계자에 전류원을 인가하고 부하를 개방하여 해석한 경우의 등자속선으로서 정상상태 해석시의 결과⁽⁵⁾와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 3 (b)는 계자에 전압원을 인가하고 그림 3 (a)의 결과를 초기치로 설정하여 해석한 경우의 등자속선을 나타내고 있다.



(a) 전류원 사용 (약 339.8 [ms]) (b) 전압원 사용 (약 340.3 [ms])

그림 3. 부하개방시의 등자속선 분포

3.1.1 3상 무부하개방시 초전도 발전기의 동작특성

초전도 발전기의 제반특성을 정확히 파악하기 위해서 FEM 해석영역과 연결한 외부회로는 그림 4와 같다.

回轉子部는 계자 전압원(V_f), 계자 권선(NF, PF), 극저온 차폐용 Damper(D1) 및 상온 차폐용 Damper(D2)로 구성하였다. 電氣子部는 각상의 전기자 권선(PA, MA, PB, MB, PC, MC), 권선단부 저항(R_{end}), 권선단부 Inductance(L_{end}) 및 각상의 전압을 측정하기 위해 임의로 설정한 저항(R_1, R_2, R_3), 3개의 부하저항(R_{Load})으로 설정하였다. 차폐부의 저항율은 Aluminium의 저항율인 $2.7e-8$ ($\Omega \cdot m$)를 각각 이용하였다.

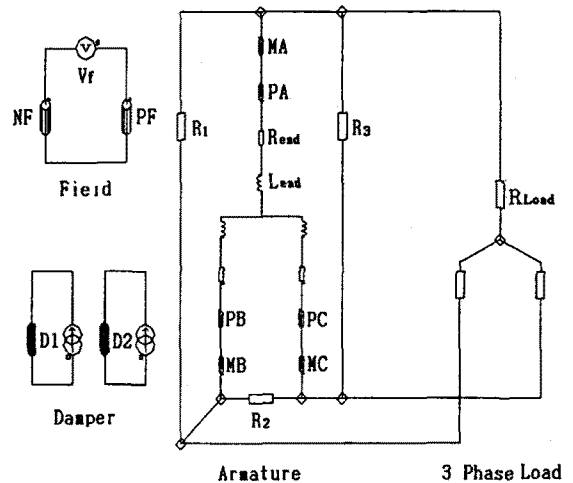


그림 4. 과도상태 해석을 위해 FEM 해석영역과 연결한 외부회로

그림 5는 3상 무부하개방시 계자에 정격전압원을 인가하여 해석한 결과로서 전기자 단자에 나타난 선간 전압 파형을 나타내고 있다. 선간 전압의 최대값과 RMS 값은 약 334 [V], 236.2 [V]로 나타났고, 각각의 단자전압은 정확히 120 [Deg]의 위상차를 나타내었다. 또한 3상 Y결선으로 구성된 전기자 권선에 고조파가 거의 포함되어 있지 않았다.

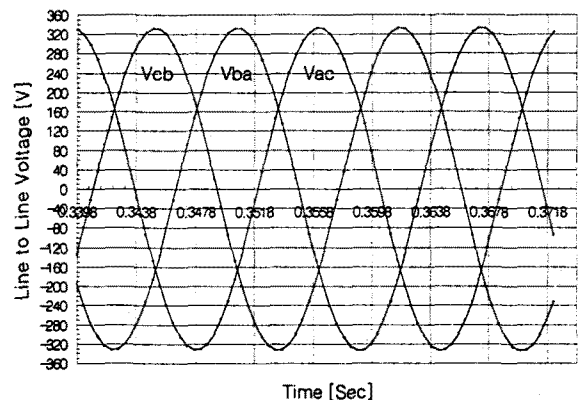
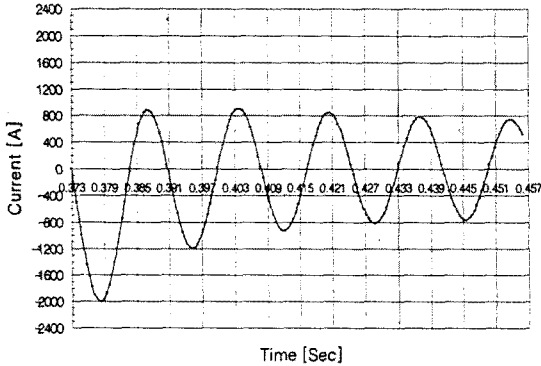


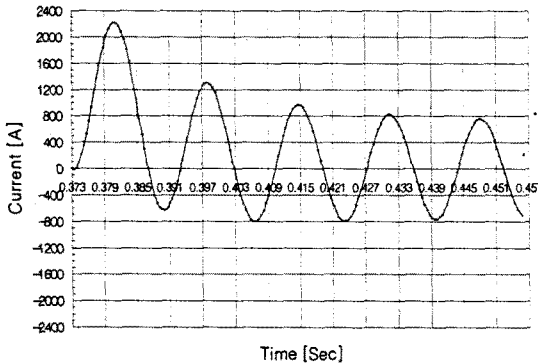
그림 5. 계자에 전압원을 연결한 상태에서 부하개방시 전기자 단자전압

3.1.2 3상 돌발단락시 초전도 발전기의 동작특성

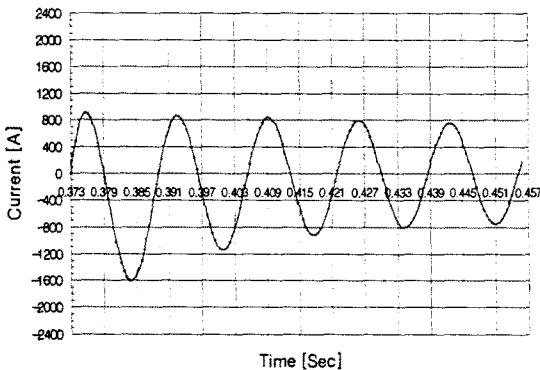
그림 6은 3상 돌발 단락시 각상의 부하전류 파형을 보여주고 있다. 3상 단락직후 시간이 지남에 따라 A상의 부하전류는 첫 번째 주기에서 약 -2000 [A]까지 증가하였다가 다섯 번째 주기에서 약 744 [A]로 감소하고 있다. B상의 부하전류 또한 A상의 경우와 유사하게 약 2223 [A]까지 증가하였다가 약 760 [A]로 감소하였다. C상의 부하전류도 약 -1607 [A]까지 증가하였다가 약 758 [A]로 감소하였다.



(a) A상의 부하전류 파형



(b) B상의 부하전류 파형



(c) C상의 부하전류 파형

그림 6. 3상 돌발 단락시의 부하전류 파형

4. 결 론

본 논문에서는 3상 4극 회전계자형 초전도 발전기의 3상 돌발단락시의 과도상태 전자기 해석을 통해 초전도 발전기의 특성 Parameter를 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

연구결과 계자에 전압원을 연결한 3상 부하개방시 부하측 선간전압의 RMS값은 236.2 [V]로 계산되었다. 외부회로를 연결하지 않고 해석했던 초전도 발전기의 정상상태 전자기 해석⁽³⁾(250 [V_{rms}])과 End-Turn Inductance와 저항을 고려하여 Time-Step으로 해석한 정상 상태 전자기 해석결과가 대단히 근사한 해석결과를 얻을 수 있었다. 또한, 제동 차폐부의 재질특성은 정상상태 돌입 시 정수에 커다란 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

5. 향후 연구과제

향후 3상 돌발 단락전류의 Data처리를 통해 초전도 발전기의 X_d' , X_d'' 등의 특성 Parameter를 파악하고, 본 논문에서 고려하지 않았던 부하변동, 불평형 부하 등을 고려한 발전기 동작특성 해석 및 기계상수(관성 Moment, 마찰계수 등)를 고려하여 기동시 정격속도로 속도가 증가하며 나타날 수 있는 동작특성을 파악하기 위한 연구를 수행하고자 한다. 또한, End-Turn부의 영향을 파악하기 위한 3차원 해석결과와 더불어 실제 제작한 초전도 발전기와의 특성을 비교, 검토하여 향후 대용량 발전기의 과도특성 해석에 활용할 수 있는 유용한 자료를 제공하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 韓松曄, "超傳導 交流發電機의 開發現況과 課題", 大韓電氣學會 創立 40週年 記念 學術大會 論文集, pp. 171 - 174, 1987
- [2] James L. Kirtley, Jr., "Large System Interaction Characteristics of Superconducting Generators", Proceedings of the IEEE, vol. 81, no. 3, pp. 449 - 461, March 1993
- [3] 하경덕, 황돈하, 박도영, 김용주, "30 kVA 초전도 발전기 설계를 위한 정상상태 전자기 해석", 대한전기학회 전기기기 연구회 춘계학술발표회, pp. 5 - 7, 1998. 5
- [4] 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
- [5] S. J. Salon, 'Finite Element Analysis of Electrical Machines', Kluwer Academic Publishers, 1995
- [6] Flux2D User's Guide, Version 7.11, Magsoft Corporation, Troy, NY 12180, 1995
- [7] P. J. Turner, "Finite-Element Simulation of Turbine-Generator Terminal Faults and Application to Machine Parameter Prediction", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. EC-2, no. 1, pp. 122 - 131, March 1987