

초전도 발전기의 특성 해석에 관한 연구

오창윤, 이광호*, 김정철*, 박영일*, 조윤현*, 박도영**, 김웅주**
 *동아대학교 전기공학과, **한국전기연구소 발전기진단팀

The study of characteristic analysis on superconducting generator

Chang Yun Oh, Kwang Ho Lee*, Jung Chul Kim*, Young Il Park*, Yun Hyun Cho*
 Do Young Park**, Yong Joo Kim**
 *Dept. of Electrical Engineering, Dong-A Univ., **KERI

표 1. 초전도 발전기의 제원

부호	항목	치수
J_n	계자권선의 전류밀도	$1.54 \times 10^8 [A/m^2]$
I	계자 전류	200 [A]
N_n	계자권선의 턴수	1707
N_m	한 상당 전기자권선의 턴수	60
θ_f	계자 권선각	$\frac{2}{3}\pi$
r_{fi}	계자권선의 내반경	0.101376[m]
r_{fo}	계자권선의 외반경	0.1152[m]
r_{di}	damper shield의 내반경	0.1659692[m]
r_{do}	damper shield의 외반경	0.1966495[m]
r_{ai}	전기자권선의 내반경	0.216[m]
r_{ao}	전기자권선의 외반경	0.24[m]
r_{si}	자기차폐의 내반경	0.25[m]
r_{so}	자기차폐의 외반경	0.2780063[m]

Abstract - The paper is described about the calculation method of the basic design dimensions, magnetic field distribution and equivalent circuit parameters for superconducting generator.

To analyze the flux density, the induced voltage and the electromotive force, the airgap flux density government equation is derived from generator's analysis model.

1. 서 론

전력수요의 증가에 따라 대용량 발전기에 대한 연구가 점차 증가하고 있다. 그러나 기존의 발전기는 용량증가에 대한 한계에 이르렀다. 따라서 초전도체를 이용한 초전도 발전기 개발이 활발히 연구중이다. 초전도 발전기는 기존의 발전기에 비해 효율 향상, 소형 경량화, 또는 대용량화, 임계 제어 시간등이 증대함으로써 전력계통의 안전성 향상에도 공헌할 수 있는 것으로 기대되어지고 있다. 본 연구에서는 3상 4극 30kVA의 회전계자형 초전도 발전기의 계자권선의 특성해석을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 초전도 발전기의 해석모델

본 연구에서의 초전도 발전기는 계자가 회전자이고, 전기자가 고정자인 회전계자형 발전기이다. 고정자 부분을 보면 제일 바깥쪽에 자력선이 외부로 발산해 나가는 것을 막아주는 자기차폐(magnetic shield)가 있고, 전기자 권선(armature winding)이 놓여져 있다. 회전자 부분은 계자자속을 발생케 하는 계자권선(field winding)과 damper shield로 이루어져 있다. 그리고 해석하고자 하는 기본 설계 치수 사양은 표 1과 같다.

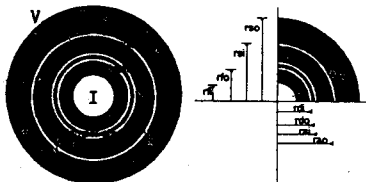


그림 1. 초전도 발전기의 해석 모델

2.2 기본 특성식

초전도 발전기를 설계하기 위해서는 자기회로, 전류장하 및 발전기내에서 작용하는 기계적 힘에 관한 양적인 사전 평가가 요구된다. 이것은 평균 권선반경에 집중된 발전기 권선과 등가 선형 전류 밀도를 나타낸 2차원 공극 자계 방정식의 해로부터 얻을 수 있다. 그림 1의 각 영역별 자속밀도식은 다음과 같이 얻을 수 있다.

내부영역 ($r < r_i$)

$$B_r = \mu_0 \frac{K_n}{2} \left(\frac{r}{r_i}\right)^{m-1} \left[1 \pm \left(\frac{r_i}{r_x}\right)^{2m}\right] \cos pn\theta$$

$$B_\theta = \mu_0 \frac{K_n}{2} \left(\frac{r}{r_i}\right)^{m-1} \left[1 \pm \left(\frac{r_i}{r_x}\right)^{2m}\right] \sin pn\theta$$

외부영역 ($r_x > r$)

$$B_r = \mu_0 \frac{K_n}{2} \left(\frac{r_i}{r}\right)^{m-1} \left[1 \pm \left(\frac{r}{r_x}\right)^{2m}\right] \cos pn\theta$$

$$B_\theta = \mu_0 \frac{K_n}{2} \left(\frac{r_i}{r}\right)^{m-1} \left[1 \pm \left(\frac{r}{r_x}\right)^{2m}\right] \sin pn\theta$$

초전도 발전기의 고정자 권선에서의 피상전력을 전기장하와 자기장하항으로 표현하면 다음 식 (3)과 같이 주어진다.

$$S = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} K_w B A_s L D^2 n_r \quad [VA] \quad (3)$$

권선의 자기인덕턴스와 두 권선 간의 상호인덕턴스는 각각의 자속쇄교를 계산하여 얻을 수 있다. 자기인덕턴스는 식 (4)와 같이 얻을 수 있으며,

$$L = 2\mu_0 \frac{\pi}{P} \left(\frac{TK_w}{\pi} \right)^2 \left[1 \pm \left(\frac{r_1}{r_x} \right)^{2p} \right] \quad [H m^{-1}] \quad (4)$$

3상권선에 대하여 $\alpha_0 = 120^\circ$ 이고, $r_1 = r_2$ 인 경우의 상호인덕턴스는 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$M_{ph} = -\mu_0 \frac{\pi}{P} \left(\frac{T_{ph} K_w}{\pi} \right)^2 \left[1 \pm \left(\frac{r_s}{r_x} \right)^{2p} \right] \quad [H m^{-1}] \quad (5)$$

초전도 발전기 동기 리액턴스 x_s 는 축방향 자속밀도를 대입하고, 선전류밀도는 \hat{K}_{ph} 로 대치하면 식 (6)과 같이 표현할 수 있으며,

$$x_s = \frac{1}{\sqrt{2}} K_w \mu_0 \frac{A_s}{B} \left[1 \pm \left(\frac{r_s}{r_x} \right)^{2p} \right] \quad [p.u.] \quad (6)$$

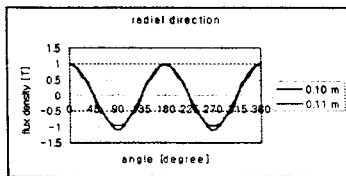
초기 과도 리액턴스는 식 (7)과 같다.

$$x_d'' = \frac{1}{\sqrt{2}} K_w \mu_0 \frac{A_s}{B} \frac{(1 \pm (r_a/r_x)^{2p})}{1 \pm (r_D/r_x)^{2p}} \times (1 - (r_D/r_x)^{2p}) \quad [p.u.] \quad (7)$$

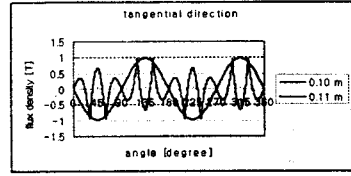
2.3 초전도 발전기의 특성고찰

초전도 발전기의 각 영역별 자속밀도 특성은 기본 특성식으로부터 그림 2, 그림 3 그리고 그림 4와 같이 얻을 수 있다.

그림 2는 계자 권선이 있는 부분에서의 자속밀도를 나타낸다. $r=0.1[m]$, $r=0.11[m]$ 일 때 r 방향 자속밀도 B_r 와 θ 방향의 자속밀도 B_θ 를 나타낸다. B_r 의 최대값은 각각 0.965[T], 1.018[T]이고, B_θ 의 최대값은 각각 0.97[T], 0.96[T]이다.



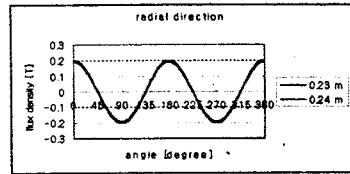
(a) radial direction



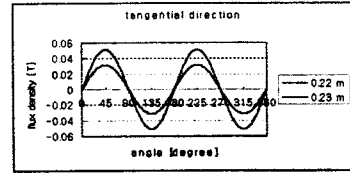
(b) tangential direction

그림 2. 계자권선에서의 자속밀도

그림 3은 전기자 권선이 있는 부분으로 $r=0.22[m]$, $r=0.23[m]$ 일 때 r 방향 자속밀도 B_r 와 θ 방향의 자속밀도 B_θ 를 나타낸다. B_r 의 최대값은 각각 0.2[T], 0.19[T]이고, B_θ 의 최대값은 각각 0.05[T], 0.03[T]이다.



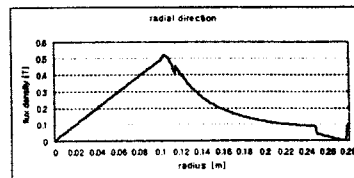
(a) radial direction



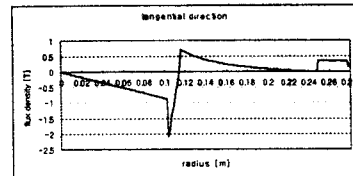
(b) tangential direction

그림 3. 전기자권선에서의 자속밀도

그림 4는 $\theta=30^\circ$ 일때의 거리 r 변화에 따른 자속밀도를 나타낸 것이다. B_r 의 최대값은 거리가 $r=0.104[m]$ 일 때 약 0.52[T]이고, B_θ 는 $r=0.116[m]$ 일 때 0.72[T]의 최대값을 나타낸다.



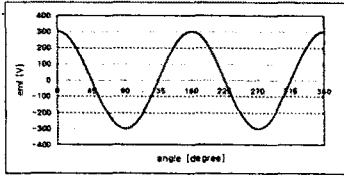
(a) radial direction



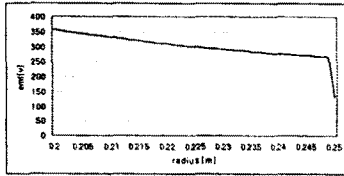
(b) tangential direction

그림 4. r 변화에 따른 자속밀도

그림 5는 전기자 권선이 있는 중심부($r = 0.2265[m]$)에서 유기 기전력 파형이다. 최대 약 300.462[V]을 얻었다. 전기자 권선이 있는 곳에서 거리에 따른 유기 기전력 파형을 나타낸 것이다.



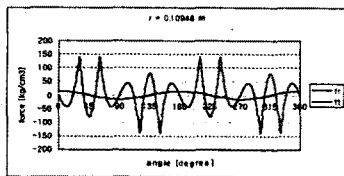
(a) EMF for angle



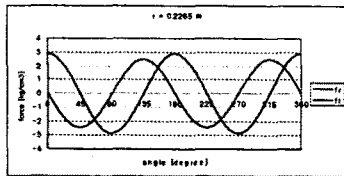
(b) EMF for radius

그림 5. 전기자권선에서의 유기 기전력 분포곡선

그림 6은 계자권선과 전기자 권선 부근에서의 전자력을 계산하였다. 여기서 f_r 은 r 방향의 힘이고, f_t 는 θ 방향의 힘을 나타내는 것이다. 계자권선($r=0.10948m$)에서는 f_r 은 최대값이 $140.41 [kg/cm^3]$ 이고, f_t 의 최대값은 $16.14 [kg/cm^3]$ 이다. 전기자권선($r= 0.2265 m$)에서는 f_r 은 $2.46 [kg/cm^3]$, f_t 는 $2.86 [kg/cm^3]$ 의 최대값이 나온다.



(a) $r=0.10948 [m]$



(b) $r=0.2265 [m]$

그림 6. 계자권선, 전기자권선에서의 전자력 분포곡선

3. 결 론

본 연구를 통하여 초전도 발전기의 특성해석을 고찰하여 보았다. 발전기의 설계모델은 정격 전압과 정격 용량으로 발전기의 치수를 결정하였으며, 공극 자속밀도 지배방정식을 유도하였다. 그리고, 발전기의 설계 치수를 변수로 한 등가회로 정수 및 특성식을 구하였다. 발전기의 기본 해석 모델과 사양을 기초로 자속 분포와 유기 기전력과 전자력 분포를 해석하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] M.Takahashi, M.Watanabe, N.Takahashi, M.Kitamura, N.Maki "Performance Evaluation of 50MVA Airgap Winding Stator for Superconducting Generator" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.4, no.2, pp264-271, June 1989.
- [2] K.Yamaguchi, N.Maki, R.Shibara, "Rotor Design of a 1000MW Superconducting Generator" IEEE Transaction Energy Conversion, vol.4, no.2, pp244-249, June 1989
- [3] H.Higuchi, H.Fukuda, ect, "Recent Process of Development of 70MW class superconducting Generators", IEEE Transactions on Applied Superconducting, vol.3, no.1, March 1993.
- [4] B.Bonder, H.Köfler, "3-Dimensional Magnetic Field Calculation for an Arrangement of S.C. Coils with an Outer Magnetic Core" IEEE Transaction Energy Conversion, vol.28, NO.2, pp1402-1405, March 1992.
- [5] P.G.Therond-o, Moreau-c.Kieny, "3D Electromagnetic Model of a Full Superconducting Generator" IEEE Transaction Energy Conversion, vol.28, NO.2, pp1398-1401 March 1992.
- [6] O.Moreau, P.G.Therond, C.Kieny "Magnetic Field Produced by a Thin Sheet Induction of a Superconducting Generator" IEEE Transaction Energy Conversion, vol.28, NO.2, pp1092-1095, March 1992.