

공심형 초전도 동기발전기의 설계변수에 대한 연구

An Approach to the Design Parameter of Air-Cored Superconducting Synchronous Generator

曹永植* · 洪正杓** · 李珠*** · 孫明煥[§] · 權永吉^{§§} · 柳康植^{§§§}

(Young-Sik Jo · Jung-Pyo Hong · Ju Lee · Myung-Hwan Sohn

Young-Kil Kwon · Kang-Sik Ryu)

Abstract - Air-cored superconducting synchronous generator(ASSG) is characterized by an air-cored machine with its rotor iron and stator iron teeth removed. For this reason, in the case of the shape optimum design of ASSG, other design variables different from an iron-cored machine should be considered, which will lead to substantial improvement on the performance. The major design variables that are considered by using Three-Dimensional Finite Element Method(3D FEM) in this paper are : 1) field coil width, 2) axial length of magnetic shield, and 3) armature winding method. End-ring of armature winding is considered in the calculation of EMF. When it comes to field coil width, as field coil width enlarges, its effective field increases but the maximum field on the superconductor decreases. This determines the critical current density. This study presents an effective field coil width, axial length of magnetic shield, and armature winding method, and also the analysis is verified by the experimental results

Key Words : Air-cored superconducting synchronous generator(ASSG), Design variables,

1. 서 론

일반적으로 전기기기는 비 투자율이 높은 철심을 사용하여 자로 형성 및 자장 집중의 효과를 얻고 있다. 그러나 철심은 일정자장 이상에서는 자기적으로 포화되므로 고자장화를 통한 출력 및 성능 향상에 걸림돌이 되고 있으며, 철손 야기로 에너지 효율을 저하시키고, 전기기기의 부피, 무게, 소음 감소 등에 장애요인으로 작용하고 있다. 더 나아가, 전력생산 증가에 따른 CO₂ 배출량증가, 발전소 입지확보 문제, 전력계통의 안정성저하 문제 등의 원인 요소가 된다. 최근 이러한 상기의 문제를 극복할 기술로 공심형 초전도 동기 발전기(ASSG)의 개발을 진행중인데, ASSG는 다음과 같은 주요한 성능의 향상을 가져올 것으로 기대되고 있다 [1].

- 적은 연료비용과 전체적인 경제적 이익으로 약 1%의 효율향상
- 동급대비 부피와 중량감소
- 철심형 동기 발전기에 비해 월등히 높은 전압과 큰 부피의 제작 가능

- 정상상태와 과도상태 시스템의 안정도 향상
- 동급과 비교하여 유지보수와 신뢰도 측면에서 적은 생명주기 비용

세계적으로 초전도 발전기에 대한 연구가 상용화를 목표로 진행되고 있는데, 미국에서는 LTS(Low Temperature Superconductor)를 이용한 300MW급 초전도 발전기 개발을 위한 연구이후 HTS(High Temperature Superconducting)를 이용한 상용화급 초전도 발전기의 개발을 계획 중이며, 가까운 일본에서는 70MW급의 초전도 동기발전기를 개발해서 부하실험 및 장기 실정실험에 성공하였으며, 현재 실계통 투입용의 초전도 발전기 개발을 목표로 연구개발 중이다. 국내에서는 1998년 한국전기연구소에서 LTS를 이용한 30kVA급 공심형 초전도 동기 발전기를 성공적으로 개발하였으며, 최근에는 HTS를 이용한 초전도 회전기기를 개발 중에 있다 [2]~[4].

초전도 발전기가 이러한 많은 연구에도 불구하고 아직까지 상용화에 대한 주목할 만한 발표가 없는 것은 냉매로 사용하는 헬륨의 가격이 매우 비싸고, 이를 사용한 냉각시스템과 초전도체에 대한 연구가 확립되지 못한 이유로 보여진다. 이런 이유로 최근 외국에서는 액체질소의 온도에서 초전도화가 가능한 HTS를 이용하는 초전도발전기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [5].

ASSG는 LTS나 HTS를 사용함으로써 두 가지의 구조적인 특징을 나타낸다. 하나는 철심에서의 포화를 방지하기 위해서 공심코어를 사용한다는 것이고, 다른 하나는 LTS와 HTS에서 요구되는 극저온의 온도를 만들고 유지시키기 위한 냉각시스템을 가진다는 것이다 [6]. 이런 이유로 공심형 초전도 동기발전기는 자기적으로 매우 긴 공극 길이를 가지게 되

* 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 博士課程.
 ** 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 助教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 漢陽大 電氣電子工學部 助教授 · 工博
 § 正 會 員 : 韓國電氣研究院 초전도응용그룹, 선임연구원
 §§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 초전도응용그룹, 그룹장
 §§§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 전략기술연구단, 단장
 接受日字 : 2000年 5月 15日
 最終完了 : 2001年 2月 28日

고 자속밀도가 축 방향으로 저감하는 3차원적인 자계분포 특성을 나타낸다.

상기와 같은 이유로 공심형 초전도 동기발전기의 성능의 향상을 위한 최적형상설계를 위해서는 기존의 발전기와는 다른 설계변수들이 고려되어야만 한다. 따라서 본 논문에서는 계자의 폭, 자기철드의 축 방향 길이, 그리고 전기자 권선법을 주요한 설계변수로 다루어 보았다.

계자의 폭이 넓어질수록 공극 자속밀도는 커지고 초전도체에 발생하는 자속밀도의 최대치는 적어지게 된다. 초전도체에 발생하는 자속밀도의 최대치는 초전도체의 임계전류를 결정하므로 ASSG에서는 매우 중요한 설계요소가 된다 [7]. 초전도 발전기의 자기철드는 자로의 역할을 하는데, 만약 자기철드의 길이가 최적화 된다면 초전도발전기의 부피와 중량을 감소시킬 수 있다. 전기자권선법의 경우, 일반적인 발전기에서는 유기기전력의 왜형을 줄이기 위해서 대부분 단절권을 사용하고 있지만 공심코어인 초전도 발전기는 기존의 발전기와는 달리 전기자에서 매우 정현적인 자속분포를 가지므로 전절권을 채택하면 더 큰 유기기전력을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 초전도발전기의 설계변수에 대해서 3차원 유한요소법(Three Dimensional Finite Element Method)을 이용하여 정자계 해석을 하였다. 계자의 폭은 제작된 초전도 발전기를 기준으로 기계적으로 가능한 넓이를 한계로 하여 7가지 모델, 자기철드의 길이는 자기철드의 길이가 길어져도 유기기전력의 크기에 거의 영향이 없는 길이까지 인 5가지 모델을 선정하여 해석하였다. 전기자 권선법은 모든 해석모델에 대해서 각각 전절권과 단절권을 비교하였다. 해석결과는 제작한 30kVA 초전도 동기 발전기의 실험결과와 비교/검증하였다.

2. 해석모델과 3D FEM 이론

2.1 해석 모델

그림 1은 한국전기연구소에서 설계되고 제작한 30kVA ASSG의 전체사진으로 왼쪽부터 구동장치, 초전도발전기, 냉각계통 및 헬륨급배장치이다. 그림 2는 30kVA 초전도 동기 발전기의 단면으로 저온덤퍼의 외면은 복사열을 차단하기 위한 초전도 절연이 되어있다. 표 1은 ASSG의 주요사양을 나타낸다. 여기서 계자는 LTS에 속하는 NbTi를 사용해서 레이스트랙형으로 권선하여 제작하였으며, 계자의 폭은 54mm이고, 자기철드의 길이는 192mm이다.

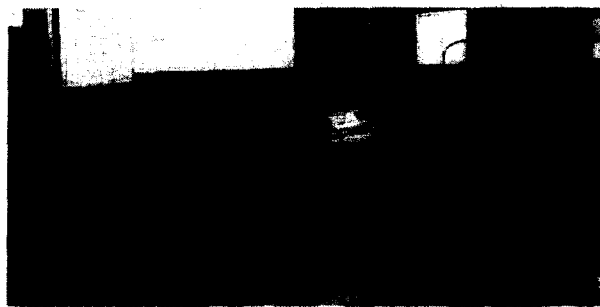


그림 1 30kVA 초전도 동기 발전기
Fig. 1 30kVA superconducting synchronous generator

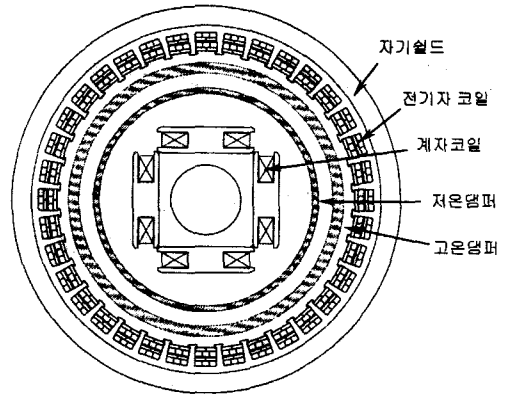


그림 2 30kVA 초전도 동기 발전기의 단면
Fig. 2 Cross section of 30kVA ASSG

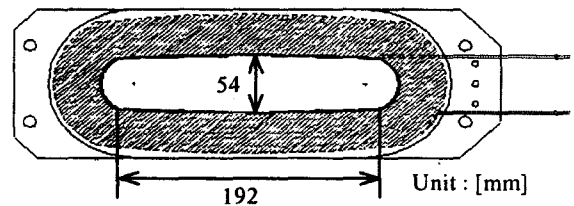


그림 3 계자코일
Fig. 3 Field coil

표 1 ASSG의 주요사양
Table 1 Specifications of ASSG

정격출력	30kVA
정격속도	1800 rpm
극수	4
슬롯당도체수	10
슬롯수	36
계자코일	NbTi
임계전류	580 A(5T,4.2K)
계자코일턴수	532
입력전류	200 A

표 2 해석모델의 분류
Table 2 Classifications of analysis model Unit : (mm)

자기철드의 축방향 길이		계자코일의 폭	
S1	192	W1	44
S2	240	W2	46
S3	280	W3	50
S4	320	W4	54
S5	520	W5	56
		W6	60
		W7	64

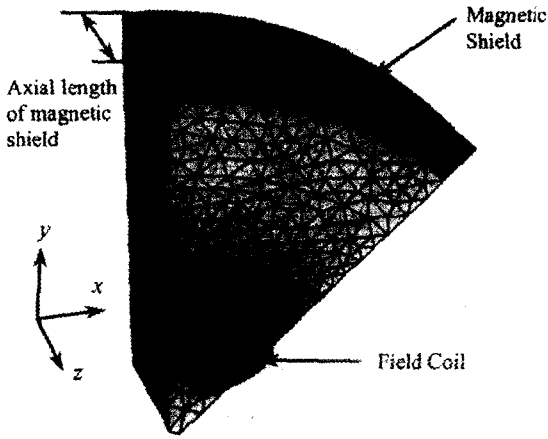


그림 4 3D FEM 해석모델
Fig. 4 Analysis model of 3D FEM

그림 3은 30kVA ASSG의 주자속을 만드는 계자코일을 도식화 한 것이고, 전기자 권선법은 초기 설계에 준하여 제작 시에 7/9 단절권을 사용하였다.

표 2는 해석모델을 나타낸다. 자기철드의 길이는 계자의 폭을 S1으로 고정하고 변화시켰으며, 계자의 폭은 자기철드의 길이를 W4로 고정하고 변화시켰다.

그림 4는 무부하 3D FEM 정자계 해석모델을 나타낸다. 해석모델은 대칭성을 고려해 전체모델의 1/16으로 하였다. ASSG의 구조는 저온댐퍼, 고온댐퍼, 헬륨조, 계자코어, 전기자코어, 그리고 자기철드 등인데 자기철드를 제외하고는 비자성체이다. 따라서 해석모델은 매우 단순해진다.

2.1 3D FEM 정식화

3차원 정자계 문제를 해석하기 위해 스칼라포텐셜(Ω)을 계변수로 사용하여 자계의 세기를 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\vec{H} = \vec{T} - \nabla\Omega \tag{1}$$

여기에서 \vec{T} 는 전류밀도 \vec{j} 를 표현하는 임의의 함수로 식 (2)로 표현된다.

$$\nabla \times \vec{T} = \vec{j} \tag{2}$$

따라서 맥스웰방정식으로부터 Ω 와 \vec{T} 를 사용하여 지배방정식을 유도하면 식 (3)으로 된다.

$$\nabla \cdot [\mu(\vec{T} - \nabla\Omega)] = 0 \tag{3}$$

식 (3)에 Galerkin법을 적용하여 전체 해석영역에 대하여 계방정식을 구하면 식 (4)와 같다.

$$\mu \cdot [S][\Omega] - [F] = 0 \tag{4}$$

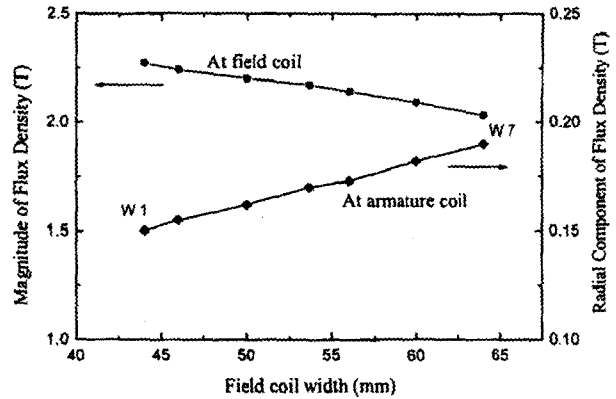


그림 5. 계자권선의 최대자속밀도와 전기자에서의 자속밀도 방사성분
Fig. 5 Maximum flux density at field coil and radial component of flux density at armature

여기서 $[S]$ 는 시스템 행렬, $[\Omega]$ 는 자기스칼라 포텐셜 행렬, $[F]$ 는 구동행렬이다.

3. 해석결과 및 검토

3.1 안정도와 성능

레이스 트랙형으로 권선된 계자에서는 코일에 전류를 인가했을 때 자속밀도의 최대치는 계자의 엔드링에서 발행하는데 이 값이 계자코일에 사용된 초전도체의 임계전류를 결정하기 때문에 발전기의 안정도와 성능에 있어 매우 중요한 요소가 된다. 따라서 계자의 형상은 공극에서의 자속밀도는 증가시키고 동시에 계자권선에 발생하는 자속밀도의 최대치는 감소시키는 형상으로 최적화 되어야한다.

그림 5는 계자를 여자했을 때 계자권선에 발생하는 자속밀도의 최대치와 전기자권선부에 발생하는 자속밀도 방사성분의 크기(B_r)를 나타낸다. 해석모델 W7은 W1과 비교하여 계자권선에 발생하는 자속밀도의 최대치는 11%감소하고, 전기자권선부에 발생하는 B_r 은 27%증가한다. 따라서 계자의 폭이 클수록 발전기의 안정도 증대와 성능향상에 유리할 것으로 보여진다. 여기서 자기철드의 길이변화는 계자권선에 발생하는 자속밀도의 최대치에 인자할 만한 영향이 없었다.

3.2 유기기전력 특성

3D FEM 정자계 해석결과를 이용하여 전기자권선에 채교하는 자속을 구하여 각 모델의 상전압을 계산하였다. 전기자 권선법이 달라지면 각 상의 전기자코일의 배치가 바뀌게 되어서 각 상당 채교하는 자속량이 달라지게 되므로 이를 고려하여 상당 유기기전력의 파형을 구하였다. 상전압 계산에서 전기자 권선의 엔드링의 형상은 코일변 간의 길이를 지름으로 하는 반원의 형태로 권선 되어있다고 가정하여 엔드링에 채교되는 자속을 고려하여 엔드링에 유기되는 기전력을 포함시켰다. 계산에 사용한 전기자 권선의 사양은 Y결선, 7/9단절권, 매극매상당 슬롯수는 3, 그리고 슬롯당 도체수는 12이다.

그림 6은 자기철드의 길이 변화에 따른 유기기전력의 특성

을 나타낸다. 유기기전력의 최대치가 해석모델 S1에서 S4까지 조금씩 증가하지만 S5는 자기철드의 길이는 많이 증가했음에도 불구하고 거의 변화없다. 따라서 S4가 발전기의 부피와 중량을 고려했을 때 가장 효과적인 자기철드의 길이가 될 수 있을 것으로 사료된다.

그림 7은 계자의 폭 변화에 따른 유기기전력의 특성을 나타낸다. 해석모델 W1에서 W7로 계자의 폭이 증가할수록 유기기전력의 크기도 선형적으로 비례하여 증가한다.

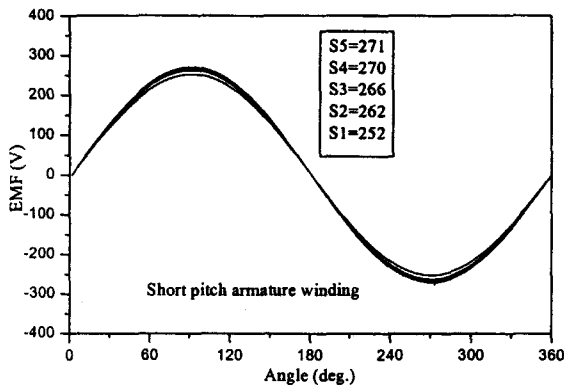


그림 6. 자기철드의 축 방향 길이변화에 따른 EMF
Fig. 6 EMF according to the variation of axial length of magnetic shield

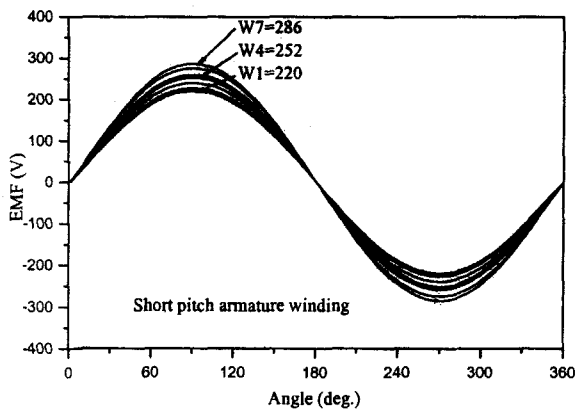


그림 7 계자의 폭 변화에 따른 EMF
Fig. 7 EMF according to the variation of field coil width

표 3 유기기전력의 왜형률

Table 3 Distortion factors of EMF		Unit(%)	
	단절권	전절권	
S1	0.30	0.52	W1 0.47 0.94
S2	0.31	0.46	W2 0.48 0.86
S3	0.31	0.46	W3 0.36 0.58
S4	0.33	0.47	W4 0.30 0.52
S5	0.31	0.46	W5 0.30 0.38
			W6 0.27 0.34
			W7 0.31 0.47

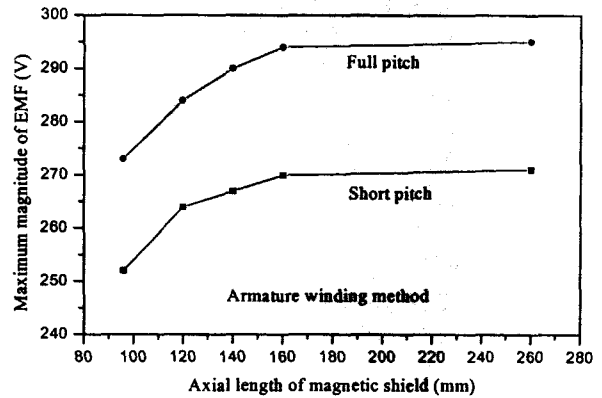


그림 8 자기철드의 길이 변화에 따른 EMF의 최대치
Fig. 8 Maximum EMF according to the variation of axial length of magnetic shield

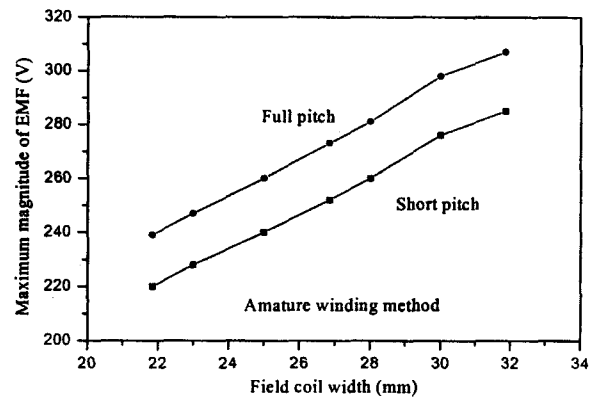


그림 9 계자의 폭 변화에 따른 EMF의 최대치
Fig. 9 Maximum EMF of according to variation of the field coil width

표 3은 모든 해석모델의 유기기전력의 왜형률을 나타낸다. 전기자 권선법을 전절권으로 하여도 모두 1%미만으로 해석모델의 유기기전력은 매우 정현적임을 알 수 있다.

그림 8과 9는 모든 해석모델의 유기기전력의 최대값을 도식화하여 나타낸 것이다. 자기철드의 축 방향 길이는 계자코일의 앤드링을 포함하는 길이가 적당하며, 계자의 폭은 가능한 넓은 수록 유기기전력이 커짐을 확인하였다. 각 그림에서 전기자 권선법을 비교하였는데 전절권으로 한 것이 단절권과 비교하여 그림 8에서는 9%, 그림 9에서는 7~9% 증가하였다.

3.3 해석결과 및 실험결과 검토

제작된 30kVA 초전도 동기 발전기의 계자코일의 폭은 54mm(W4)이고 자기철드의 길이는 192mm(S1)이다. 전기자 권선은 Y결선, 이층권, 7/9단절권, 그리고 매극매상당 슬롯수는 3이고 슬롯당 도체수는 10으로 제작되었다.

초전도 동기발전기의 실험시스템은 운전 중에 내부의 상태를 감시하기 위한 감시장치와 인버터, 변압기, 여자기, 그리고 온도 및 전압측정장치로 구성되어있다.

계자의 권선실험은 4.2K, 1800rpm에서 2A/sec로 전류를

상승시키면서 진행하였는데 277A에서 켄치가 발생하였다. 이 값은 설계상의 정격전류치인 200A 보다 큰 값이다.

정격속도 1800rpm, 개방회로시험을 통해 전기자 선간전압을 측정했으며, 단락시험을 통해 전기자 상전류를 측정하였다. 정격 출력전압 220V는 계자 입력전류가 180A일 때 발생하였다.

그림 10은 선간전압에 대한 실험결과와 해석결과를 나타낸다. 유기기전력의 최대치는 실험결과 312V, 해석결과 343V였다. 표 4는 유기기전력의 해석결과와 실험결과에 대한 왜형률을 나타내는데 모두 1% 미만으로 매우 정현적이었다.

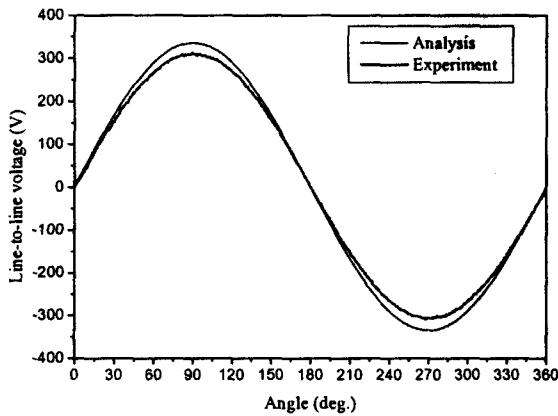


그림 10 해석결과와 실험결과 비교

Fig. 10 Comparison analysis with experimental results

표 4 선간전압의 왜형률

Table 4 Distortion factor of line-to-line voltage

실험결과	0.64(u-v), 0.74(u-w), 0.08(v-w)
해석결과	0.53

5. 결 론

본 논문에서는 공심형 초전도 동기 발전기의 주요한 설계 변수로 계자코일의 폭, 자기철드의 축 방향 길이, 그리고 전기자 권선법을 다루었다. 그 결과는 이상에서 언급했듯이 ASSG의 성능향상에 매우 큰 영향이 있음을 확인하였다. 특히 계자코일의 폭이 가장 큰 해석모델 W7은 W1과 비교하여 계자권선에 발생하는 자속밀도의 최대치는 11% 감소하고, 전기자권선부에 발생하는 B_r 은 27% 증가하여 ASSG의 안정도 증대와 성능향상에 중요한 설계변수가 됨을 확인하였으며, 자기철드의 축 방향 길이는 계자의 엔드링을 포함하는 길이가 적당하고 전기자 권선법은 일반적인 동기발전기와는 다르게 유기기전력이 매우 정현적이므로 ASSG는 전철권으로 하는 것이 출력 증대에 유리하다는 것을 확인하였다. 이상의 해석 결과를 실험결과와 비교, 검토하여 매우 비슷한 결과임을 확인하였다.

공심형 초전도 동기발전기는 환경오염 문제를 극복하고 에너지 확보를 위한 일환으로 선진국에서는 매우 큰 연구개발 비용과 인적자원이 투자되어 집중 연구되고 있는 추세에서

설계 엔지니어링 분야에 포함되는 설계변수에 대한 연구는 향후 국가적 연구가 필요한 국내 초전도 발전기의 상용화 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 지원 스타프로젝트 과제인 "차세대 고효율 발전플랜트 기술 개발"로 수행한 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] R.D. Blaugher, "Low-calorie, high-energy generators and motors", IEEE Spectrum, July, 1997, pp. 36-42.
- [2] R.D. Nathenson and M.R. Patel, "Designing an Airgap Armature of a Large Superconducting Generator for Electromagnetic and Thermal Loads", IEEE Trans. Power Appa. and Sys., Vol. PAS-102, No. 8, pp. 2629-2635, 1983.
- [3] Rodenbush A.J., Young S.J., "Performance of High Temperature Superconducting Coils for Implementation into Megawatt Class Generators", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 9 No. 2 pp. 1233-1236, 1999
- [4] Shimada T., et al., "Recent Progress on 70MW Class Superconducting Generators", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 9 No. 2 pp. 1189-1192, 1999
- [5] B.B. Gamble, et al., "Prospects for HTS Applications", IEEE Trans. Magn., Vol. 32, No. 4, pp. 2714-2719, 1996.
- [6] P.Tixador and H. Daffix, "Conceptual Design of an Electrical Machine with Both Low and High T_c Superconductors", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 7 No. 4, pp. 3858-3865, 1997.
- [7] K. Ikizawa, et al., "Instability of Superconducting Racetrack Magnets", IEEE Trans. Magn., Vol. 27, No. 2, pp. 2128-2131, 1991.

저 자 소 개



조 영 식 (曹 永 植)

1970년 8월 20일 생. 1997년 창원대 전기공학과 졸업. 1999년 전기전자제어 대학원 졸업(석사). 1997년~현재 한국전기연구원 위촉연구원. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 055-262-5966

E-mail : ysj088@orgio.net



손 명 환 (孫 明 煥)

1963년 4월 21일 생. 1986년 부산대 물리학과 졸업. 1988년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 물리학과(공박). 현재 한국전기연구원 초전도응용그룹 선임연구원



홍 정 표 (洪 正 杓)

1959년 4월 17일 생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원.

1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수



권 영 길 (權 永 吉)

1959년 7월 28일 생, 1982년 부산대 기계공학과 졸업, 1984년 동 대학원 졸업(석사), 1990년 동 대학원 기계공학과 졸업(공박), 1990년~1991년 한국기계연구원선임연구원, 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

그룹장



이 주 (李 珠)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공박). 1997년 한국철

도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 공대 전자전기공학부 조교수.

Tel.: 02-2290-0342.

E-mail : julee@email.hanyang.ac.kr



류 강 식 (柳 康 植)

1956년 8월 20일 생, 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공박), 현재 한국전기연구원 전략기술연구단 단장