

## 설계변수 변화에 따른 초전도 동기 발전기의 유기기전력 특성

조영식, 홍정표, 이주\*, 권영길\*\*, 류강식\*\*  
 창원대학교 전기공학과, 한양대학교 전자전기공학부\*, 한국전기연구소 초전도 응용연구사업팀\*\*

### E.M.F Characteristic of Superconducting Synchronous Generator according to Design Parameter

Young-Sik Jo, Jung-Pyo Hong, Ju Lee\*, Young-Kil Kwon\*\*, Kang-Sik Ryu\*\*  
 Chang-won National University, Hanyang University\*,  
 Korea Electrotechology Research Institute\*\*

gkstkso@netian.com

**Abstract** - The major design parameters that are considered in this paper are: 1) EMF according to width of field coil, 2) EMF according to magnetic shield length. Because of superconducting generator (SG) is actually an air cored machine with its rotor iron and stator iron teeth having been removed. In this case, the design of the SG must be based on the 3D analysis of the magnetic field. This study presents an effective armature winding type with 3D FEM(Finite Element Method), and compares analyzed and measured results.

### 1. 서론

초전도 발전기(Superconducting Generator)의 경우 전기저항이 영인 초전도 상태를 이용하기 때문에 효율이 좋고, 기기의 소형·경량화가 가능하므로 제작비용이 절감되고, 에너지 밀도를 높일 수 있기 때문에 대용량화가 가능하고, 고압화가 가능하므로 성능의 향상이 기대된다. 또한 이에 대한 연구는 기타의 초전도 응용과도 결합이 용이하므로 파급효과도 클 것으로 기대된다 [1~2].

반면에 초전도를 유지하기 위한 냉각 시스템과 단열구조가 필수적이므로 구조적으로 복잡해지고 공극이 매우 커지게 되지만, 모든 구조물이 자기철드를 제외하고는 비자성체이기 때문에 자체 해석상으로는 매우 단순한 모델이 된다. 하지만 공극길이가 매우 길어지고 전기자와 계자가 에어코어이기 때문에 3차원적인 자체분포특성을 나타낸다 [3].

본 연구는 초전도 발전기의 설계에서 간과하기 쉬운 설계변수인 자기철드의 길이변화와 계자의 폭 변화에 따른 유기기전력 특성을 3D FEM을 이용하여 분석하였으며, 이 결과로 효율적인

자기철드의 길이, 계자의 폭, 그리고 전기자 권선법을 제안하는데 목적이 있으며, 제작된 30kVA급 초전도 동기 발전기의 실험결과와 3D FEM 해석결과를 비교·검토하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 초전도 동기 발전기의 구조

그림 1은 초전도 동기 발전기의 구조로서 기본적으로 기존의 발전기와 같으나 계자코일을 기존의 구리도체 대신에 초전도 도체를 사용하기 때문에 발전기의 구조가 매우 다르게 된다.

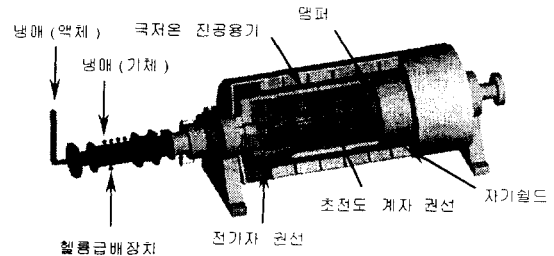


Fig. 1 Structure of superconducting generator

계자가 초전도 상태를 유지하기 위해서는 임계온도 이하의 극저온을 유지하여야 하므로 냉매로 액체헬륨을 이용하는데, 헬륨급배장치를 이용해서 액체헬륨을 공급하고 기화된 기체헬륨을 다시 액화기로 보내는 구조를 가진다. 외부의 온도를 상온 300K로 본다면 계자와 외부와의 온도차가 매우 심하므로 자기담퍼와 온도 담퍼사이에 진공을 하여 외부로부터의 열 침입을 차단한다. 이러한 독특한 구조인 회전자로 인해 공극길이가 매우 크게된다. 또한 높은 자속밀도로 인한 포화를 방지하기 위해 회전자의 모든 구조와 전기자 권선의 지지구조는 비자성체를 사용한다 [4].

#### 2.2 해석모델

자기철드의 길이와 계자의 폭을 설계변수로 해서 다음의 표 1과 같이 해석모델을 선정하였으며, 계자 권선은 Racetrack 형태이고 축방향 길이는 320[mm]이다. S1~S5에서 계자의 폭은 W4로 고정하였으며, W1~W7에서 자기철드의 길이를 S1으로 고정하였다.

해석모델은 대칭성을 고려해서 그림 2와 같이 전체모델의 1/8만을 해석영역으로 선정하여 무부하 정상상태 해석을 하였다. 계변수는 스칼라 포텐셜을 사용하였으며, 해석모델의 경계조건은 오른쪽 빗면과 앞면에 고정조건을 부여하고 나머지는 자연 경계조건을 적용하였다.

Table 1 Classification of analysis model  
Unit:[mm]

분류	자기철드의 길이	분류	계자의 폭
S1	192	W1	43.7
S2	240	W2	46
S3	280	W3	50
S4	320	W4	53.7
S5	520	W5	56
		W6	60
		W7	63.7

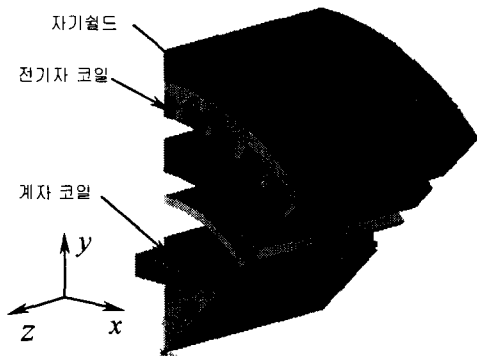


Fig. 2 Analysis model

3차원 유한요소해석을 하기 위한 지배방정식은 식(1)과 같다 [5].

$$\mu \nabla^2 \Omega = 0 \quad (1)$$

여기서  $\mu$  : 투자율

$\Omega$  : 자기 스칼라 포텐셜

여기에 Galerkin method를 이용하여 정리하면 식(2)와 같은 대수 방정식의 형태로 요소 방정식을 구성할 수 있다 [6].

$$[S][\Omega] - [F] = 0 \quad (2)$$

### 3. 해석결과

#### 3.1 자속밀도 분포특성

초전도 발전기는 일반적인 발전기와 달리 공극이 매우 크고 전기자 코어와 계자 코어가 비자성체이므로 3차원의 자계분포를 가진다. 따라서 유기기전력에 직접 기여하는 자속밀도의 반경방향 성분( $B_n$ )도 축 방향으로 크게 저감하고, 계자의 폭에 비례해서 증가하는 3차원의 분포특성을 가진다.

그림 3은 해석모델 S1의 전기자의 중심반경에서 축 방향으로의  $B_n$ 의 분포이고, 다른 모든 해석모델에서도 거의 같은  $B_n$ 의 분포특성을 나타낸다.

그림 4는 W1~W7의 해석결과에서 축 중심단면에서 공극자속밀도  $B_n$ 의 분포를 그린 것으로, 이 결과를 통해 계자의 폭이 커질수록  $B_n$ 이 증가하고 매우 정현적임을 알 수 있다.

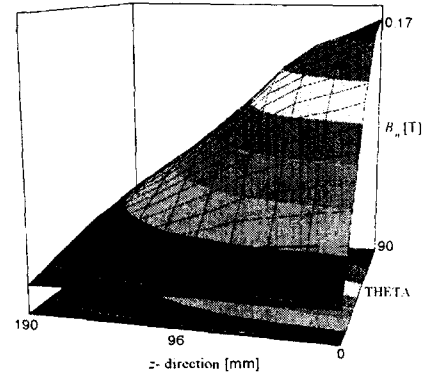


Fig. 3 Distribution of  $B_n$  according to z-direction

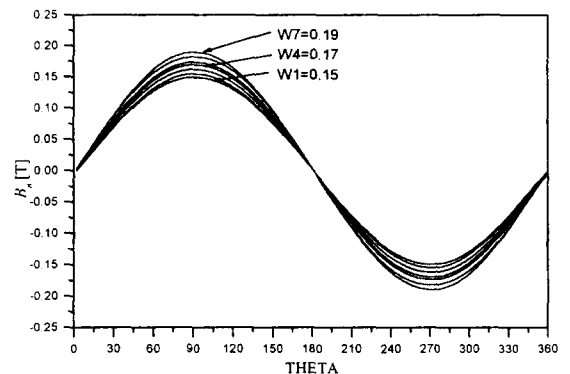


Fig. 4 Distribution of  $B_n$  according to width of field coil

#### 3.2 유기기전력 특성

다음의 결과는 상전압에 대한 것으로 전기자 권선은 매극 매상당 슬롯수 3, Y결선, 2층권이고 7/9단절권이며, 엔드링을 고려하여 계산하였다.

그림 5는 자기철드의 길이 변화에 따른 유기기전력의 특성을 나타내는데 계자의 엔드링의 길이와 같은 S4까지는 선형적으로 증가하다가 S5

는 S4에 비해 62.5[%]나 자기철드가 길지만 유기기전력은 거의 차이가 없다. 이를 통해 효율적인 자기철드의 길이는 계자의 엔드링까지임을 알 수 있다.

그림 6은 계자의 폭 변화에 따른 유기기전력 특성으로 초전도 발전기가 일반적인 발전기와는 다르게 계자의 폭이 유기기전력의 크기에 큰 영향이 있음을 나타낸다. W1에서 W7은 단지 계자의 폭이 5(mm) 증가하는 것과 비례해서 유기기전력이 선형적으로 커지는데, W1과 W4의 경우 약 15[%], W4와 W7의 경우는 약 14[%]로 매우 큰 폭으로 커지는 비례특성을 가지고, 또한 그림 4에서 도식화되는 것같이 매우 정현적인임을 알 수 있다.

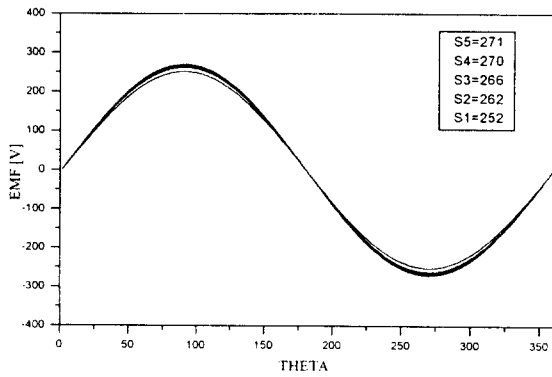


Fig. 5 EMF according to magnetic shield length

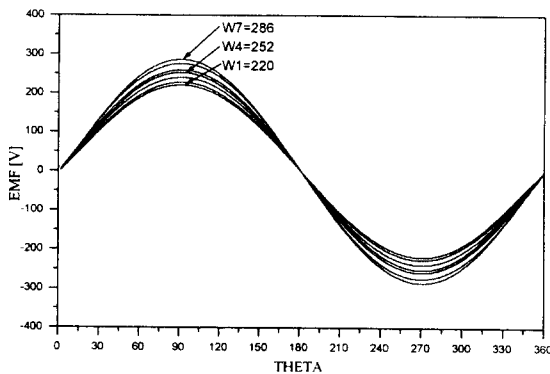


Fig. 6 EMF according to width of field coil

다음의 결과는 전기자가 전철권일 경우의 유기기전력 분포특성과 왜형율이다.

그림 7은 자기철드의 길이의 변화에 따른 유기기전력의 특성으로 전철권으로 권선했을 때의 모든 해석대상에서 약 9[%]의 증가하고, 그림 9는 계자의 폭 변화에 따른 유기기전력 특성으로 단철권보다 약 7~9[%]증가한다.

또한 표 2는 EMF의 왜형율로 모든 해석모델에서 1[%]로 미만이므로 매우 정현적이다. 이것은 공극길이가 매우 커서 자속밀도가 정현적으로 분포하고, 전기자 코어가 비자성체로 슬롯 고조파가 전혀 없기 때문이다.

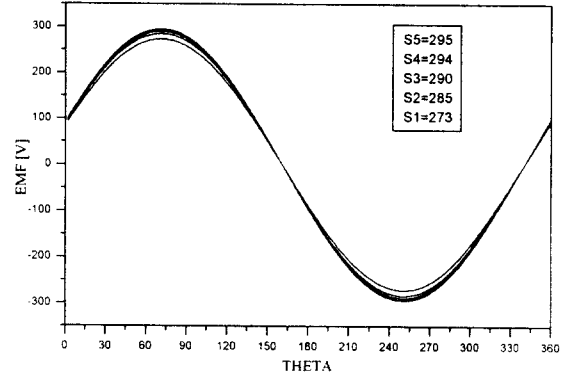


Fig. 7 EMF according to magnetic shield length

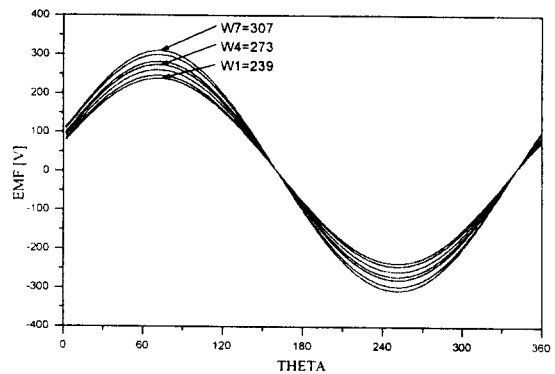


Fig. 8 EMF according to width of field coil

Table 2 Distortion factor of EMF

Unit : [%]

분류	단철권	전철권	분류	단철권	전철권
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

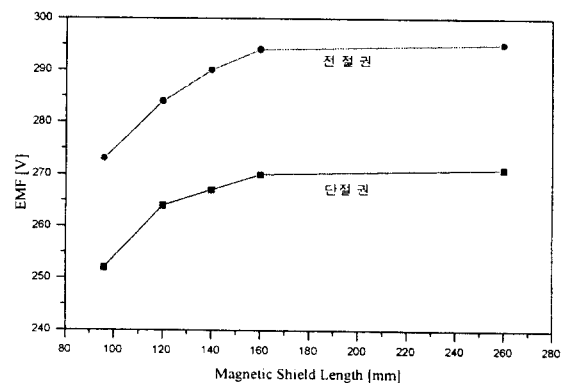


Fig. 9 EMF according to magnetic shield length

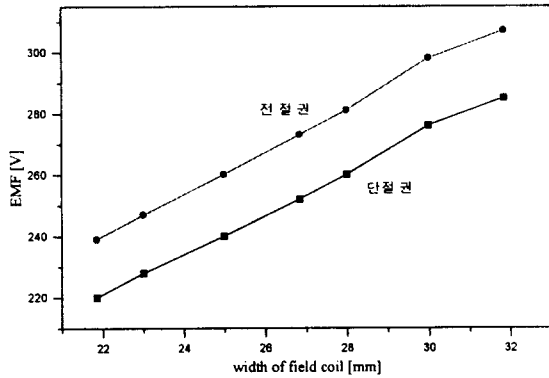


Fig. 10 EMF according to width of field coil

그림 9와 10은 모든 해석모델에서 유기기전력의 최대값을 도식화한 것으로 자기설드의 길이는 계자의 엔드링까지의 길이가 적당하며, 계자의 폭과 유기기전력은 비례하므로 가능한 넓은 것이 효율적임을 알 수 있다.

### 3.3 해석결과와 실험결과 비교

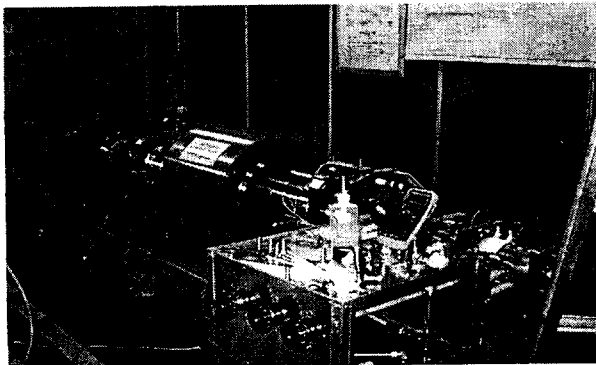


Fig. 11 Superconducting synchronous generator

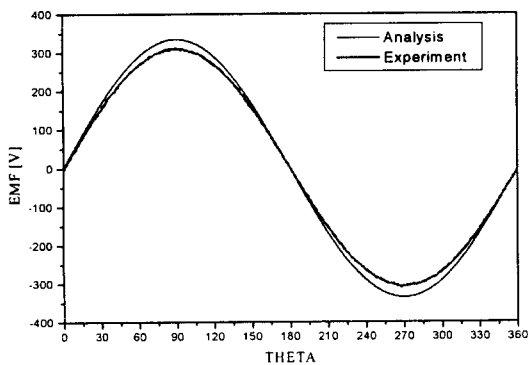


Fig. 12 Results of analysis and experimental

그림 11은 제작된 초전도 동기 발전기이고, 그림 12는 선간전압에 대한 해석결과와 실험결

과로 최대치가 해석결과는 343[V]이고, 실험결과는 312[V]로 실험결과를 기준으로 7.1[%]로 해석결과가 크다. 이러한 해석결과와 실험결과와의 차이는 극저온 진공용기의 정확한 자성특성을 고려할 수가 없었고, 또한 제작과정에서 약간 커진 공극길이를 전기자의 엔드링 길이를 정확히 고려할 수 없었기 때문으로 판단된다.

표 3은 EMF의 왜형율에 대한 실험결과와 해석결과이다. 모두가 1[%] 미만으로 매우 정현적이다.

Table 3 Distortion factor of EMF

Unit : [%]

실험결과	0.64(u-v), 0.74(u-w), 0.80(v-w)
해석결과	0.53

## 4. 결론

초전도 발전기와 같은 독특한 구조에서는 공극자속밀도의 분포가 축 방향으로 크게 저감하고 계자의 폭에 비례하는 3차원의 자계분포를 가지며, 매우 정현적임을 알 수 있었다. 설계변수로서 계자의 폭은 클수록, 자기설드의 길이는 계자의 엔드링까지가 효율적임을 예상할 수 있었고, 제작된 초전도 동기 발전기의 선간전압에 대한 해석결과와 실험결과와의 최고치가 약 7[%] 차이로 매우 비슷하며, 왜형율이 1[%] 미만으로 매우 정현적이었다.

계자의 폭은 5[mm] 증가함에 따라 유기기전력의 최대치가 약 7[%] 증가함을 확인하였고, 공극자속밀도가 매우 정현적이고 슬롯고조파의 영향이 전혀 없으므로 전기자를 전절권으로 하는 것이 효율적임을 예상할 수 있었다.

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

## [참고 문헌]

- [1] 田中守也, "超傳導工學", 日本電氣學會, 1994
- [2] 市川正樹, "超電導發電機의設計法の一考察", 東京大學, 1997
- [3] A. Hughes etc al., "Analysis of Fields and Inductances in Air-cored and Iron-cored Synchronous Machines", PROC. IEE, Vol. 124, No. 2, 1977
- [4] Martin N. Wilson, "superconducting magnets", Oxford University Press, ch 3, 1983
- [5] S. J. SALON, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, 1995
- [6] J. N. Reddy, "An Introduction to the Finite Element method", 1984