

## 초전도발전기의 2차원 자계해석에 관한 연구

백승규, 권영길, 손명환, 류강식  
한국전기연구소

### A Study on 2D Analysis of Superconducting Generator

Seung-Kyu Baik, Young-Kil Kwon, Myoung-Hwan Son, Kang-Sik Ryu  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - Superconducting Generator has different structure and characteristics from conventional generators.

As a first step to designing a Superconducting Generator, this paper deals with 2D analysis models.

The first model is non-slotted one and the second is slotted type. So this paper suggests the differences in 2D magnetic field analysis between two machines.

2차원적으로 자계를 해석하였기 때문에 실제 측정하여 나타난 결과와는 상당한 차이를 보일 수 있을 것으로 예상되나 자계의 전체적인 분포를 이해하는데는 다소 도움이 되리라 생각된다.

#### 2.1 자계해석의 기본 개념

2차원적으로 자계를 해석하였으므로 원통좌표계의 z-축 성분은 존재하지 않는 것으로 생각하고 해석하고, 실제의 발전기는 유효한 축의 길이가 있으나 본 논문에서는 2차원적인 해석이므로 그 길이가 무한하다고 생각한다.

#### 1. 서 론

극저온하에서 저항이 영이 되는 초전도 현상을 이용하여 전기기기의 손실을 줄이고 효율을 향상시키려는 노력이 세계 각국에서 이루어지고 있다. 이런 초전도 응용기술의 대전력 시스템의 적용사례로 초전도발전기를 들 수 있다.

초전도발전기는 그 구조와 특성에서 기존의 상전도발전기와는 상당히 다른 형태를 띠고 있고, 아직 이를 설계하는 기술이 완전히 정립되지 않은 상태여서 여러 각도로 그 방법이 시도되어지고 있다.

본 논문에서는 이러한 초전도발전기를 2차원적으로 해석하고, 회전자가 슬롯이 있는 경우와 없는 경우를 서로 비교하여 설계의 준비단계로서 이용하고자 한다.

#### 2. 본 론

본 본문에서 다루고 있는 해석모델들은 30kva, 220V 출력의 발전기로서 슬롯이 없는 경우의 모델을 먼저 개념설계하고, 이와 같은 크기를 갖는 슬롯이 있는 모델을 생각하여 둘사이의 자계분포를 해석하였다.

#### 2.1.1 Laplace 방정식

2차원 자계이므로 벡터포텐셜  $\mathbf{A}$ 는 축방향 성분  $A_z$ 만 갖는다. 따라서  $A_z$  원통 극좌표에서 다음의 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \theta^2} = 0 \quad (1)$$

식(1)에 의하여 발전기 각 부분의 벡터포텐셜이 구해지면 다음식 (2)와 (3)에 의하여 법선방향과 접선방향의 자속밀도를 구할 수 있다.

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} \quad (2)$$

$$B_\theta = - \frac{\partial A_z}{\partial r} \quad (3)$$

#### 2.2 자계해석 결과

제자에 일정한 전류를 흘렸을 때, 발전기의 내부에서 생성되는 자계를 해석하도록 한다. 먼저 슬롯이 있는 구조와 없는 구조의 단면을 보이도록 하고 이를 구조에 따른 해석결과를 서로 비교하여 검토하여본다.

### 2.2.1 해석 발전기의 단면

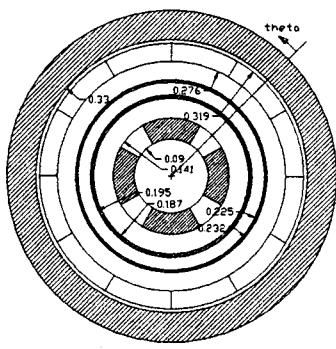


그림 1. 슬롯이 없는 모델의 단면

그림 1은 슬롯이 없이 해석한 발전기의 단면을 보이고 있다. 프로그램에 입력된 발전기의 치수는 그림에서와 같고, 계자 바깥쪽의 두 개의 굵은 원은 안쪽이 열차폐충에 해당하고 다른 것이 땜파에 해당한다. 이들은 주로 비자성 재료로 이루어지므로 그 투자율이 공극에서와 같다고 생각하였다.

가장 바깥의 빛금쳐진 부분은 자기차폐막으로 보통 자성재료로 이루어졌으나, 여기서는 이 재료내부에서의 해석은 피하고, 차폐막 안쪽에서의 자계만 해석하기로 한다.

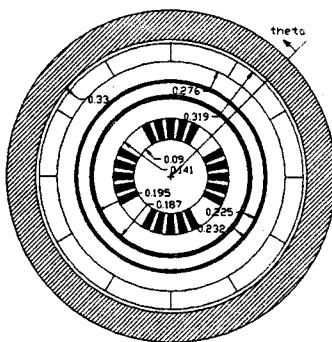


그림 2. 슬롯이 있는 모델의 단면

그림 2는 슬롯이 있는 경우의 단면을 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 각 부분의 치수는 앞의 그림 1에서 해석한 발전기와 같고, 회전자의 슬롯의 배치만이 차이가난다. 권선각을 슬롯이 없는 경우와 같이 잡았고 이 권선각안에 슬롯을 배치하였다.

본 논문에서는 일단 슬롯을 한 자극에 5개씩 잡았고 슬롯의 피치는  $13^\circ$ 이고 각 치의 극호는  $8^\circ$ 로

하여 해석하여 보았다.

### 2.2.2 해석결과의 고찰

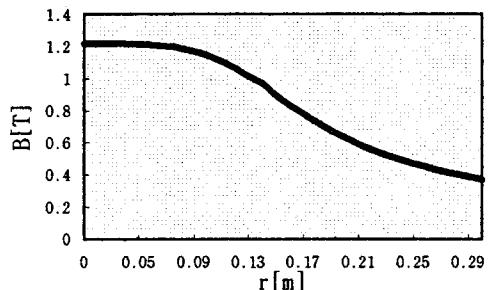


그림 3. 방사방향의 자속밀도( $\theta = 0^\circ$ )

그림 3에서는  $\theta$ 가  $0^\circ$  였을 때의 방사방향(radial)의 자속밀도 분포를 보여준다. 그림에서와 같이 계자의 가장 중심부에서 그 최대값을 갖고 중심에서 멀어질수록 그값이 점점 줄어듦을 볼 수 있다.

슬롯이 있는 경우나 없는 경우 모두 같은 전류용량을 갖도록 프로그램시 고려하였으므로 자속의 크기가 거의 일치함을 볼 수 있고, 전기각  $\theta$ 가  $180^\circ$  일 때와는 그 크기가 같고 방향이 반대인 결과를 얻는다.

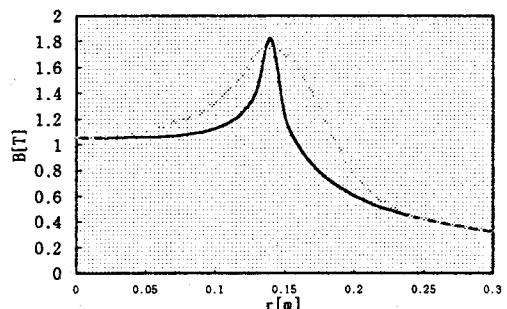


그림 4. 방사방향의 자속밀도( $\theta = 30^\circ$ )

그림 4는 전기각  $\theta$ 가  $30^\circ$  일 경우에 방사방향의 자속밀도 변화를 보여준다. 그림에서 가는 실선으로 표시된 것이 슬롯이 없는 경우를 current sheet 모델로 잡아 프로그램한 결과이고, 굵은 점선이 계자코일이 면적을 차지하고 있는 경우이다.

슬롯이 있는 경우나 없는 경우 모두 점선과 비슷한 결과를 얻을 수 있고, current sheet의 경우가 거리의 따라 그 변화가 큼을 볼 수 있다. 그리고 그 최대값은 계자권선 근처에서 나타난다.

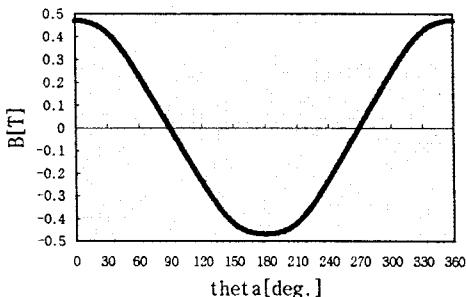


그림 5. theta방향의 자속밀도 변화( $r = 0.25\text{m}$ )

그림 5는  $r = 0.25\text{m}$  일 경우의  $\theta$  변화에 따른 자속밀도의 변화를 보여준다. 역시 슬롯의 유무에 관계없이 거의 비슷한 값을 가짐을 볼 수 있다.

이러한 원통좌표의 접선방향 성분은 코사인파의 형태를 하고 있음을 알 수 있고, 그림 3과 4를 참조하여도 어느정도 알 수 있겠지만  $r$ 이 커질수록 그 진폭은 작아지는 결과를 얻는다.

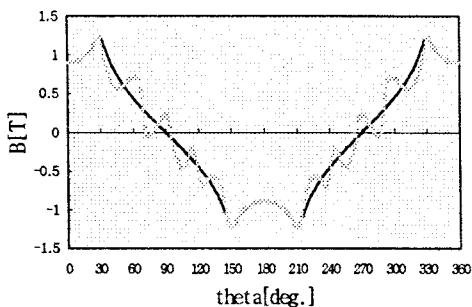


그림 6. theta방향의 자속밀도 변화( $r=0.15$ )

그림 6은 계자의 외경에 근접한 거리에서의  $\theta$  방향의 자속밀도 변화를 보여주고 있다. 슬롯이 있는 부분에서는 크기가 감소하다가 치(teeth)가 있는 부분에서는 증가하는 경향을 갖게된다.

### 3. 결 론

초전도발전기는 기존의 상전도발전기와는 달리 철심을 사용하지 않는 구조를 띠므로 자계해석을 하기는 상전도발전기보다 쉽다고 생각되나, 그 공극이 상전도발전기와는 차이가 엄청나게 나므로 2차원적으로 자계해석을 한 결과를 실제설계에 이용하려면 상당한 보정이 필요하리라 생각된다.

하지만 이를 토대로하여 3차원적인 해석이나 여기서는 미치지 못하였으나 발전기의 리액턴스와 같은 파라메타들을 구할 수도 있다면 기대이상의 결과가 될 수도 있으리라 생각된다.

### (참 고 문 현)

- [1] S.K. Safi, J.R. Bumby, "Analysis of magnetic fields in the slotted structure of a superconducting AC generator", IEE, Vol. 139, pp.411-422, 1992
- [2] G. Martinelli, A. Morini, Padova , "Study of Magnetic Field in Superconducting Alternators", Archiv fur Electrotechnik, 62, pp.141-151, 1980
- [3] William H.Hayt, JR., "Engineering Electromagnetics", McGraw-hill, 5th ed., pp.188-191.
- [4] T.Ishigohka, A.Ninomiya, T.Okada, T.Shintani, I.Muta, E.Mukai, "An Experimental Study on a Superconducting Generator with Dual Machine Shield System", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, No.2, pp.1481-1484, 1988