

## 3차원 유한요소 프로그램을 이용한 30 KVA 초전도발전기의 전자장 특성 해석

이중혁<sup>1</sup> 신태석<sup>1</sup> 이재건<sup>2</sup> 김용주<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 홍익대학교 전기공학과, <sup>2</sup> 한국 코아 (주) 기술연구소, <sup>3</sup> 한국 전기 연구소 발전기 진단연구팀

### Analysis of Electromagnetic Field Characteristics of 30 KVA Superconducting Generator Using 3D FEM Program

Jong-Hyuk Lee<sup>1</sup>, Pan-Seok Shin<sup>1</sup>, Jae-Kun Lee<sup>2</sup>, Do-Young Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Electrical Engineering, Hong-ik Univ., <sup>2</sup>HanKuk Core. Co., <sup>3</sup>Krorea Electrotechnology Res

**Abstract** - This paper has proposed a method to analyze a 30 KVA superconducting generator using 3-dimensional FEM program. 3 kinds of 3D formulation methods are employed such as scalar potential in core region, reduced scalar potential in air region and T- $\omega$  formulation in stator coil region. As results of the simulation, various parameters of the generator have been analyzed like air gap flux density, induced voltage, inductance, etc.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_{\text{tot}} = \mathbf{H}_{\text{red}} + \mathbf{H}_j \quad (3)$$

$\mathbf{H}_{\text{red}}$ 는 식 (1)에 의한 것이고  $\mathbf{H}_j$ 는 Biot Savart의 법칙에 의해서 계산된 것이다.

Vector potential formulation은 자속밀도  $\mathbf{B}$ 를 Vector potential  $\mathbf{A}$ 로부터 계산할 수 있는 Maxwell 방정식(식 3 과 식 4)을 이용하는 것이다.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{v} (\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) = \mathbf{J} \quad (5)$$

## 1. 서 론

본 논문은 30KVA 초전도 발전기의 전자장 해석을 유한요소법(FEM) 3차원 프로그램인 FLUX3D를 이용함으로써 높은 자장에 의한 회전자 내부의 자계분포는 물론이고 제작의 특수성 때문에 발생하는 고정자의 end-turn에 의한 여러 가지 전기 및 자기적인 특성을 분석할 수 있게된다. 3차원 Program은 2차원 해석으로는 불가능한 비대칭 model의 해석이 가능하고 계산해야되는 system 방정식의 크기가 방대하므로 해석시 사용되는 Tool의 조건과 환경에 민감한 반응을 보인다. 계산 결과를 파악하는 Post-Processor도 2차원보다 상당히 어려워지며 프로그램에 따라 다양한 기능들을 가질 수 있다. 본 연구에서는 초전도 발전기 내부에 분포되는 자속 밀도 분포, 고정자 coil의 유기전압, Torque, 누설 inductance 등의 계산이 가능하며 3차원으로 필요한 부분의 계산 값들의 화면 출력 또는 data의 출력으로 제 2의 또다른 전기적 parameter를 계산할 수 있다.

## 2. 초전도 발전기 3차원 전자장 해석 방법

### 2.1. Formulation 방법

FLUX3D의 3차원 자계에 대한 유한요소 formulation 방법은 해석하고자 하는 model의 재질, 전류원, 코일형태 등에 따라 scalar potential 또는 vector potential로 나누어질 수 있다.

Scalar formulation은 전류원이 없는 영역에서 이용하며, 이것은 Ampere의 법칙에 의해서 자계가 없게 되므로 지배방정식은 scalar potential  $\phi$ 에 의해서 정의될 수 있다.

$$\mathbf{H} = -\nabla \phi \quad (1)$$

식 (1)에서  $\mathbf{H}$ 는 자계의 세기(A/m)이며  $\phi$ 는 scalar potential 이다.  $\mathbf{H}$ 의 field line은  $\phi$ 에 수직이며 고정 경계조건과 자연경계조건( $\mathbf{H}_n=0$ )이 있으며 source는 영구자석이 될 수 있다.

전류원이 있는 경우는 다음과 같이 Ampere 법칙(식 2)이 성립되므로 자계의 세기  $\mathbf{H}$ 는 scalar potential  $\phi$ 의 적분만으로는 구할수 없게 된다. 즉 전체  $\mathbf{H}$ 는 전류원에 의한  $\mathbf{H}_j$ 와 scalar potential  $\phi$ 의 미분에 의한 자계세기( $\mathbf{H}_{\text{red}}$ )의 합으로 표현될 수 있다(식 3).

식 (5)에서  $\mathbf{v}$ 는 물질의 permeance이며  $\mathbf{B}_r$ 는 영구자석인 경우 잔류자속밀도를 나타낸다. 이 Vector formulation은 여러 가지의 문제를 해결할 수 있지만 각 node에서의 미지수가 3 개이므로 계수 방정식의 크기가 많으면 몇십만에 이르게 되므로 큰 computer system이 요구되며 계산비용도 높아지게 된다.

일반적으로 3차원 해석에서 그 영역이 core인 경우와 전류원이 존재하는 coil 영역이 있는 경우로 나누어지며 FLUX3D에서는 전류원이 있을 경우 가상 공간에 coil 만 modeling되고 요소가 분할되지 않는 영역 (non-meshed region)으로 reduced scalar potential을 사용하고, coil부분이 영역으로 지정되며 요소가 분할되는 영역 (meshed region)에서는 vector potential을 사용하게 된다.

### 2.2. 3차원 자계 해석의 경계조건

3차원 자계해석에서는 크게 두 가지의 경계조건을 사용하며, 이들 두 가지의 경계조건의 아래와 같다.

#### 2.2.1. Normal Constraint

Normal Constraint는 자속선이 경계면에 수직으로 입사하는 경우이다.  $V$ 와  $V'$ 는 같은 거리에 있고 그 절댓값이 같고 부호가 반대인 경우 사용되는 경계조건이다.

$$|V| = |V'|, \quad V \cdot V' = -1$$

#### 2.2.2. Tangential Constraint

$V$ 와  $V'$ 는 같은 거리에 있고 그 전위의 값이 같으며, 그 곱이 항상 양의 값 1을 갖게 되는 조건이다. 자계해석에서 이 조건은 자속선이 경계면에 접선을 이루게 되며 이것을 tangential constraint라고 한다.

$$V = V', \quad V \cdot V' = 1$$

### 2.3. 초전도 발전기의 3차원 FEM 전자장 해석

30 KVA 초전도 발전기의 기본사양은 60 Hz, 4극, 1800 rpm, 220 Volts 이며 계자 coil은 200 A에

100 turn이다. 전기자의 내경은 426 mm이고, 길이는 192 mm이다.

### 2.3.1. 초전도 발전기의 3차원 Modeling

초전도 발전기의 3 차원 modeling은 계자 core와 전기자 core가 없는 형태이기 때문에 형상을 입력시키는 데는 큰 어려움이 없으며, 해석의 편의와 해석 영역의 구분을 위하여 계자 coil의 yoke(재질 : SUS316, 비투자율 = 1)와 고정자 coil의 Bobbin(재질 : FRP, 비투자율 = 1)을 입력하여 형상을 modeling 하였다. 외부 shield core는 자성체로 입력하고 비투자율은 2500으로 가정하였다. 초전도 발전기는 전류원과 외부에 core가 존재함으로 reduced scalar potential로 해석을 하였고, 계자 coil은 non-meshed 영역으로 처리되었다.

### 2.3.2. 계자 coil 전류에 의한 공극에서의 자속밀도 분포

계자전류에 의한 공극의 자속밀도를 분석하기 위하여 전체 model의 1/2을 해석하였다. 계자코일의 형태는 그림 1과 같이 입력하였으며, 그림 2는 계자 coil이 포함된 1/2해석 model이다.

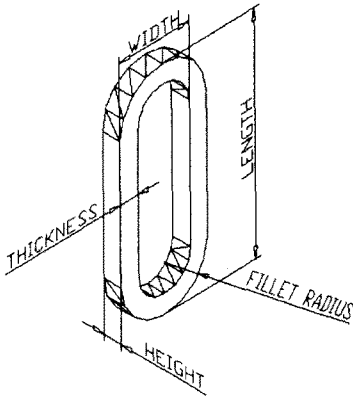


그림 1. 계자 coil의 형태

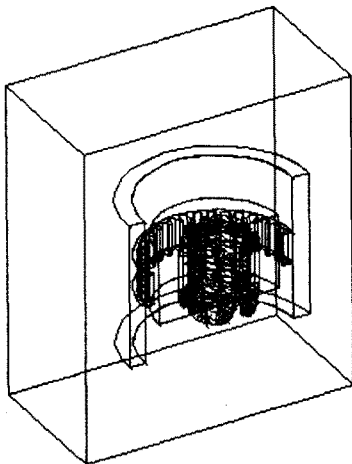


그림 2. 계자 coil이 포함된 초전도 발전기의 1/2 해석 Model

공극에서의 자속은 발전에 이용되는 유효자속의 의미를 가지므로 전기자 coil을 통과하는 것을 분석하기 위하여 그 자속밀도 분포를 보여주는 위치는 그림 3에서 나타낸 것과 같이 코일의 평균 반경을 선정하여 계산하였다.

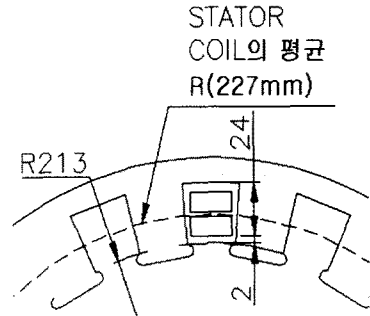


그림 3. 공극자속밀도 관찰 단면

그림 4는 계자 전류에 의한 shield core의 내면에 나타난 자속밀도 분포를 보여주고 있으며, 그림 5는 전기자 coil 중심면에서의 자속밀도 크기의 분포를 나타내며 2극이 잘 형성되면서 최대 자속 0.35 Tesla로 계산 되었다

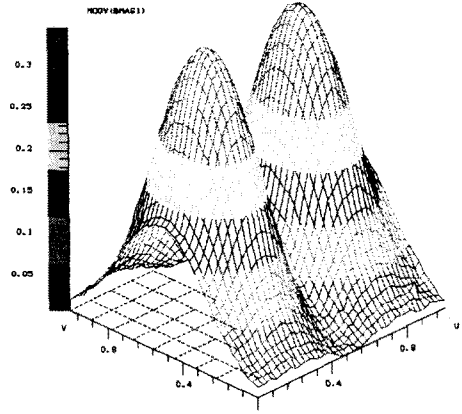


그림 4. 전기자 coil 중심면에서의 자속밀도 크기의 분포

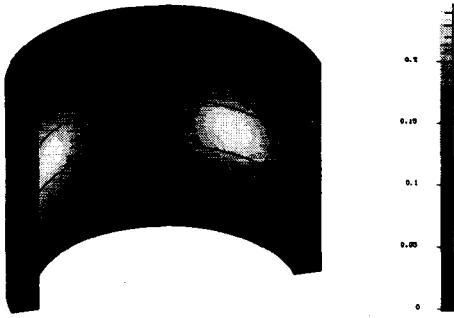


그림 5. 계자 coil 전류에 의한 shield core의 내면에 나타난 자속밀도 분포

### 2.3.3. 발전기의 유기전압

발전기 유기전압의 해석을 위하여 그림 6과 같이 전체 model의 1/4을 해석하였다.

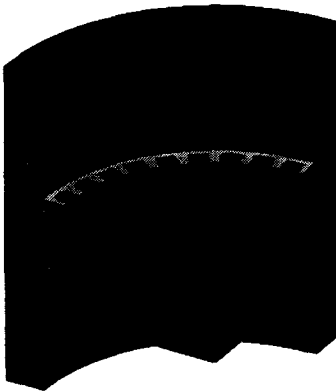


그림 6. 전체 model의 1/4 형상

발전기 고정자 coil의 권선도를 참조하여 A 상에 대한 결선을 3차원 modeling에 그려넣고, 이 coil에 link하는 자속량을 계산하고 그것을 미분하면 stator 권선의 유기전압이 되는 것이다. 미분은 시간에 대한 것이므로 각속도를 곱하면 될 것이다.

이번 3차원 해석에서의 고정자 coil은 그림 7에서와 같이 코일의 3상 중 1상만을 FLUX3D에서 제공되는 메뉴를 이용하여 non-meshed 영역으로 modeling하였다.

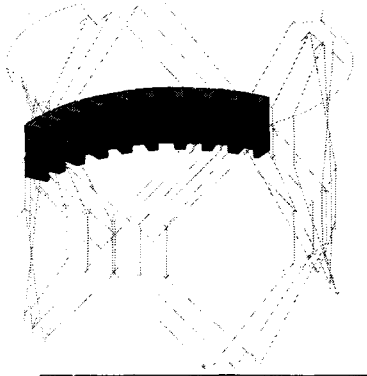


그림 7. 발전기 유기전압을 해석할 때 고정자 코일 권선

유기전압의 계산은 그림 8과 같은 고정자 coil에 해석된 자속이 link하는 양을 계산하여 식 (5)에 의해서 계산한다. 또한 자속이 통과하는 coil의 단면적에서 d는 식 (4)와 같이 계산한다.

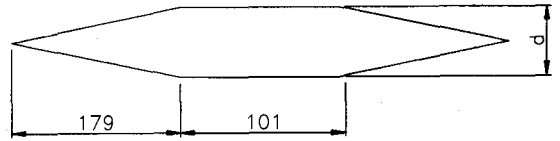


그림 8. 고정자 coil의 형태 및 크기

$$d = \frac{70}{360} \times 2\pi R \quad (4)$$

$$\approx 277.33 \text{ [mm]}$$

R : coil의 반경

$$e_{rms} = \omega N \Phi \quad (5)$$

$$= 2\pi f N B A$$

B : 평균 자속밀도

A : coil의 단면적

N : coil 1 turn의 단면적

3차원 해석에 의해서 계산된 평균자속밀도는 0.09352 T가 나왔으며, 이것은 실제 coil의 직선 부분은 평균 약 0.12 T 정도지만 end-turn 부위는 훨씬 작기 때문이다.(그림 9 참조) 단면적은 77650 [mm<sup>2</sup>]이므로 유기전압은

$$\therefore e_{rms} = 2\pi \times 72 \times 0.09352 \times 0.07765 \text{ [V]}$$

$$\approx 197.11 \text{ [V]}$$

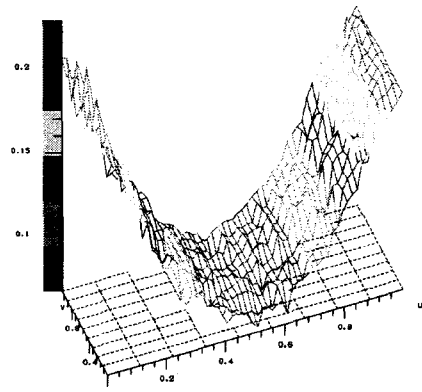


그림 9. 고정자 코일 중심면에서의 자속밀도 분포

위에서 계산된 값은 실제 220 volts 보다 10 % 정도 작게 나왔으며 coil을 통과하는 평균 자속량의 계산에서 발생하는 오차로 생각 된다.

### 3. 결 론

본 논문에서 적용된 초전도 발전기는 일반 상전도 발전기와는 달리 전기자나 계자의 자성체 core가 없기 때문에 3차원적인 해석이 필요하였고, 정자계 formulation을 이용하여 계자 coil의 전류에 의한 공극의 자속밀도 분포와 1800rpm으로 회전을 가정하여 고정자 coil에 유기되는 전압을 해석하였다. 해석된 결과는 고정자 coil의 직선부분의 길이가 101 [mm]인 경우로서 공극

에서의 직선부분의 평균자속밀도는 0.12 [T], 전체 coil의 평균자속밀도는 0.1 [T], 최대자속밀도는 0.34 [T], 유기전압은 197 [volt]로 계산되었다. 이러한 계산 결과들을 최초 설계 값들과 비교하고, 또 제작 후 실험결과와 비교 분석한다면 초전도 발전기의 설계 정수를 결정할 수 있을 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 대한전기학회, "초전도응용 기술현황", 기술조사보고, 1호, 14~33, 1992
- [2] 한국전력공사 기술연구원, "20KVA 초전도교류 발전기의 발에 관한 연구", 1993