

보정된 2차원 모델에 의한 초전도 교류 발전기의 과도특성 해석

\*이형우, 전연도, 이 주  
한양대학교 전기공학과 에너지 변환연구실

Analysis of Transient Characteristics in Superconducting AC Generator Using the Compensated 2-D Model

\*Hyung-Woo Lee, Yon-Do Chun, Ju Lee  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

**Abstract** - This paper presents the compensated 2-D magnetic fields analysis of superconducting AC generator(SCG) by using efficient 2-D model. 3-D analysis is necessary for the accurate analysis because SCG has a large leakage flux owing to the air cored winding and end ring structure. However, in 3-D FEM, considering the movement of rotor is difficult, so efficient 2-D model which can compensate the leakage flux has been proposed and the movement of rotor is easily considered. The characteristics in transient state of SCG and the prime role of damper also have been evaluated.

1. 서 론

초전도 발전기는 기존의 발전기보다 소형화, 경량화, 고효율화, 저임피던스화가 가능하고 안정성이 향상되는 등 많은 장점을 가지고 있다[1]. 초전도 발전기는 구조적으로 공심형의 계자 및 공심형의 전기자를 사용하고 권선으로는 초전도 재료를 사용하므로 저온 냉각시스템이 필요하다는 특징을 가지고 있다. 또한 초전도 발전기의 구조중 내부 및 외부댐퍼는 각각 열손실을 방지하고 발전기의 부하변동시 계자 및 전기자를 자기적으로 차폐하기 위한 구조로서 초전도의 성능에 많은 영향을 미친다. 이러한 구조적 특징을 갖는 초전도 발전기를 정확하게 해석하기 위해서는 3차원 과도 특성 해석이 필수적이다[2][3].

초전도 발전기와 같이 공심형의 전기기기는 누설자속이 크므로 정확한 특성 해석을 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 일반적으로 전자기해석을 위해 많이 사용하는 3차원 유한요소법에 의한 과도해석의 경우 해석시간과 메모리가 과다하게 요구되며 특히 회전자의 이동을 고려하여 해석할 경우 요소재분할이 필요하다는 단점이 있다[4]. 따라서 2차원 유한요소 해석에서는 고려할 수 없는 누설자속의 영향을 등가적인 공극이나 등가적인 기자력을 사용하여 그 값을 보정한 후 사용한다면 2차원 유한요소해석의 단점인 정확성의 문제와 3차원 유한요소해석의 단점인 계산시간 및 용량의 문제를 동시에 해결할 수 있다[5].

본 연구에서는 초전도발전기의 3차원 정자계 해석 및 2차원 정자계 해석을 기초로 등가적인 공극을 계산하여 보정된 2차원 모델을 제시하고 이러한 2차원 모델을 이용하여 초전도 발전기의 과도 특성해석을 수행하였다.

본 특성해석에서는 부하변동에 따른 전자기전류의 변화에 대한 내·외부댐퍼의 두께 및 재료특성이 초전도 발전기의 특성에 미치는 영향을 내·외부 댐퍼에 유기되는 와전류 및 와전류 손실의 계산에 의해 정량적, 정성적으로 검토하였으며 외부댐퍼의 유·무에 따른 내부 댐퍼의 특성을 해석하였다.

2. 해석 모델 및 유한요소 정식화

2.1 해석 모델

그림 1은 2차원 해석모델의 단면도이다. 초전도발전기는 일반 전기자 권선을 시행한 고정자와 턴수 532, 정격전류 200(A), NbTi로 권선된 초전도 4극 계자권선을 시행한 회전자부로 구성된다. 전기자권선은 코어에 코일당 턴수 9로 이루어진 3상 구리동선으로 이루어져 있고, 계자권선은 헬륨 시험용기안의 보빈에 감겨있다. 초전도발전기의 회전자는 정격속도 1800(rpm)으로 회전하며, 전원은 브러시를 통한 슬립링에 의해 전달되고, 최대 출력은 약 30(KVA)이다.

자기철드는 투자율 1000을 가진 적층강(S23)으로 만들어졌으며, 자기철드를 제외하고는 초전도발전기에서 자성체 구조는 없다.

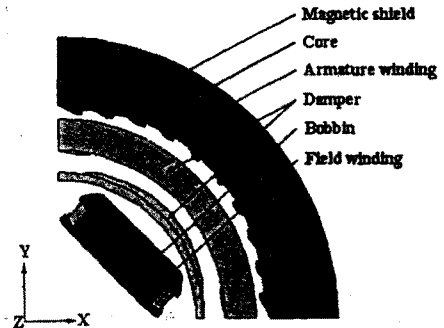


그림 1. 초전도발전기의 2차원해석 단면  
Fig. 1. Cross section of SCG for 2D analysis.

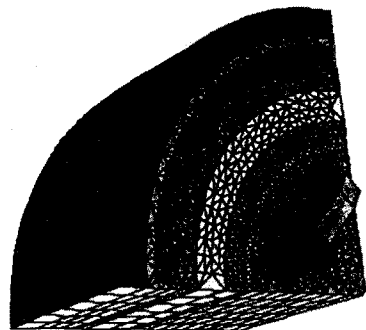


그림 2. 해석모델의 3차원 요소분할도  
Fig. 2. 3D Mesh of analysis model.

## 2.2 유한요소 정식화

### 3차원 전자기문제

3차원 전자기문제를 해석하기 위해 스칼라포텐셜( $\Omega$ )을 계변수로 사용하여 자계의 세기를 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\vec{H} = \vec{T} - \nabla \Omega \quad (1)$$

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

$$\nabla \times \vec{T} = \vec{j} \quad (2)$$

따라서 맥스웰 방정식으로부터  $\Omega$ 와  $\vec{T}$ 를 사용하여 지배방정식을 유도하면 식 (3)으로 된다.

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

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

$$\mu \cdot [S][\Omega] - [F] = 0 \quad (4)$$

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

그림 2는 해석 모델의 3차원 유한요소분할도를 나타내고 있다. 전체 절점수는 21,317이고, 사면체 요소수는 116,624이다.

### 2차원 시변장 문제

자기벡터포텐셜이 오직 Z 방향성분만을 갖고, 자성체가 등방성이라고 가정하면, 2차원 유한요소법의 지배방정식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right] + J_e - J_0 = 0 \quad (5)$$

여기서  $\mu$ 는 투자율,  $A$ 는 자기 벡터 포텐셜,  $J_0$ 는 입력 전류밀도,  $\sigma$ 는 도전율을 나타내며,  $J_e$ 는 회전자에 유기되는 와전류 밀도로서 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_e = -\sigma \left( \frac{\partial A}{\partial t} + v_x \frac{\partial A}{\partial x} \right) = -\sigma \frac{dA}{dt} \quad (6)$$

전압방정식은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = R_m I + L_m \frac{dI_m}{dt} + E_m \quad (7)$$

여기서  $V$ 는 한상의 입력전압,  $R_m$ 은 상저항,  $L_m$ 은 코일의 누설인덕턴스,  $E_m$ 은 한 코일에 유기되는 유기기 전력을 나타낸다.

식 (5)에 Galerkin 법을 적용한 후, 식 (7)의 전압방정식을 결합하고, 후퇴차분법을 이용하면 계방정식은 식 (8)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [s] + \frac{1}{\Delta t}[C] & Q_m \\ \frac{1}{\Delta t}[F_m] & R_m + \frac{L_m}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{t+\Delta t} \\ I_m^{t+\Delta t} \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta t}[C] & 0 \\ \frac{1}{\Delta t}[F_m] & \frac{L_m}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^t \\ I_m^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ V^{t+\Delta t} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

전압방정식은 여자전류의 과도상태 해석에, 전류방정식은 부하전류의 과도상태 해석에 적용되며, 회전자의 이동을 표현하기 위하여 운동방정식을 고려하였다. 또한, 전 요소의 재분할없이 효과적으로 동특성 해석을 수행하도록 이동요소분할법을 이용하였다.

### 3. 해석결과 및 검토

과도상태 해석은 두가지 경우를 고려하였다. 첫번째는 회전자가 동기속도로 회전할 때 여자전류가 계자권선에 인가되어 계자전류가 정상상태에 이를 때까지의 경우이고, 두번째는 급격한 부하전류의 변동이 발생하는 경우로서 이때 전기자권선에 유기기전력이 발생하고 전기자 반작용에 의하여 외부덤퍼 표면에는 와전류가 발생한다. 외부덤퍼는 전기자 반작용에 의하여 생기는 자속이 계자권선으로 유입되는 것을 방지하는 역할을 한다. 일반적으로 외부덤퍼는 초전도권선에 대해 전자기적, 열적 덤퍼로서 동작하도록 구리와 같은 높은 도전율의 물질이 사용되며, 본 논문에서는 외부덤퍼의 재질에 따른 와전류 및 와전류손실을 해석하였다. 또한 외부덤퍼의 두께 변화에 따라 부하전류가 변화할 때 내부덤퍼의 와전류 및 와전류손실을 2차원 유한요소법에 의하여 해석하였다.

그림 3은 정상상태시 2차원 초전도발전기 모델의 자속분포를 나타내고, 그림 4는 계자전류의 과도상태에서의 자속분포를 보여준다. 그림 4에서는 내부 덤퍼가 자기절드로서의 역할을 하는 것을 잘 알 수 있다.

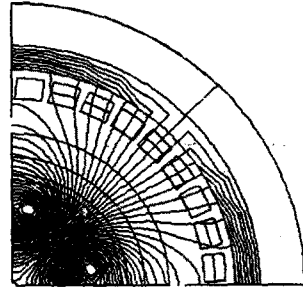


그림 3. 정상상태에서의 해석모델의 자속분포도  
Fig. 3. flux distribution in the steady state

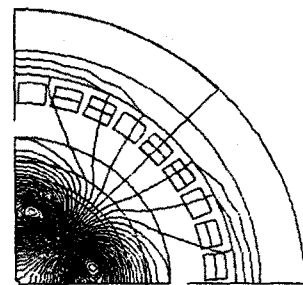


그림 4. 과도상태에서의 해석모델의 자속분포도  
Fig. 4. flux distribution in the transient state.

본 해석에서는 댐퍼의 재질로서 구리( $\sigma: 5.80 \times 10^7$  (mho/m)), 알루미늄( $\sigma: 3.82 \times 10^7$  (mho/m)), 텅스텐( $\sigma: 1.82 \times 10^7$  (mho/m)), 브레스( $\sigma: 1.5 \times 10^7$  (mho/m)), 철( $\sigma: 1.03 \times 10^7$  (mho/m)) 등 다섯가지를 사용하였다.

그림 5는 부하전류의 변동시 외부댐퍼의 재질의 변화에 따른 내부댐퍼에 유기되는 와전류 특성을 나타내고 있다. 그림 5에서 내부댐퍼에 유기되는 와전류는 도전율이 높은 물질일수록 감소함을 알 수 있다. 따라서, 도전율이 높은 재질의 댐퍼 사용시 와전류손실에 의해 발생하는 줄열도 감소하며, 그에 따라, 계자권선의 초전도냉각시스템을 유지하는 비용도 줄일 수 있다.

그림 6은 부하전류의 변동시 외부댐퍼의 재질의 변화에 따른 외부댐퍼에서 유기되는 와전류 특성을 나타낸다. 그림에서 도전율이 높은 물질일수록 외부 댐퍼 표면에 유기되는 와전류가 증가함을 알 수 있다.

그림 7은 외부댐퍼가 있는 경우와 없는 경우의 부하전류 변동시 내부댐퍼에서 발생하는 와전류손실을 나타내고 있다. 외부댐퍼가 있는 경우가 없는 경우보다 와전류손실은 약 3000배 정도 감소하였고 따라서 외부댐퍼의 필요성을 잘 알 수 있었다.

그림 8과 그림 9는 부하전류 변동시 외부댐퍼의 두께 변화에 따른 내부댐퍼에 유기되는 와전류와 와전류손실을 나타내고 있다. 기존 모델(case 4)의 외부댐퍼 두께보다 감소시킨 경우(-24mm(case1), -20mm(case2), -10mm(case3))와 증가시킨 경우(10mm(case5), 20mm(case6))의 6가지 모델을 고려하였다. 그림에서와 같이 외부댐퍼의 두께 변화에 따른 내부댐퍼의 와전류 특성은 변화가 적음을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 초전도 발전기의 3차원 해석시 나타나는 누설자속의 영향을 2차원 유한요소 해석모델의 등가공극으로 보정하여 과도특성 해석을 수행하였다. 본 연구결과 과도상태시 외부댐퍼의 두께 및 도전율이 초전도 발전기의 특성에 미치는 영향을 정량적으로 검토할 수 있었으며, 외부댐퍼의 두께가 내부댐퍼의 와전류 손실에 거의 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 앞으로 본 해석방법에 열해석 및 기계적인 용력 해석을 도입하면, 초전도 댐퍼형상설계에 유용할 것으로 사료된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Thomas H. Einstein, "System performance characteristic of superconducting alternators for electric utility power generation", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 2, pp. 310-319, 1975.
- [2] G. Martinelli and A. Morini, "Study of the Magnetic Field in Superconducting Alternator", *Archiv fur Elektrotechnik* 62, pp. 141-151, 1980.
- [3] G. Martinelli, A. Morini and P. Tenti, "Transient analysis of the shielding system in a superconducting generator", *IEEE PES Summer Meeting*, Vancouver, Paper A 79, pp. 421-429, 1979.
- [4] B. Davat, Z. Ren and M. Lajoie-Mazenc, "The movement in field modeling", *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 21, no. 6, pp. 2296-2298, 1985.
- [5] Yon-Do Chun, Pil Wan Han, Hyung-Woo Lee and Ju Lee, "Performance Analysis of the Eddy Current Brake for the high Speed Train by FEM", *ICEE proc.*, Vol. 1, pp. 772-775, 1998.

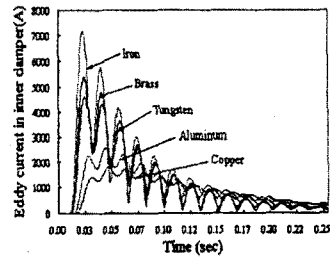


그림 5. 외부댐퍼 재질에 따른 내부댐퍼에서의 와전류  
Fig. 5. eddy current in the inner damper.

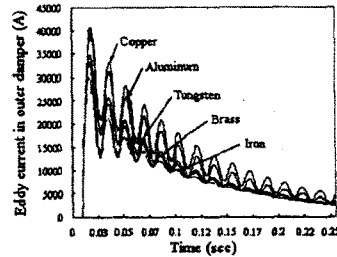


그림 6. 외부댐퍼 재질에 따른 외부댐퍼에서의 와전류  
Fig. 6. eddy current in the outer damper

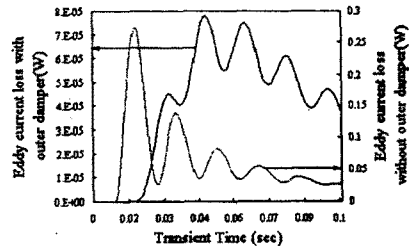


그림 7. 외부댐퍼 유무에 따른 내부댐퍼에서의 와전류손실  
Fig. 7. eddy current loss in the inner damper.

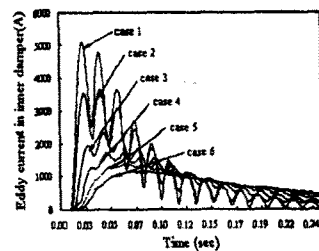


그림 8. 외부댐퍼 두께에 따른 내부댐퍼에서의 와전류  
Fig. 8. eddy current in the inner damper

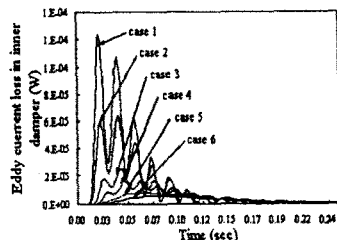


그림 9. 외부댐퍼 두께에 따른 내부댐퍼에서의 와전류손실  
Fig. 9. eddy current loss in the inner damper