

유한요소법에 의한 초전도교류 발전기의 과도 특성해석

Finite Element Analysis of the Transient Characteristics of a Superconducting A.C. Generator

韓 聲 鎮* · 裴 東 鎮**
(Sung-Chin Hahn · Dong-Jin Bae)

요 약

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 초전도 발전기의 무부하 특성 및 삼상단락 사고와 같은 돌발 사고시의 과도 자계에 의한 과도특성을 해석하였다. 발전기 내부에서 계자권선에 흐르는 전류와 전기자 권선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자계는 일반적으로 정현파 분포가 아니며 기존의 발전기 특성 해석 방법인 등가회로법에 의한 해석에서는 주로 그 기본파만을 이용하여 주파수 영역에서 해석을 행해왔다. 그러나 유한요소법을 이용하는 경우 시간영역에서 고조파가 포함된 자계분포 해석 및 이중구조 차폐통의 전기적 특성을 보다 정확히 해석할 수 있는 장점이 있다.

Abstract- This paper deals with the analysis of the transient characteristics of a superconducting a.c. generator(SCG) using Finite Element Method. Since the magnetic field induced by the field current and the armature currents are not sinusoidally distributed in a generator, the conventional equivalent circuit method, in general, uses the fundamental component only and is done in frequency domain. But the finite element analysis makes it possible to analyze the transient magnetic field distribution and the electrical characteristics of the double shields of SCG in time domain.

1. 서 론

전력수요의 증가에 따라 대단위용량 발전기에 대한 요구가 증대되고 있으나, 냉각기술, 재질의

강도등의 문제로 발전기 단위용량 증가에 한계점이 보이고 있다. 일반적으로 원통형 전기기기의 출력 P 는

$$P \propto A_s \cdot B_m \cdot D^2 \cdot L \cdot N \quad (1)$$

으로 표시되며, 여기서 $A_s(KA/m)$ 는 전기자의 전기장하(electric loading), $B_m(T)$ 은 자속밀도, $L(m)$ 는 축길이, $D(m)$ 는 전기자 지름, $N(rpm)$ 은 회전속도 이다. 발전기의 출력을 증가시키기 위해

*正 會 員 : 東亞大 工大 電氣工學科 助教授
 **正 會 員 : 서울대 大學院 電氣工學科 博士課程
 接受日字 : 1990年 5月 16日
 1次修正 : 1990年 8月 24日
 2次修正 : 1990年 10月 15日
 3次修正 : 1990年 11月 8日

대형화할수록 동기리액턴스가 증가하여 계통의 안정도 저하를 가져 오게 되며, 이를 방지하기 위해서는 발전기 공극과 제자기자력을 증가시켜야 하나 기자력 증가에 따른 제자권선의 손실이 증가하여 오히려 발전기 전체 효율이 감소하게 된다. 이와같은 이론에 따르면 회전자의 원심력과 진동으로 인해 회전자 직경과 길이는 각각 최대 1.3m, 10m정도이며 최대 출력은 2000MVA로 제한된다. [1~3] 따라서 현재의 구조 및 재질에 의한 발전기 단위 용량의 제작 한계를 극복하는 방안으로 초전도 제자권선을 가진 발전기가 제안되었다.

초전도 교류발전기는 효율 향상, 소형 경량화 및 종래기의 용량한계를 넘는 대용량화의 가능성을 보여주고 있으며, 동시에 임제고장 제거시간 (Critical Fault Clearing Time)의 증대로 전력계통 안정도 향상에 기여할 수 있어 다음 세대의 새로운 발전기로서 세계적으로 연구개발이 활발히 추진되고 있다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 초전도 발전기의 무부하 특성 및 삼상단락 사고와 같은 돌발 사고시의 과도 자계에 의한 과도특성을 해석하고자 한다. 초전도 발전기의 제반특성을 알기 위해서는 먼저 발전기 내부의 자계분포를 해석해야 한다. 발전기 내부에서는 제자권선에 흐르는 전류와 전기자 권선에 흐르는 전류에 의해 자계가 발생한다. 각 권선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자계는 일반적으로 정현파 분포가 아니며 기존의 발전기 특성해석 방법인 등가회로법에 의한 해석에서는 주로 그 기본파만을 이용하여, 주파수영역에서 해석을 행해왔다. [4, 5] 그러나 유한요소법을 이용하는 경우 시간영역에서 고조파가 포함된 자계 분포 해석 및 이중구조 차폐통의 전기적 특성을 보다 정확히 해석 할 수 있는 장점이 있다.

2. 해석 이론

2.1 지배방정식[6, 7]

변위전류를 무시한 Maxwell 방정식과 보조방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_e + \vec{J}_o \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

여기서

\vec{H} : 자계의 세기 (A/m)

\vec{B} : 자속 밀도 (WB/m²)

\vec{E} : 전계의 세기 (V/m)

\vec{J}_o : Source 전류밀도 (A/m²)

\vec{J}_e : 와전류 밀도 (A/m²)

σ : 도전률 (Ω/m)

μ : 투자율 (H/m)

이다.

식(3)으로부터 자기 벡터 포텐셜 (Magnetic vector potential) \vec{A} (WB/m)는

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (6)$$

으로 표현되며,

식(2)와 (6)에서

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (7)$$

로 쓸 수 있으며, 이 때, ϕ 는 전위 (electric scalar potential)이다.

여기서 식(1)에 식(4)와 식(6)을 대입하고, $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ 인 Coulomb gauge를 적용하면

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_e$$

혹은

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) + \vec{J}_o \quad (8)$$

의 지배방정식을 얻게 되고 여기서 ν 는 자기저항률이며 투자율 μ 의 역수이다.

2.2 유한요소 정식화[8, 9]

식(8)의 지배방정식을 2차원 유한요소 해석을 하기위해 다음의 가정을 한다.

1) 축 방향 길이는 발전기 직경에 비해 충분히 길다고 가정한다.

2) 전류는 축방향 (z방향)으로 흐른다.

3) 각 매질의 정수는 선형등방성이다.

이상의 가정하에 2차원 유한요소 해석을 하는 경우 열전자차폐층과 댐퍼는 전도도가 큰 도체이며 각각 하나의 원통으로 되어 있어 대칭성을 띠고 있으므로 식(8)에서 나타나는 $\nabla \phi$ 항은 소거되어 [10]

이는 다시

$$-\nu \nabla^2 \vec{A} = \vec{J}_o - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (9)$$

와 같이 된다.

여기서 해석영역을 유한개의 삼각형 요소로 분할하고, 요소내의 벡터 포텐셜 \vec{A} 는 형상함수 (shape function) N_i 를 사용하여 이산화(discretization)한다. 한편 식(9)는 시간 함수이므로 형상함수 N_i 를 공간 변수 x, y 만의 1차함수로 보고 각 절점에서 자기 벡터 포텐셜 A_i 를 시간 t 만의 함수로 가정하여 요소내의 벡터 포텐셜을 다음과 같이 근사화(approximation)한다.

$$A^e \approx \sum_i^{i,j,k} N_i(x,y)A_i(t) \quad (10)$$

단, $N_i(x,y) = \frac{1}{2\Delta}(a_i + b_i x + c_i y)$

A_i 는 삼각형 요소 세 꼭지점의 포텐셜

$$a_i = x_j y_k - x_k y_j$$

$$b_i = y_j - y_k$$

$$c_i = x_k - x_j$$

Δ 는 삼각형 요소의 면적

식(9)와 (10)으로 부터 Galerkin Scheme을 이용한 가중 잔차법(Weighted Residual Method)을 적용하면, 전 해석 영역에 대해

$$\int_{\Omega} (\nu \nabla \vec{A} \cdot \nabla N_i - J_0 N_i + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} N_i) d\Omega - \int_{\Gamma} (\nu \frac{\partial \vec{A}}{\partial n} N_i) d\Gamma = 0 \quad (11)$$

이고 여기에 homogeneous Neumann 경계조건을 대입하면 다시

$$\int_{\Omega} (\nu \nabla \vec{A} \cdot \nabla N_i - J_0 N_i + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} N_i) d\Omega = 0 \quad (12)$$

의 표현식을 얻을 수 있다. 여기서 각 요소에 적용되는 행렬식은 식(10)과 면적좌표를 이용하면

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \left[\sum_{j=1}^3 \sigma N_j \frac{\partial A_j}{\partial t} \right] dx dy \\ & + \int_{\Omega} \left[\sum_{j=1}^3 \nu \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial x} \right) A_j \right] dx dy \\ & - \int_{\Omega} (J_0 N_i) dx dy = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

이 되고 이를 행렬식으로 표현하면

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma \Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \\ & + \frac{\nu}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_i b_j + c_i c_j \\ i, j = 1, 2, 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$- \frac{\Delta}{3} \frac{T_0}{Q_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_0 = 0 \quad (14)$$

이 되고 여기서 Δ 는 삼각형 요소의 면적, 전류밀도 $J_0 = T_0 / Q_0$ i_0 로 변환시켰으며 T_0 는 i_0 가 흐르는 부분의 권선 수, Q_0 는 전류가 흐르는 부분의 면적을 나타낸다. 한편 식(14)의 시간 미분항은 후퇴차분법(backward substitution)을 쓰면, 임의의 시간 t 와 Δt 시간경과 후의 $t + \Delta t$ 에 있어서

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{A^{t+\Delta t} - A^t}{\Delta t} \quad (15)$$

이고 결국 식(14)는

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{\Delta t} \frac{\sigma \Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{\nu}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_i b_j + c_i c_j \\ i, j = 1, 2, 3 \end{bmatrix} \right] \\ & \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{t+\Delta t} + \left[-\frac{\Delta}{3} \frac{T_0}{Q_0} \right] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} i_0^{t+\Delta t} \\ & = \left[\frac{1}{\Delta t} \frac{\sigma \Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^t \end{aligned} \quad (16)$$

이 된다. 그러나 위식을 전체 영역에 대해 조립하여 계 행렬(System Matrix)을 구성하면, 회로 전류가 미지변수이므로 기지식은 절점수 n 개와 같은 반면, 미지변수는 $n+4$ 개 이므로, 자기 벡터 포텐셜, 전류, 단자전압 사이의 새로운 관계식을 다음과 같이 추가한다.

$$\begin{aligned} & \frac{d\phi_f}{dt} + (r_f + R_f) i_f + L_f \frac{di_f}{dt} = V_f \\ & \frac{d\phi_a}{dt} + (r_a + R_a) i_a + L_a \frac{di_a}{dt} = V_a \\ & \frac{d\phi_b}{dt} + (r_b + R_b) i_b + L_b \frac{di_b}{dt} = V_b \\ & \frac{d\phi_c}{dt} + (r_c + R_c) i_c + L_c \frac{di_c}{dt} = V_c \end{aligned} \quad (17)$$

계자 : $r_f = 0.033[\Omega]$ $R_f = 0.1[\Omega]$
 $L_f = 0.001[H]$ $V_f = 10[V]$
 전기자 : $r_a = 0.0005[\Omega]$ $R_1 = 0.01[\Omega]$
 $L_a = 0.0002[H]$ $V_a = 4100[V]$

계자권선수 : 400회 전기자권선수 : 10회

회전자 회전수 : 3600[rpm]

여기서 ϕ 는 권선을 통과하는 자속, r 은 발전기 내부저항, R 은 외부저항, L 은 외부인덕턴스, V 는 전압이고, 철자 f, a, b, c 는 각각 계자 f 및 전기자의 a, b, c 상이다. 이로부터 식(16)과 (17)을 결

합하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} (K_{11}) & (K_{12}) \\ (K_{21}) & (K_{22}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A) \\ (I) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (F_1) \\ (F_2) \end{bmatrix}$$

$(K_{11}), (K_{12}), (F_1)$: 자장방정식에 의해 구해지는 행렬식

$(K_{21}), (K_{22}), (F_2)$: 회로방식에 의해 구해지는 행렬식

(K_{11}) : $n \times n$ 행렬

$$(K_{11}^e) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sigma \Delta}{12} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} + \frac{\nu}{4\Delta} (b_i b_j + c_i c_j) : 3 \times 3 \text{행렬}$$

(K_{12}) : $n \times 4$ 행렬

$$(K_{12}^e) = -\frac{\Delta}{3} \frac{T_0}{Q_0} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} : 3 \times 1 \text{행렬}$$

(F_1) : $n \times 1$ 행렬

$$(F_1^e) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sigma \Delta}{12} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} : 3 \times 1 \text{행렬}$$

(K_{21}) : $4 \times n$ 행렬

$$(K_{21}^e) = (\pm 1) \times \frac{1}{\Delta t} \frac{\ell}{3} \frac{T_0}{Q_0} \Delta : 1 \times 3 \text{행렬}$$

+1: 전류가 나오는 요소,
-1: 전류가 들어가는 요소

(K_{22}) : 4×4 행렬, 대각선 항만이 영이 아님

$$(K_{22}^e) = r_0 + R_0 + \frac{L_0}{\Delta t} : 1 \times 1 \text{행렬}$$

(F_2) : 4×1 행렬

$$(F_2^e) = V_0^{t+\Delta t} + \frac{L_0}{\Delta t} i_0^t + \frac{1}{\Delta t} \phi_0^t : 1 \times 1 \text{행렬}$$

$$(A) = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{pmatrix} : n \times 1 \text{행렬}$$

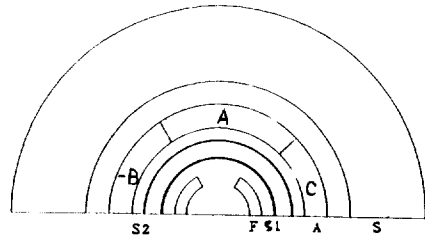
$$(I) = \begin{pmatrix} i_f \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} : 4 \times 1 \text{행렬}$$

여기서 첨자 0는 전류가 흐르는 권선을 나타내는 첨자로서 요소에 따라 제자 및 3상 전기자 권선 즉, f, a, b, c 중의 하나를 나타낸다.

3. 사례연구

3.1 해석모델[11, 12]

본 연구에서는 3상 2극의 회전계자형 10MVA 초전도 동기발전기를 해석 하였다. [13] 그림 1은 축 방향에 대한 횡단면도이고, 발전기의 최외각으로부터 주변보호층, 3상 전기자 권선, 댐퍼, 열전자 차폐층, 제자권선의 순서로 구성되어 있으며, 고정자는 주변 보호층과 3상 전기자 권선으로, 회전자는 댐퍼, 열전자 차폐층 및 제자 권선으로 구성된다. 유한요소 모델링에 이용된 요소수는 756개, 절점수는 408개이고 주변보호층의 외부경계는 homogeneous Dirichlet condition으로 처리하였다. 유한요소 program의 전체적인 흐름도는 그림 2와 같고 표1은 초전도 동기 발전기 해석 모델의



- F: 초전도 제자권선
- S1: 열전자 차폐층
- S2: 댐퍼
- A: 전기자 권선
- S: 외부 차폐층

그림 1 초전도 동기발전기의 횡축 반단면도

Fig. 1 Semi-Cross Section of Superconducting Synchronous Generator

표 1 해석대상 모델의 채원(10MVA)

Table 1 Dimension of the FEM Model

전기자권선 외반경:	0.31 m	전기자권선 내반경:	0.234m
댐퍼 외반경:	0.21 m	댐퍼 내반경:	0.19 m
열전자차폐층 외반경:	0.171m	열전자차폐층 내반경:	0.166m
제자권선 외반경:	0.144m	제자권선 내반경:	0.1 m
외부차폐층 외반경:	0.31 m	외부차폐층 내반경:	0.35 m
댐퍼	구리, 전도도 $5.8 \times 10^7 [C/m]$ at 300K		
열전자차폐층	구리, 전도도 $5.8 \times 10^6 [C/m]$ at 77K		
외부차폐층	철, 투자율 $\mu_r = 1000$		

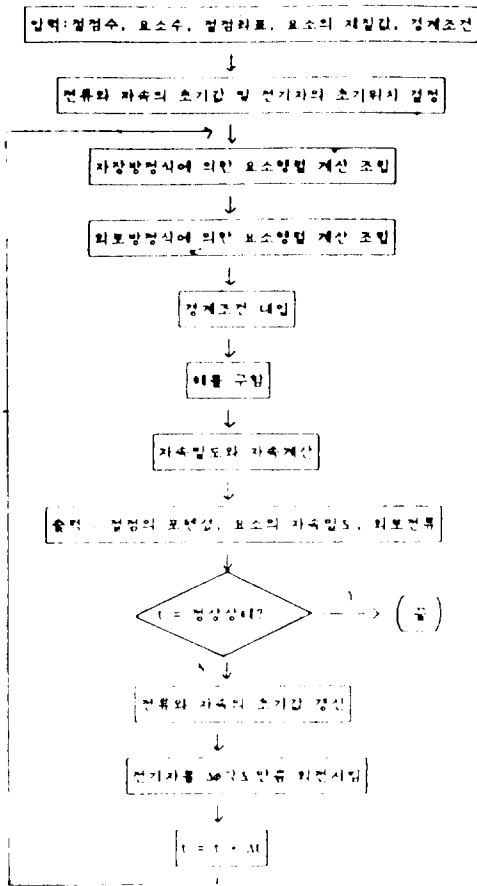


그림 2 프로그램 흐름도
Fig. 2 Flow Chart of the Program

제원을 나타낸다.

3.2 과도상태 Simulation

발전기가 무부하 운전도중 어느순간에 유기전력 과 단자전압사이에 위상차를 주게되면, 전기자권선에 전류가 흐르게 되며, 이때 계자 전류에는 직류 300[A]가 흐르고, 전기자 각 상에는 800[A_{rms}]의 평형삼상전류가 흐르고, 이 때 계통에서의 선간단락사고의 조건을 주었을 때의 전기자전류의 변화양상을 나타내었다.

그림 3은 전기자 전류의 변화양상이다.

전기자의 a상유기전력이 최대인 순간에 단락이 일어난 경우이므로, a상 전류에는 직류성분이 없고 b, c상에는 포함되었다. 그림 4는 계자전류의 변화 양상이다.

초전도 발전기의 경우 계자권선에 초전도선을

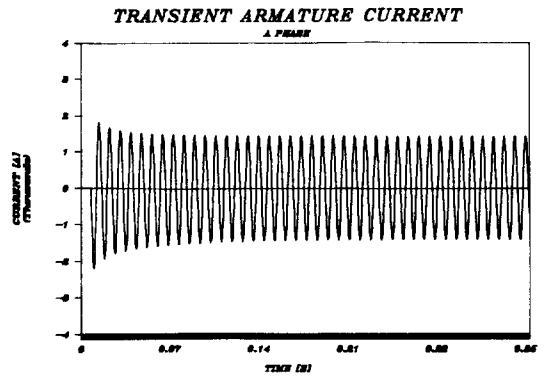


그림 3a 전기자 전류변화(a상)
Fig. 3a Armature Current Variation(a phase)

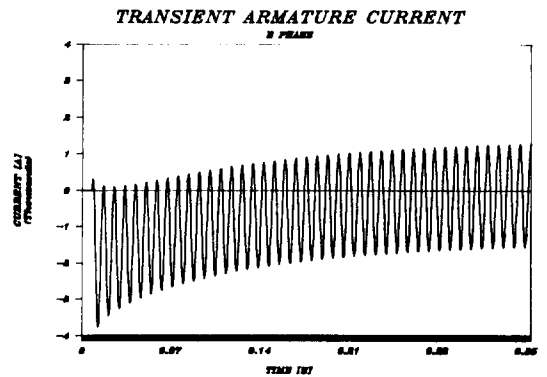


그림 3b 전기자 전류변화(b상)
Fig. 3b Armature Current Variation(b phase)

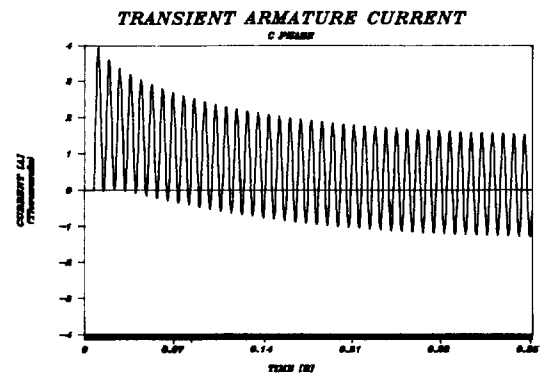


그림 3c 전기자 전류변화(c상)
Fig. 3c Armature Current Variation(c phase)

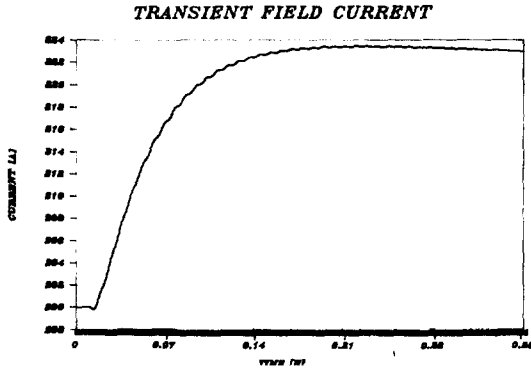


그림 4 계자전류변화
Fig. 4 Field Current Variation

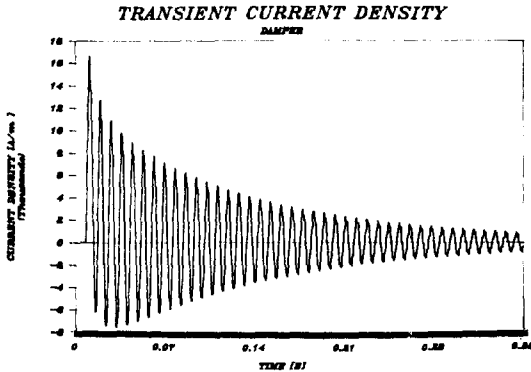


그림 5 와전류 밀도변화(댐퍼)
Fig. 5 Eddy Current Density Variation(Damper)

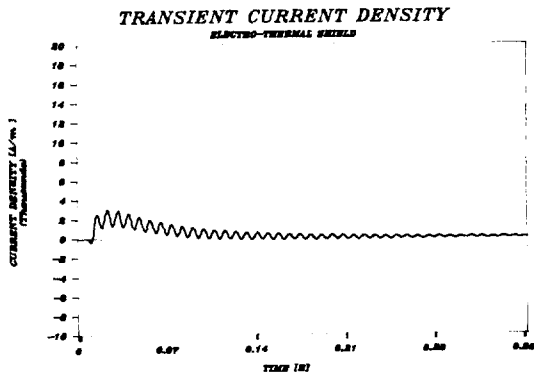


그림 6 와전류 밀도변화(열전자 차폐층)
Fig. 6 Eddy Current Density variation(Electro-thermal shield)

사용하므로 시정수가 현용발전기에 비해 무척 크며 이중구조 차폐층에 의한 영향도 고려되어, 그림 4와 같이 계자전류 변화가 무척 느리게 나타났다. 그림 5와 6은 각각 댐퍼 및 열전자 차폐층에 유기되는 와전류 밀도의 변화이다.

여기서 보는 바와같이 댐퍼에는 교류성분이 많이 나타나나 열전자 차폐층에는 직류성분이 주로 나타난다. 이는 과도자계에 의한 교류성분은 댐퍼에서 거의 차폐됨을 의미한다. 이에 따라 초전도 계자권선 손실의 주된 원인이 되는 교류 자계는 계자권선에서는 거의 존재하지 않으므로 이중구조 차폐통 회전자가 효율적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전압원 유한요소법을 이용하여 초전도 동기 발전기의 단락특성을 다루었으며, 시간미분항을 후퇴차분법으로 시간 분할하여 매 시간 스텝마다 특성을 계산 할 수 있도록 하였다. 발전기가 무부하 정상 운전도중 3상단락 사고가 발생하였을 때 계자권선과 전기자 권선의 단락전류 변화 양상, 열전자 차폐층과 댐퍼에 유도되는 와전류 밀도의 변화등을 구하였다.

본 연구에서 다루지 않은 열전자 차폐층 및 댐퍼에 작용하는 전자력과 토오크의 변화, 그리고 과도시 각속도변화를 고려한 해석 등은 계속 연구되어야 할 것이며, 이들과 더불어 본 연구는 초전도 발전기 설계 및 제작의 기본적인 자료로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 1989년 문교부 학술 연구 조성비에 의하여 연구되었습니다

참 고 문 헌

- [1] J. Kirtley, Jr. "Supercool Generation", IEEE Spectrum pp. 28~35, April, 1983.
- [2] J. Smith, Jr. "Overview of the Development of Superconducting Synchronous Generators", IEEE Trans. on Mag. Vol. Mag-19. No. 3, May, 1983, pp. 522~528
- [3] 한송엽, "초전도 교류발전기의 개발 현황과 문제점", 대한기계학회지, Vol. 27, No. 3, 1987. pp. 180~188.
- [4] T.J.E. Miller. et. al. "Perturbation of Transient Magnetic Fields through Superconduct-

- ing A.C. Machine", Proc. IEEE, Vol. 123, No. 5, 1976, pp. 437~443.
- [5] T. Bratoljic, H. Fursich and H.W. Lorenzen, "Transient Small Perturbation Behaviour of Superconducting Turbogenerator", IEEE, Trans. on PAS, Vol. PAS-96, No. 4, 1977, pp. 1418~1429
- [6] J.D. Jackson, "Classical Electrodynamics" John Wiley and Sons, 1975.
- [7] W. Panofsky, "Classical Electricity and Magnetism", Addison Wesley, 1978.
- [8] A.J. Davies, "The Finite Element Method", Clarendon Press, 1980.
- [9] L. Segerlind, "Applied Finite Element Analysis", John Wiley and Sons, 1984.
- [10] T. Nakata, N. Takahashi, K. Fujiwara, "Physical meaning of grad ϕ in Eddy current analysis using magnetic-vector potentials", IEEE, Trans. on Mag. Vol. Mag-24, No. 1, Jan, 1988. pp. 178~181.
- [11] I. Muta, E. Mukai, et al. "Calculation of Steady State Performance of 20KVA Superconducting Synchronous Generator using Finite Element Analysis", SPEY 10, Oct, 1983. pp. 13~18.
- [12] 이병석 "유한요소법에 의한 초전도 동기발전기의 단락특성해석", 공학 석사 논문, 서울대학교, 1989.
- [13] J.A. Mallick, "An Investigation of the Three Dimensional Magnetic and Eddy Current Fields in Superconducting Alternator", ph. D Thesis, MIT, 1979.
- [14] I. Muta, "Equivalent Circuit Modeling of Superconducting Synchronous Generator With Double Electromagnetic Shields", JIEE, Vol. 100, No. 5, pp. 585~592.
- [15] T. Okada, T. Nitta and T. Shintani, "On-Load Test of the 20KVA Superconducting Generator", IEEE MAGNETICS, Vol. MAG21, No. 2, March 1985.
- [16] C. Flick W.R. McCown and J.H. Panker, Jr. "General Design Aspects of A 300MVA Superconducting Generator for Utility Application", IEEE MAGNETICS, Vol. MAG-17, No. 1, January 1981.