

초전도 동기발전기의 댐퍼 과도상태 해석

전연도, 이형우, 이 주
 한양대학교 전기공학과 에너지변환연구실

Analysis of Damper Transient in Superconducting Synchronous G

Yon-Do Chun, Hyung-Woo Lee, Ju Lee
 Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea
 ydchun@hymail.hanyang.ac.kr, karussel@hymail.hanyang.ac.kr, julee@email.hany

Abstract - This paper presents the 2-D analysis of damper transient in superconducting synchronous generator(SCG) using finite element method. Efficient 2-D analysis model which compensates the leakage flux is proposed for the saving of computation time and memory capacity required in 3-D finite element analysis. The characteristics of damper transient in SCG and the prime role of damper also have been evaluated.

1. 서 론

국내의 전력수요 증가에 따라 발전설비의 증대가 요구되고 있으나 기존의 발전기는 제작 및 수송 등 여러 가지 문제점을 가지므로 초전도 발전기가 제안되었다. 기존의 발전기와 비교하면 초전도 발전기는 계자 권선으로 전기저항이 없는 초전도 재료를 사용하고 계자와 전기자 코어는 비자성재료를 사용하므로 동손 및 철손의 감소로 인한 효율을 증대시킬 수 있다. 또한 공극에서 높은 자속밀도를 얻을 수 있고 이에 따라 용량과 체적을 줄일 수 있으며 기존의 발전기 보다 큰 에너지밀도를 가지므로 대용량화가 가능하며 동기리액턴스가 작아서 전력계통의 안정도가 증가되는 등 많은 장점을 가지고 있다 [1].

그러나 초전도 상태를 유지하기 위해서 초전도발전기는 저온 냉각시스템과 단열구조가 필요하고 이에 따라 내부 및 외부 댐퍼라는 2중 구조를 가지게 된다. 댐퍼는 열손실을 방지하고 발전기의 부하변동시 계자 및 전기자를 자기적으로 차폐하기 위한 구조로서 초전도 발전기의 성능에 많은 영향을 미친다.

초전도 발전기는 최외각의 자기철드를 제외한 모든 구조물이 비자성 재질이므로 공극이 매우 크고 전기자와 계자가 공심형 구조이므로 누설자속이 크고 따라서 댐퍼의 특성을 정확히 해석하기 위해서는 3차원 특성 해석이 필수적이다[2][3]

일반적으로 전자계해석을 위해 많이 사용되는 3차원 유한요소법은 해석시간과 메모리가 과다하

게 요구되며 특히 회전자자의 이동을 고려하여 해석할 경우 요소 재분할이 필요하다는 단점이 있다[4]. 따라서 2차원 유한요소법을 이용하고 2차원 유한요소해석에서 고려할 수 없는 누설자속의 영향은 3차원 해석에서의 공극 자속값과 비교하여 등가 공극으로 보정하면 2차원 유한요소 해석의 단점인 해의 정확성 문제와 3차원 유한요소 해석의 단점인 계산시간 및 용량의 문제를 동시에 해결할 수 있다[5].

본 연구에서는 초전도발전기의 3차원 정자계 해석 및 2차원 정자계 해석을 기초로 하여 등가 공극을 계산하여 보정된 2차원 모델을 제시하고 이를 이용하여 초전도 발전기의 댐퍼 과도특성 해석을 수행하였다.

해석시 부하변동에 따른 전기자 전류의 변화가 초전도발전기의 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 내부, 외부 댐퍼의 두께 및 재질특성을 변화시켜 댐퍼에 유기되는 와전류 및 와전류 손실을 정량적, 정성적으로 계산하였고 또한 외부 댐퍼의 역할을 파악하기 위해 외부 댐퍼의 유·무에 따른 내부 댐퍼의 특성을 해석하였다.

2. 해석 모델 및 유한요소 정식화

2.1 해석모델

그림 1은 2차원 해석모델의 단면도이다. 그림에서처럼 기존의 발전기와 달리 외부, 내부댐퍼 구조를 가지는 것을 알 수 있다.

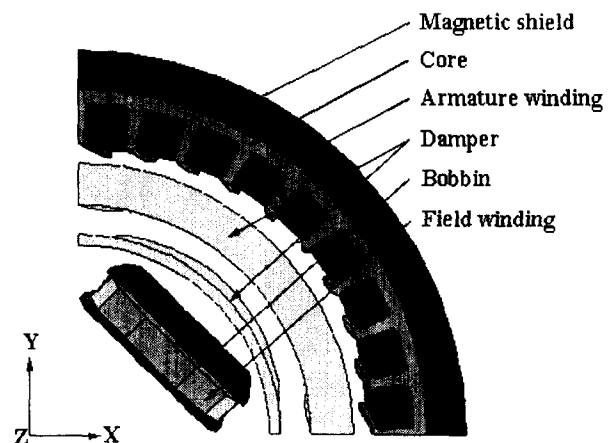


Fig. 1. Cross section of SCG for 2D analy

표 1은 초전도 발전기의 제원을 나타내고 있다. 전기자는 일반 구리동선으로 매극 매상당 슬롯수 3, Y결선의 2층권 구조이며 단절계수가 7/9인 단절권으로 권선되어 있다. 그림 2는 해석 모델의 3차원 유한요소 분할도를 나타내고 있다. 전체 절점수는 21,317이고, 사면체 요소수는 116,624이다.

2.2 유한요소 정식화

2.2.1 3차원 정자계문제

3차원 정자계문제를 해석하기 위해 스칼라포텐셜(Ω)을 계변수로 사용하여 자계의 세기를 표현하면 식 (1)과 같다.

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

여기에서 \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 Ω 와 \vec{T} 를 사용하여 지배방정식을 유도하면 식 (3)으로 된다.

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

Table 1. Specifications of SCG

정격출력	30/3 ϕ [kVA]	계자턴수	532
정격속도	1,800[rpm]	선재종류	NbTi
주파수	60 [Hz]	정격전류	200 [A]
극수	4	자기셴드비투자율	1000

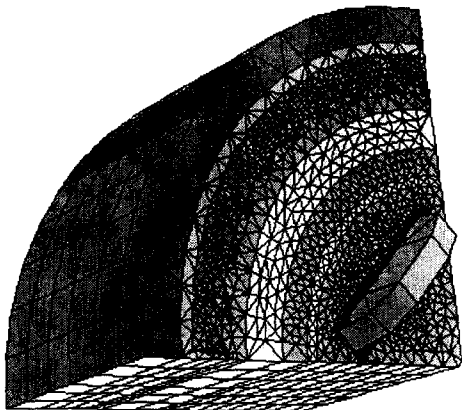


Fig. 2. 3D Mesh of analysis model.

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

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

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

2.2.2 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 μ 는 투자율, A 는 자기 벡터 포텐셜, J_0 는 입력 전류밀도, σ 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 환상의 입력전압, R_m 은 상저항, L_m 은 코일의 누설인덕턴스, E_m 은 한 코일에 유기되는 유기기전력을 나타낸다.

식 (5)에 Galerkin 법을 적용한 후, 식 (7)의 전방정식을 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 운동방

정식을 고려하였다. 또한, 전요소의 재분할없이 효과적으로 동특성 해석을 수행하도록 이동요소 분할법을 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 전기자 권선에 유기기전력이 발생하고 전기자반작용에 의하여 외부댐퍼 표면에는 와전류가 발생한다. 외부댐퍼는 전기자 반작용에 의하여 생기는 자속이 계자권선으로 유입되는 것을 방지하는 역할을 한다. 일반적으로 외부댐퍼는 초전도권선에 대해 전자기적, 열적 댐퍼로서 동작하도록 구리와 같은 높은 도전율의 물질이 사용되며, 본 논문에서는 외부댐퍼의 재질에 따른 와전류 및 와전류손실을 해석하였다. 또한 외부댐퍼의 두께 변화에 따라 부하전류가 변화할 때 내부댐퍼의 와전류 및 와전류손실을 2차원 유한요소법에 의하여 해석하였다.

그림 3은 정상상태시 2차원 초전도발전기 모델의 자속분포를 나타내고 있으며 자속이 댐퍼를 통과하는 것을 알 수 있다. 그림 4는 계자전류의 과도상태시의 자속분포를 보여주고 있다. 그림에서 처럼 자속의 흐름이 내부 댐퍼에 의해 어느 정도 차단됨을 알 수 있으며 이로부터 내부댐퍼가 자기철드의 역할을 하는 것을 알 수 있다.

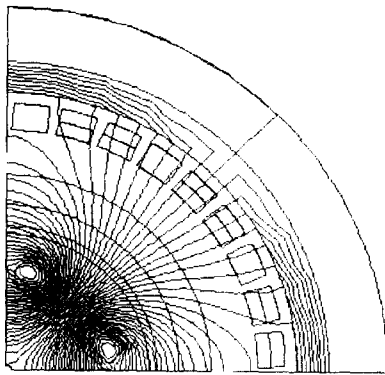


Fig. 3. flux distribution in the steady st

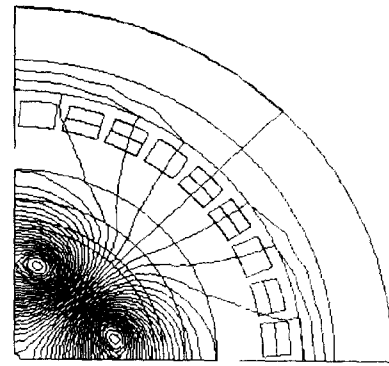


Fig. 4. flux distribution in the transient
본 해석에서는 도전율이 다른 5가지의 재질을 댐퍼로서 사용하였으며 그 종류는 다음과 같다. 구리 ($\sigma: 5.80 \times 10^7$ (mho/m)), 알루미늄 ($\sigma: 3.82 \times 10^7$ (mho/m)), 텅스텐 ($\sigma: 1.82 \times 10^7$ (mho/m)), 브레스 ($\sigma: 1.5 \times 10^7$ (mho/m)), 철 ($\sigma: 1.03 \times 10^7$ (mho/m)).

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 변화 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.

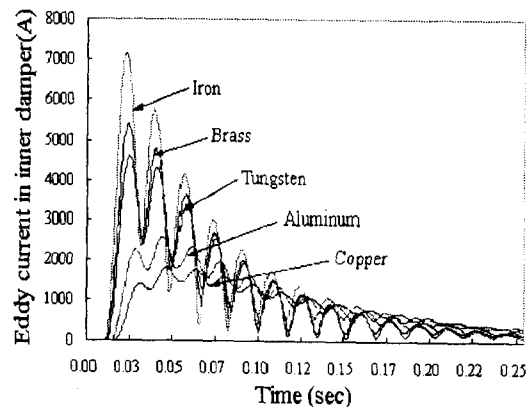


Fig. 5. eddy current in the inner damp

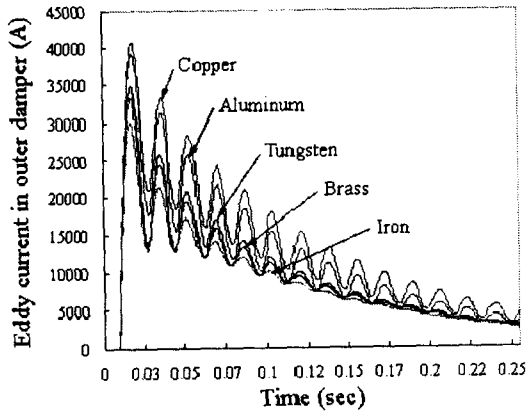


Fig. 6. eddy current in the outer damp

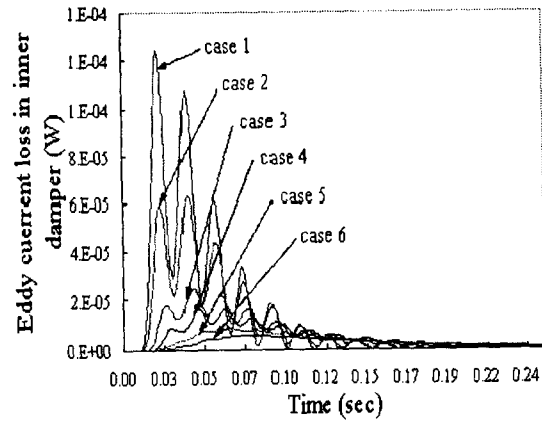


Fig. 9. eddy current loss in the inner dam

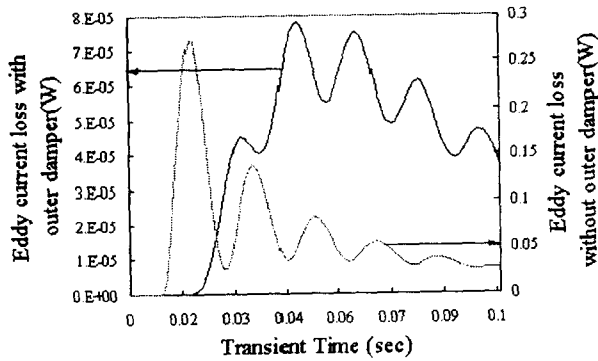


Fig. 7. eddy current loss in the inner dam

그림 8과 그림 9는 부하전류 변동시 외부댐퍼의 두께변화에 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)까지 모델을 고려하였다. 그림에서와 같이 외부댐퍼의 두께 변화에 따른 내부댐퍼의 와전류 특성은 변화가 적음을 알 수 있었다.

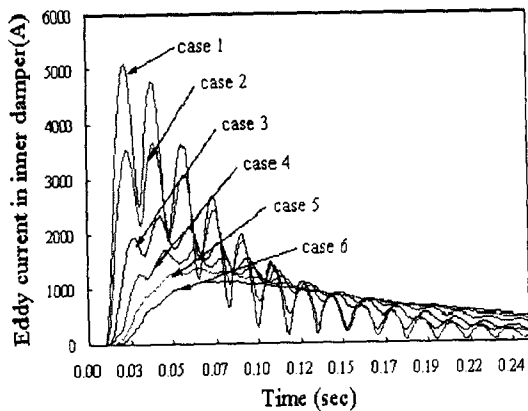


Fig. 8. eddy current in the inner damp

4. 결 론

본 논문에서는 2차원 유한요소해석에서 고려할 수 없는 누설자속의 영향을 3차원 해석에서의 공극 자속값과 비교하여 등가 공극으로 보정하여 초전도 발전기의 댐퍼의 과도특성을 해석하였다. 과도상태시 외부댐퍼의 두께 및 도전율에 따라 외부, 내부댐퍼에 유기되는 와전류와 와전류 손실을 해석하였으며, 해석결과로부터 외부댐퍼는 도전율이 높은 재질을 사용하여야 하며 외부댐퍼의 두께는 내부댐퍼의 와전류 손실에 거의 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Thomas H. Einstein, "System perform characteristic of superconducting alternato electric utility power generation", *IE Transaction on Power Apparatus and Syst* vol. 94, no. 2, pp. 310-319, 1975.
- [2] G. Martinelli and A. Morini, "Study o Magnetic Field in Superconducting Altern *Archiv fur Elektrotechnik* 62, pp. 141-151
- [3] G. Martinelli, A. Morini and P. "Transient analysis of the shielding syste a superconducting generator", *IEEE P Summer Metting*, Vancouver, Paper A 79 421-429, 1979.
- [4] B. Davat, Z. Ren and M. Lajoie-Ma "The movement in field modeling", *IE Trans. on Magn.*, vol. 21, no. 6, pp. 229 1985.
- [5] Yon-Do Chun, Pil Wan Han, Hyung-Lee and Ju Lee, "Performance Analysis o Eddy Current Brake for the high Speed by FEM", *ICEE proc.*, Vol. I, pp. 772-1998.