보정된 2차원 해석모델에 의한 초전도 동기발전기의 댐퍼 과도특성 해석

論 文
49B-2-3

Transient Characteristic Analysis of Damper in Superconducting Synchronous Generator by the Compensated 2D Analysis Model

全 衍 度** · 李 衡 雨* · 李 柱*** · 洪 正 杓§ · 權 永 吉§§ · 柳 康 植§§

(Yon-Do Chun · Hyung-Woo Lee · Ju Lee · Jung-Pyo Hong · Young-Kil Kwon · Kang-Sik Ryu

Abstract - This paper presents a novel method for the transient analysis of eddy currents in the dampers of a super-conducting synchronous generator(SCG). The method proposes a 2-D corrected model which takes into account the influence of leakage fluxes of the field winding ends by increasing the effective air gap in order to consider the high precision of the analysis for the conventional 2-D model. The electromagnetic fields for the corrected model are analyzed by the time-stepping finite element method, thus the eddy currents in the dampers and electro-motive forces(EMF) in the stator windings are calculated. As the results, it is proved the presented method is comparatively accurate by comparing the measured phase EMF values and the simulation ones, where about 6.4% error at the maximum value of EMF is occurred between them.

Key Words : 2-D transient analysis, damper, superconducting synchronous generator, finite element method

1. 서 론

국내의 전력수요는 산업의 고도화, 생활수준의 향상 등으로 최근 10년간 연평균 10%이상의 증가를 지속하고 있으며 이에 따라 전력 사용량도 크게 늘어나고 있다. 그러나 전력수요의 증가에 따른 발전설비의 확충은 기존의 발전기로는 제작 및 수송 등 여러 가지 문제점을 가지고 있으므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 초전도 동기발전기가 제안되었다. 기존의 발전기와 비교해 볼 때, 초전도 동기발전기는 계자 권선으로 전기저항이 없는 초전도 재료를 사용하고 계자와 전기자 코어는 비자성 재료를 사용하므로 동손 및 철손의 감소로 인한 효율을 증대시킬 수 있다. 또한 공극에서 높은 자속밀도를 얻을 수 있고 이에 따라 발전기의 용량과 체적을 줄일 수 있으며 기존의 발전기보다 큰 에너지밀도를 가지므로 대용량화가 가능하고 동기리액턴스가 작아서 전력계통의 안정도가 증가되는 등 많은 장점을 가지고 있다[1]-[3].

그러나 초전도 동기발전기는 계자 권선의 초전도 상태를 유지하기 위해서 저온 냉각시스템과 단열구조가 필요하고 이에 따라 내부 및 외부 댐퍼라는 2중 구조를 가지게 된다.

* 準 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 碩士課程
** 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程
*** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電子電氣工學部 專任講師 · 工博
§ 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 助敎授 · 工博
§§ 正 會 員 : 韓國電氣硏究所 · 工博
接受日字 : 1999年 7月 14日
最終完了 : 2000年 1月 13日

일반적으로 댐퍼는 계자 외부로부터 열 전달을 방지하고 발전기의 부하 변동시 계자를 전기자의 시변자계로부터 차폐하기 위한 구조로서 초전도 동기발전기의 성능에 많은 영향을 미친다. 또한 초전도 동기발전기는 최외각의 자기쉴드를 제외한 모든 구조물이 비자성 재질이고 공극이 매우 크고 전기자와 계자가 공심형 구조를 가지고 있으므로 기존의 발전기보다 누설자속이 큰 특징이 있다. 따라서 댐퍼에서의 시변자계를 고려한 2차원 과도특성 해석으로는 축방향의 누설자속을 고려하지 못하므로 정확한 과도특성 해석을 수행할 수 없다. 그러므로 초전도 동기발전기의 댐퍼 과도특성을 정확히 해석하기 위해서는 3차원 과도특성 해석이 필수적이다[4], [5].

일반적으로 전자계해석을 위해 많이 사용되는 3차원 유한요소법은 2차원 유한요소법보다 해석시간과 메모리가 과다하게 요구되며 특히 회전자의 이동을 고려할 경우 요소재분할의 어려움을 수반하게 된다. 따라서 이러한 3차원 유한요소 해석의 단점을 보완하고 2차원 유한요소 해석에서 고려하지 못하는 축방향 누설자속에 따른 해의 정밀도 문제를 해결하기 위하여 보정된 2차원 해석모델이 제안되었다.

누설자속의 영향을 고려하는 2차원 해석방법으로는 등가기자력을 이용한 방법, 등가공극을 이용한 방법 등 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 등가공극을 사용하였다[6]. 즉 초전도 동기발전기의 3차원 정자계 해석으로부터 계산된 공극 자속값과 같은 값을 가지는 2차원 정자계 해석에 의한 공극 자속값을 계산하여 이 때의 공극길이만큼 기존 2차원 해석모델의 공극길이를 증가시킨 보정된 2차원 해석모델을 제시하여 댐퍼의 과도특성 해석에 이용하였다. 일반적으로 초전도 동기발전기처럼 전기자와 계자가 모두 공심형 구조를 가지는 경우 누설자속이 매우 커지므로 축방향으로의 물

리적 양이 일정하다고 가정하는 2차원 해석으로는 해의 정밀성을 보장할 수 없다. 따라서 보정된 2차원 해석모델을 사용하면 기존의 2차원 해석모델에서는 알 수 없는 축방향 누설자속의 영향을 고려할 수 있을 뿐 아니라 회전자의 이동을 수행해야 하는 3차원 유한요소법에 의한 과도특성 해석시의 단점인 계산시간 및 계산용량의 문제를 동시에 해결할 수 있다[7].

본 논문에서는 무부하 상태에서 발전기를 정격속도로 운전하면서 3상 단락사고가 발생한 경우 초전도 댐퍼에 발생하는 와전류 손실의 특성을 해석하였다. 발전기는 단락사고 발생전에는 정상상태로 운전하고 있고 단락사고 전후의 발전기 회전속도는 변하지 않는 것으로 하였다. 또한 초전도 동기발전기의 외부댐퍼 두께 및 재질특성을 변화시켜 내부댐퍼에 유기되는 와전류와 외부댐퍼의 유무에 따른 내부댐퍼의 와전류 손실을 정량적, 정성적으로 해석하였다. 해석결과로부터 외부 댐퍼의 주역할 및 내부 댐퍼의 과도특성을 잘 파악할 수 있었다. 또한 논문에서 제시한 보정된 2차원 해석모델에 대한 유한요소 해석의 정밀성을 검증하기 위해서 무부하 1,800rpm 운전시 초전도 동기발전기의 전기자 권선 유기기전력에 대해서 해석결과와 실험결과를 서로 비교하였다[8].

2. 해석 모델 및 유한요소 정식화

2.1 해석모델

그림 1은 본 논문의 해석에 사용된 회전계자형 30KVA 초전도 동기발전기로서 한국전기연구소에서 설계, 제작되었으며 구조상 크게 초전도 계자권선부분, 회전자 차폐부분, 전기자 권선부분, 자기쉴드 부분으로 나눌 수 있다. 그림에서처럼 초전도 계자권선은 레이스트랙형으로 회전자 극저온용기 내부에 들어 있으며, 4~5K의 초저온으로 유지되어야 하므로 회전자 축의 냉각채널을 통해 들어오는 액체헬륨으로 냉각되며 발전기의 계자권선에 공급된 액체헬륨(LHe)은 기화(GHe)하여 다시 바깥으로 빠져나오게 된다. 또한 극저온용기는 크게 계자권선을 지지하고 기계적 축입력을 지탱하는 토크관, 내부댐퍼관, 외부 댐퍼관으로 구성되어 있고, 각 관 사이에는 진공층 또는 헬륨가스층으로 되어 있다.

회전자 차폐부분에는 계자권선을 극저온으로 유지하기 위한 열적, 자기적 이중 댐퍼가 설치되어 있다. 내부댐퍼는 열적 차폐막으로서 액체헬륨이 저장되는 내부(4.2K)와 극저온용기 외부(300K)의 온도차이로 인한 복사 열손실을 방지하기 위한 것으로 외부댐퍼와 내부댐퍼 사이에는 진공으로 단열되어 있다. 외부댐퍼는 전기자에서의 불평형전류, 단락사고, 부하변동 등에 의한 과도상태시 비동기자속이 회전자에 인가되면 초전도 계자권선에 손실이 발생하며 이로 인해 퀜치현상을 초래하므로 이를 막아주는 전자차폐막 역할을 하고 기계적인 변동시에 회전자의 진동을 감소시키는 역할을 한다. 댐퍼는 일반적으로 도전율이 높은 구리와 같은 재료를 사용한다.

기존의 발전기는 계자권선으로 동선을 사용하므로 발생되는 자속밀도 값은 그리 크지 않으며 계자에서 발생된 자속을 집중하고, 전기자권선을 지지하기 위해서 치, 슬롯 구조의 철심을 이용하지만, 초전도 발전기의 경우 계자에서 발생되는 자속밀도 값은 상당히 커서 전기자에 철심을 사용할 경우 포화가 일어나므로 이를 해결하기 위해서 철심이 없는 구조를 사용하며 치, 슬롯 구조를 가지는 비자성체를 이용하여 전기자 권선을 지지하고 있다. 또한 전기자 권선의 외측에 성층 철심 또는 도체로 된 자기쉴드를 배치하여 발전기의 외부로 누설되는 강한 자계를 차폐하고 동시에 전기자 권선의 자속밀도를 증가시킨다.

그림 2는 초전도발전기 2차원 해석단면을 나타내고 있다. 기존의 발전기 구조와 달리 내부 및 외부 댐퍼의 구조를 가지고 있으며 초전도 계자 권선에는 비자성 재질인 보빈이 설치되어 있다. 해석모델의 주기성을 고려하여 1극분인 1/4 모델을 해석하였다.

표 1은 초전도 발전기의 제원을 나타내고 있으며 전기자는 일반 구리동선으로 매극 매상당 슬롯수 3, Y결선의 2층권 구조이고 단절계수가 7/9인 단절권으로 권선되어 있다.

2.2 유한요소 정식화

2.2.1 3차원 정자계문제

3차원 정자계 해석[9]을 위해 자기스칼라포텐셜(Ω)을 계변수로 사용하여 자계의 세기를 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\vec{H} = \vec{T} - \nabla\Omega \tag{1}$$

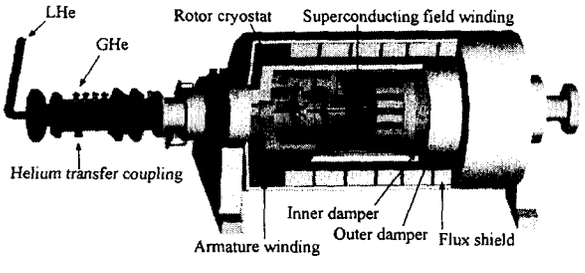


그림 1 30KVA 초전도 동기발전기의 구조
Fig. 1 Structure of 30KVA SCG

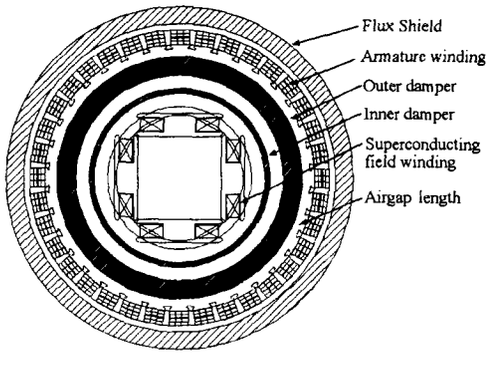


그림 2 30KVA 초전도 동기발전기의 2차원 모델
Fig. 2 2-D model of 30KVA SCG

표 1 30KVA 초전도 동기발전기의 제원
Table 1 Specifications of 30KVA SCG

전기자		계자	
정격출력	30/3 ϕ[kVA]	극당턴수	532
정격속도	1,800[rpm]	선재종류	NbTi
주파수	60 [Hz]	정격전류	200 [A]
상당극당턴수	18	극수	4
슬롯수	36	내부댐퍼 축방향길이	319.7 [mm]
슬롯당 도체수	12	내부댐퍼 내반경	136.5 [mm]
자기쉴드 비투자율	1000	내부댐퍼 외반경	144.5 [mm]
전기자 내반경	213 [mm]	외부댐퍼 축방향길이	550 [mm]
전기자 외반경	250 [mm]	외부댐퍼 내반경	166 [mm]
		외부댐퍼 외반경	196.5 [mm]
권선 유효길이	192 [mm]	내부 및 외부댐퍼 재질	구리

여기에서 $\vec{T}$는 입력전류밀도 $\vec{J}$를 표현하는 임의의 함수로서 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\nabla \times \vec{T} = \vec{J} \tag{2}$$

따라서 맥스웰 방정식 가운데 자속의 연속식에 식(1)을 대입하여 지배방정식을 유도하면 식 (3)과 같다.

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

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

$$[S][\Omega] - [F] = 0 \tag{4}$$

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

2.2.2 2차원 시변장 문제

자기벡터포텐셜이 오직 Z방향 성분만을 갖고, 2차측 도체의 단부는 단락되었으며 자성체가 등방성이라고 가정하면, 2차원 유한요소법의 지배방정식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 μ 는 투자율, A 는 자기벡터포텐셜, J_0 는 입력전류밀도, J_e 는 회전자에 유기되는 와전류 밀도로서 이동좌표계를 사용하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다 [10].

$$J_e = -\sigma\frac{dA}{dt} \tag{6}$$

여기서 σ는 댐퍼의 도전율을 나타낸다.

해석영역을 1차 삼각요소로 분할하고 요소 내에서의 자기벡터포텐셜은 선형적으로 변한다고 하면, 요소내에서의 근사값 $A^{(e)}$ 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A^{(e)} = \sum_{i=1}^{3} N_{ie}(x, y) A_{ie} \tag{7}$$

여기서 요소형상함수 $N_{ie}(x,y) = \frac{1}{2\Delta^e}(b_{ie} + c_{ie}x + d_{ie}y)$, Δ^e 는 삼각요소의 면적이며 b_{ie}, c_{ie}, d_{ie} 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b_{ie} = x_{je}y_{ke} - x_{ke}y_{je} \quad ,$$

$$c_{ie} = y_{je} - y_{ke} \quad ,$$

$$d_{ie} = x_{ke} - x_{je} \quad \text{(i, j, k는 순환수)} \tag{8}$$

요소내에서의 근사함수 $A^{(e)}$ 를 식 (5)에 대입하고 Gelerkin법을 사용하여 각 요소에 대해 정식화하면 식 (9)와 같은 행렬로 나타낼 수 있으며 요소행렬의 계수값은 식 (10), (11), (12)와 같다.

$$[S]^e[A]^e + [C]^e\frac{d}{dt}[A]^e + [Q]^e[I]^e = [0] \tag{9}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{4\mu\Delta^e}\begin{bmatrix} c_1c_1 + d_1d_1 & c_1c_2 + d_1d_2 & c_1c_3 + d_1d_3 \\ c_2c_1 + d_2d_1 & c_2c_2 + d_2d_2 & c_2c_3 + d_2d_3 \\ c_3c_1 + d_3d_1 & c_3c_2 + d_3d_2 & c_3c_3 + d_3d_3 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$C_{ij} = \frac{\sigma\Delta^e}{12}\begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$Q_i = \mp\frac{N\Delta^e}{3S}\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

Y결선의 초전도 발전기가 저항 및 인덕턴스의 직렬 부하와 연결되어 있다고 가정하면 이때 발전기의 전기자에 대한 회로 방정식은 식 (13)로 주어진다.

$$E_p = R_p i_p + L_o\frac{di_p}{dt} + V_p \tag{13}$$

여기서 첨자 p는 전기자 a, b, c상을 나타내고 E_p 는 각 상 권선의 유기기전력, R_p 는 상저항, L_o 는 전기자 코일단의 누설인덕턴스, i_p는 상전류, V_p는 상전압을 나타낸다.

본 논문에서는 전기자 권선에 쇄교하는 자속의 시간에 따른 변화율로서 유기기전력을 계산하였으며 이 때 턴수 N의 전기자 권선에 유기되는 기전력은 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= -N\frac{d\phi}{dt} \\ &= -N\frac{d}{dt}\int_s \vec{B}\cdot d\vec{s} \\ &= -N\frac{d}{dt}\int_s (\nabla\times\vec{A})\cdot\vec{s} \\ &= -N\frac{d}{dt}\oint_c \vec{A}\cdot d\vec{l} \\ &= -N\frac{d}{dt}\oint_c (\vec{A}^{+} - \vec{A}^{-})\,l \end{aligned} \tag{14}$$

여기서 l은 전기자철심의 z방향의 적층폭, A+, A-는 서로 같은 권선을 구성하고 있고 슬롯에서의 방향이 서로 반대인 자기벡터 포텐셜의 평균치로서 식 (15)와 같다.

$$A^{+}, A^{-} = \frac{1}{S}\int_s A\,dx\,dy \tag{15}$$

식 (9)와 식 (13)의 전압방정식을 결합하고, 시간미분항을 처리하기 위해 후퇴차분법을 이용하면 계방정식은 식 (16)과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} [S]+\frac{1}{\Delta t}[C] & [Q] \\ \frac{1}{\Delta t}[F] & [R]+\frac{[L]}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\}^{t+\Delta t} \\ \{I\}^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta t}[C] & [0] \\ \frac{1}{\Delta t}[F] & \frac{[L]}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\}^{t} \\ \{I\}^{t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0] \\ [V]^{t+\Delta t} \end{bmatrix} \quad (16)$$

회전자의 이동시 매시간스텝에서 요구되는 전 해석영역의 요소 재분할 없이 효과적으로 2차원 과도특성 해석을 수행하기 위해서 이동요소분할법을 이용하였다.

3. 해석 결과

3.1 보정된 2차원 해석모델의 유도

초전도발전기는 공극이 매우 크고 또한 전기자와 계자가 모두 공심형 구조로 이루어져 있으므로 철심을 사용하는 기존의 발전기에 비해 상당히 큰 누설자속을 가지고 있다. 따라서 축방향으로의 물리적 양이 동일하다고 가정하는 2차원 해석으로는 축방향 누설자속을 고려할 수 없으므로 해의 정밀성을 확보할 수 없고 3차원 해석이 필수적이다. 그러나 3차원 유한요소법이 경우 해석모델의 선처리과정이 복잡하며 또한 과도특성 해석시 회전자의 이동에 따른 요소재분할이 요구되므로 계산시간 및 계산용량이 증가하게 된다. 그러므로 이러한 3차원 유한요소 해석의 단점을 보완하고 2차원 유한요소 해석에서 고려하지 못하는 축방향 누설자속에 따른 해의 정밀도 문제를 해결하기 위하여 등가공극을 이용하여 보정된 2차원 해석모델이 제안되었다. 이 방법은 해석모델의 3차원 정자계 해석으로부터 전기자 권선을 쇄교하는 자속값과 같은 값을 가지는 2차원 정자계 해석에 의한 자속값을 계산하여 이 때의 계산된 등가공극 길이만큼 기존의 2차원 모델의 공극 길이를 증가시켜 보정된 2차원 모델을 얻게 된다.

그림 3은 등가공극을 계산하기 위한 3차원 정자계 해석모델의 유한요소 분할도이다. 전체 절점수는 21,317이고, 사면체 요소수는 116,624이다. 계자의 초전도 코일은 레이스트랙 형태로서 모델링되었으며 전기자 권선의 단부는 모델링하지 않고 중심에서의 쇄교자속 값을 해석하였다.

그림 4는 초전도 발전기에서 3차원 정자계 유한요소해석에 의한 x-z평면에서의 자속분포도이다. 그림에서처럼 계자코일의 단부에서 많은 누설자속 성분을 볼 수 있으며 초전도 발전기와 같이 공심형 구조에서는 2차원 해석시 해의 오차가 증가하게 된다.

그림 5는 공극길이 변화에 따른 2차원 및 3차원 유한요소해석에 의한 전기자 권선에 쇄교하는 자속의 비교를 나타내고 있다. 그림에서 3차원 해석의 경우 누설자속으로 인해 2차원 해석보다 쇄교 자속의 양이 적음을 알 수 있으며 기존 모델(전기자 권선 중심반경 228 mm)의 3차원 해석에서 계산된 자속과 같은 값을 가지는 2차원 해석에 의한 자속(전기자 권선 중심반경 257.1 mm)은 2차원 해석모델의 공극길이를 증가시키면 알 수 있다. 기존 해석모델의 공극길이는 16.5[mm]이고 등가공극을 이용한 보정된 해석모델의 공극길이는 44.6[mm]이다.

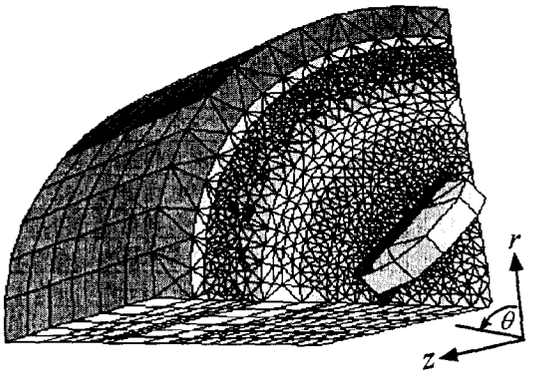


그림 3 3차원 유한요소 분할도
Fig. 3 3D finite element mesh of analysis model.

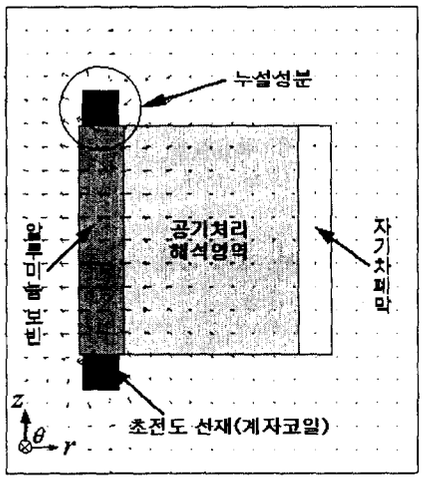


그림 4 r - z 평면에서 자속의 벡터분포도
Fig. 4 Vector distribution of flux density on the r - z plane

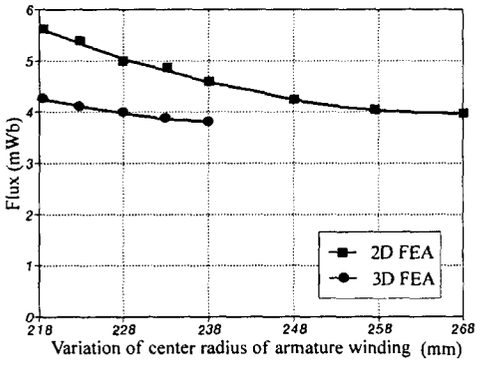


그림 5 전기자 권선 중심에 쇄교하는 자속에 대한 2차원 및 3차원 유한요소해석의 비교
Fig. 5 Comparison of linkage flux at the center of armature winding between 2D FEA and 3D FEA

보정된 2차원 해석모델의 타당성을 검증하기 위해서 정격속도에서 전기자 코일에 유기되는 유기기전력의 실험치와 해석치를 비교하였다. 그림 6은 30KVA 초전도발전기의 실험장치이다. 계자코일은 초전도마그네트용 전원장치로부터 직류전류를 공급받아 여자되며 정격속도 1800 rpm에서 전기자의 3상을 개방하여 유기되는 기전력을 측정하였다.

그림 7은 보정된 2차원 해석모델에 의한 무부하시 전기자의 3상 권선에 유기되는 기전력을 나타내고 있다. 해석결과 유기기전력의 최대값은 187.9[V]이고 3상의 위상차는 120 °이다. 그림 8은 전기자권선 한상에 유기된 선간전압에 대해 보정된 해석모델의 2차원 유한요소해석 결과와 기존모델의 실험치를 나타내고 있다. 보정하지 않은 기존모델(model 1)의 최대값은 405.6 [V]이고 보정된 해석모델(model 2)의 값은 325.8[V]이며 실험치는 306.1[V]로서 실험치와의 최대오차는 기존모델이 32.5[%], 보정된 해석모델이 6.4[%]이며 보정된 모델에 의한 해석이 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 보정된 2차원 해석모델을 이용하는 것이 축방향으로의 누설자속이 많은 초전도 발전기에 대한 해의 정밀도 향상을 위해 효과적임을 알 수 있다.

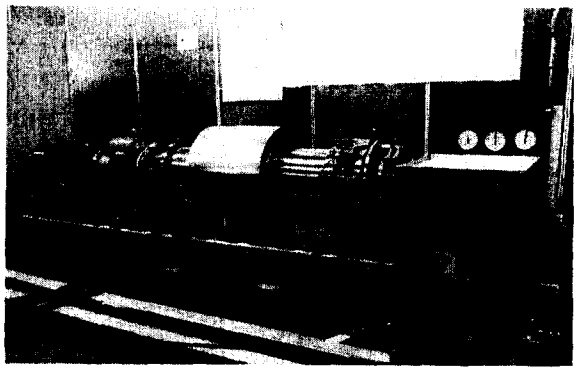


그림 6 30KVA 초전도 발전기의 실험세트
Fig. 6 The experimental set of 30KVA SCG

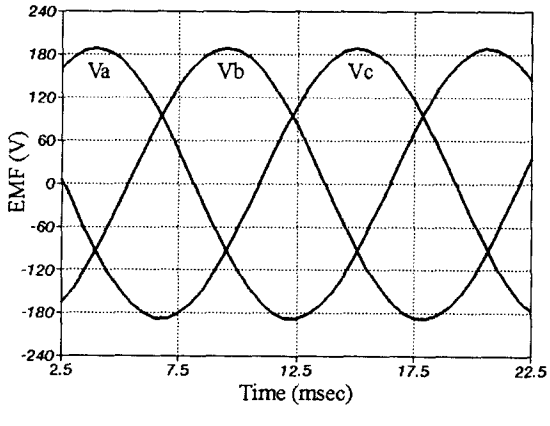


그림 7 무부하시 전기자의 3상 권선에 유기된 유기기전력
Fig. 7 The 3 phase EMF in the stator at no load condition

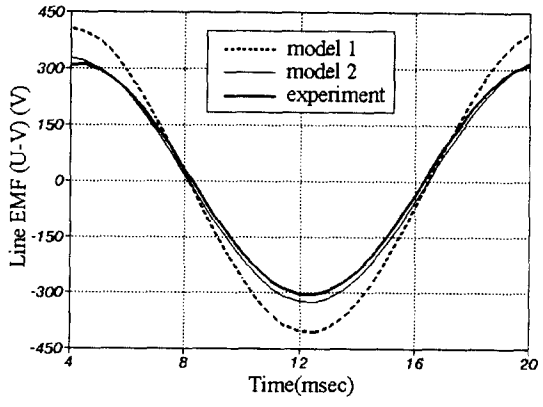


그림 8 유기기전력의 해석치와 실험치 비교
Fig. 8 The comparison of EMF between analysis result and experimental result

3.3 댐퍼에서의 와전류 해석결과

일반적으로 초전도 발전기의 댐퍼는 외부로부터 침투하는 복사열을 차단하고 외부의 시변자속으로 인한 초전도 계자권선의 교류손실을 방지를 위해 설치되며 댐퍼의 역할에 큰 영향을 미치는 것은 재료의 도전율이다. 본 논문의 해석에 사용된 30KVA 초전도 발전기는 전자기적, 열적 댐퍼로서 도전율이 높은 구리를 사용하고 있으며 내부 댐퍼와 외부 댐퍼의 온도 환경이 틀리므로 같은 재질이라도 온도 변화에 따라 다른 도전율을 고려하여야만 한다. 내부 댐퍼의 경우 초전도권선과 저온냉각 시스템을 포함하므로 내부온도를 4K 정도로 보고 보정한 도전율 6.79×107[S/m]을 사용하였고 외부 댐퍼는 상온으로 보고 5.80×107[S/m]을 사용하였다. 본 논문에서는 댐퍼의 과도상태를 크게 두가지로 나누어 보정된 초전도발전기의 2차원 해석모델을 이용하여 계자전류의 초기입력값 0에서 정격값 200[A]의 절반에 이르렀을 때의 댐퍼 특성을 해석하였고, 또한 무부하 상태에서 발전기를 정격속도로 운전하면서 3상 단락사고가 발생하는 경우 초전도 발전기의 내부 및 외부댐퍼에서 발생하는 와전류 손실 특성을 외부 댐퍼의 재질 및 두께 변화에 대해서 해석하였다. 발전기는 단락사고 발생전에는 정상상태로 운전하고 있으며 단락사고 전후의 발전기 회전속도는 변하지 않는 것으로 하였다. 따라서 단락시 발전기의 부하저항 및 부하 인덕턴스는 모두 0으로 하였다.

그림 9와 그림 10은 댐퍼의 역할을 알아보기 위해서 계자의 입력 여자전류값이 초기 0에서 정격값 200 [A]의 절반에 이르렀을 때의 댐퍼 특성을 와전류를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 나누어 해석한 자속 분포를 나타내고 있다. 그림 9에서는 계자 전류값이 정격값 200[A]의 절반에서 정상상태로 운전하고 있는 경우 초전도발전기의 자속분포를 나타내고 있으며 회전자 계자자속이 내부, 외부 댐퍼를 지나 고정자까지 잘 쇄교하는 것을 알 수 있다. 그림 10은 계자전류가 초기 입력치 0에서 정격치 200[A]의 절반에 이르렀을 때 댐퍼의 와전류를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 자속분포를 보여주고 있다. 그림에서처럼 와전류를 고려

할 경우 내부 댐퍼가 계자내부의 시변 자속을 차단하여 전기자 쪽으로 쇄교하는 자속이 그림 9의 정상상태와 비교하여 감소함을 알 수 있으며 댐퍼의 와전류를 고려하지 않을 경우 자속은 정상상태와 마찬가지로 전기자까지 잘 쇄교함을 알 수 있다.

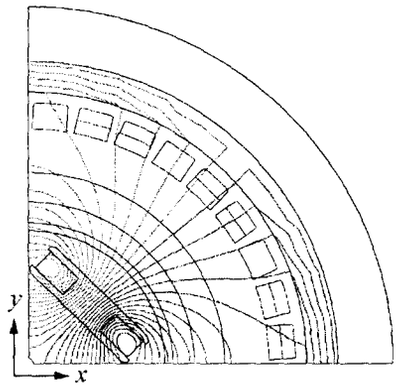
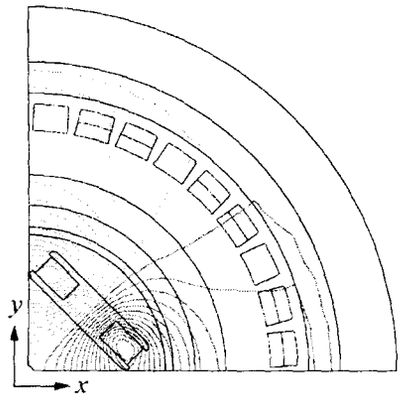
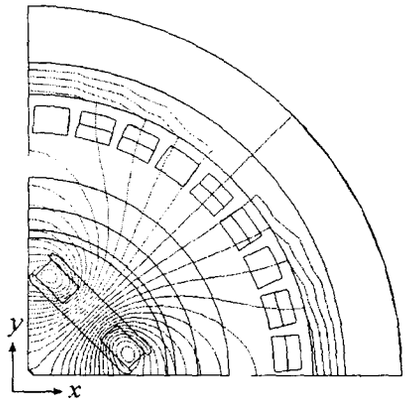


그림 9 정상상태시 초전도 발전기의 자속분포도
Fig. 9 Flux distribution in the steady state



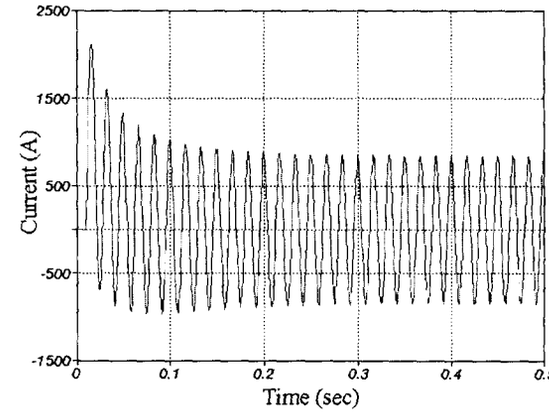
(a) 와전류 있는 경우



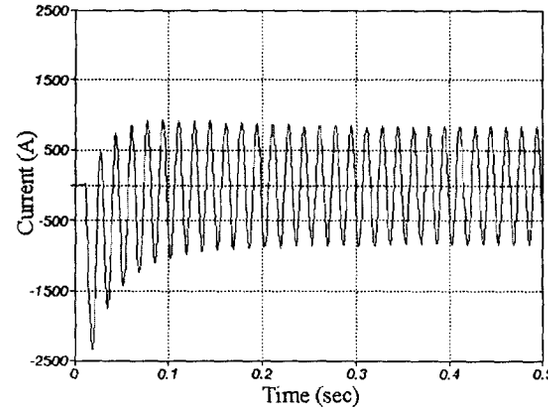
(b) 와전류 없는 경우

그림 10 계자전류의 과도상태시 초전도 발전기의 자속분포도
Fig. 10 Flux distribution in the transient state.

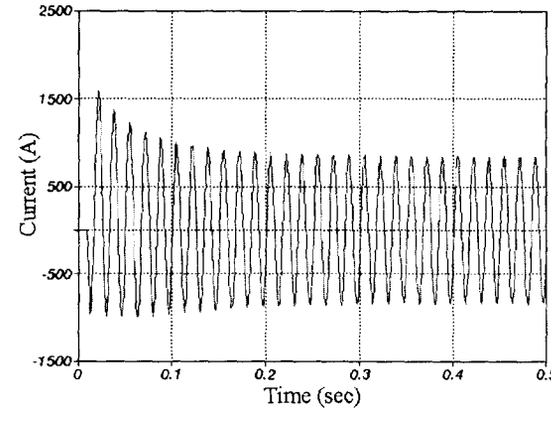
그림 11은 무부하 정상상태 운전시 3상 단락사고가 발생한 경우 초전도 발전기의 a, b. c상에 흐르는 부하전류를 나타내고 있다. 처음 0.01초까지 단락사고로 인해서 정상상태보다 높은 전류가 흐르다가 이후 서서히 정상상태로 바뀌는 것을 볼 수 있다.



(a) a상



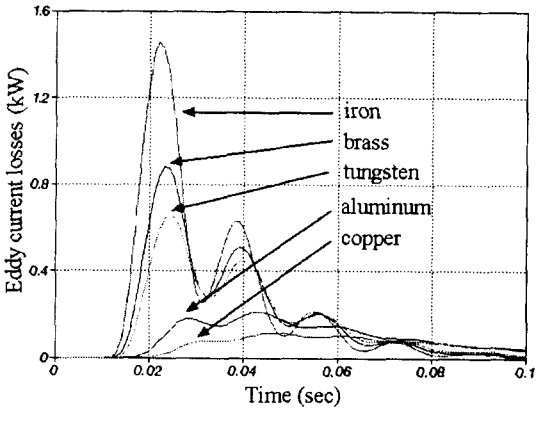
(b) b상



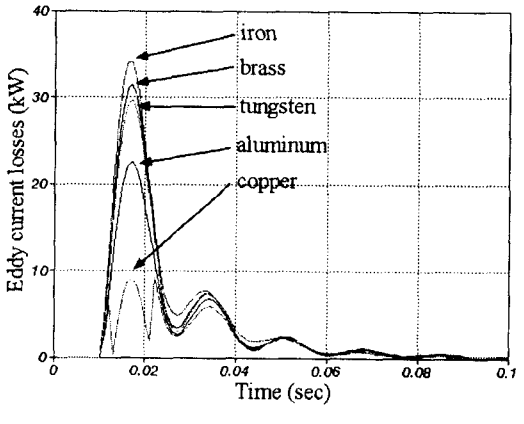
(c) c상

그림 11 3상 단락사고 발생시 부하전류 특성
Fig. 11 Load current characteristic in the 3 phase short

그림 12 (a)는 3상 단락사고가 발생한 경우 외부댐퍼의 도전율 변화에 따른 내부댐퍼(구리: 6.79×10^7(S/m))에 유기되는 와전류 손실 특성을 나타내고 있다. 외부 댐퍼로는 각각 구리(σ : 5.80×10^7(S/m)), 알루미늄(σ : 3.82×10^7 (S/m)), 텅스텐(σ : 1.82×10^7(S/m)), 황동(σ: 1.5×10^7 (S/m)), 철(σ : 1.03×10^7(S/m))을 사용하였다. 그림에서처럼 내부댐퍼에 유기되는 와전류 손실은 외부댐퍼의 도전율이 높은 물질일수록 감소함을 알 수 있다. 이는 외부댐퍼에서 1차적으로 외부 변동자계를 차폐하기 때문이며 초전도 발전기에서는 2중 구조의 댐퍼를 사용하는 것이 외부 변동자계를 효과적으로 차폐한다는 것을 알 수 있다. 그림 12(b)는 3상 단락사고 발생시 외부댐퍼의 재질 변화에 따라 외부댐퍼 자체에 발생하는 와전류 손실 특성을 나타내고 있으며 그림에서 도전율이 높은 재질의 경우 와전류 손실 또한 증가함을 알 수 있다. 따라서, 도전율이 높은 재질의 외부댐퍼 사용시 와전류손실에 의해 발생하는 내부댐퍼의 줄열을 감소시킬 수 있으며, 이에 따라, 계자권선을 초전도 상태로 유지하기 위한 냉각시스템의 비용도 줄일 수 있다.



(a) 내부 댐퍼의 와전류 손실



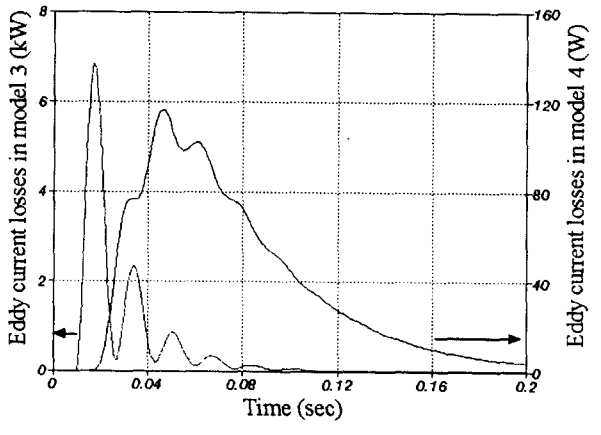
(b) 외부 댐퍼의 와전류 손실

그림 12 외부댐퍼의 도전율 변화에 따른 댐퍼에 유기되는 와전류 손실 특성

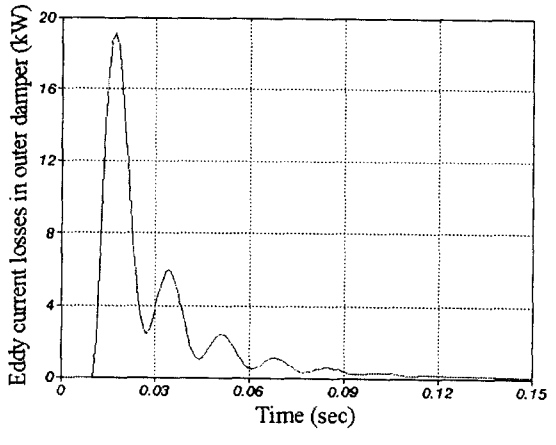
Fig. 12 Eddy current in the dampers according to the variation of the outter damper conductivity.

그림 13 (a)는 초전도 발전기에서 외부댐퍼의 역할을 알아보기 위해서 외부댐퍼가 있는 경우(model 4)와 없는 경우(model 3)로 나누어서 3상 단락사고 발생시 내부댐퍼에서 발생하는 와전류 손실을 나타내고 있다. 외부댐퍼가 있는 경우 내부댐퍼에서 발생하는 와전류손실이 외부댐퍼가 없는 경우보다 약 50배 정도 감소하였으며 따라서 내부댐퍼에 유기되는 와전류 손실을 효과적으로 저감시키기 위해서는 외부댐퍼의 구조가 필요함을 알 수 있다. 그림 13(b)는 3상 단락사고 발생시의 외부 댐퍼에서 발생하는 와전류 손실을 나타내고 있다. 단락사고가 발생한 초기에 급격히 와전류 손실이 증가하였다가 이후 점차 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 14 (a)는 3상 단락사고시 외부댐퍼의 두께변화에 따라 내부댐퍼에 유기되는 와전류 손실 특성을 나타내고 있다. 기존 모델(두께: 15 mm)보다 외부댐퍼의 두께를 감소시킨 경우(두께: 7.167mm, 6.5mm)와 증가시킨 경우(20.5mm, 40.5mm, 50.5mm)로 나누어 해석하였다.



(a) 내부 댐퍼의 와전류 손실

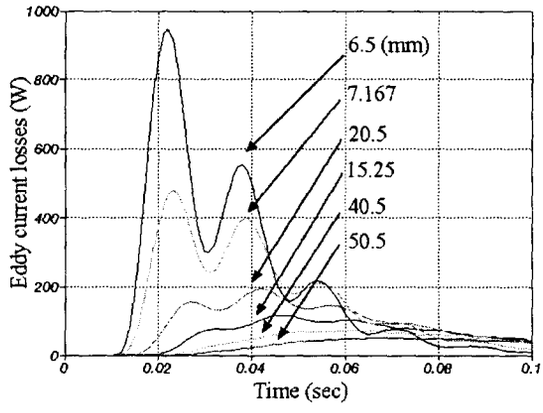


(b) 외부 댐퍼의 와전류 손실

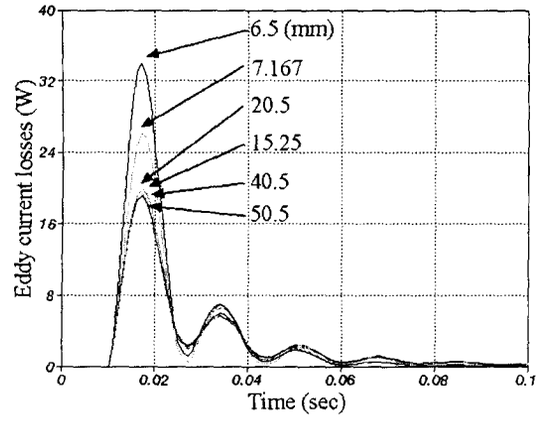
그림 13 외부댐퍼의 유무에 따른 3상 단락사고시 댐퍼에서 발생하는 와전류손실

Fig. 13 Comparison of eddy current loss in the dampers between two cases, without outer damper(model3) and with outer damper(model 4) respectively.

그림에서와 같이 외부댐퍼의 두께를 증가시킨 경우 내부댐퍼에 발생되는 와전류 손실이 감소함을 알 수 있었다. 그림 14(b)는 3상 단락사고시 외부댐퍼에서 발생하는 와전류 손실 특성을 나타내고 있다. 두께가 6.5mm인 경우 와전류 손실이 가장 크게 발생하는 것을 알 수 있다.



(a) 내부 댐퍼의 와전류 손실



(b) 외부 댐퍼의 와전류 손실

그림 14 3상 단락사고시 외부댐퍼의 두께에 따른 댐퍼에 유기되는 와전류 손실

Fig. 14 Eddy current loss in the inner damper according to the variation of the outter damper width

4. 결 론

본 논문에서는 이중 댐퍼 구조를 가지는 초전도발전기에서 무부하 정상상태 운전에서 3상 단락사고가 발생하였을 때의 댐퍼의 와전류 손실 특성을 2차원 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 초전도 발전기의 공심형 구조와 같은 특징 때문에 3차원 해석이 필수적이나 보정된 2차원 해석 모델을 적용하여 효과적인 해석을 수행할 수 있었다. 2차원 해석단면에 수직한 방향의 누설자속을 고려하여 공극 길이를 증가시킨 2차원 보정모델을 제안하였고 보정모델의 유효성을 검토하기 위해 유기기전력의 해석결과를 실험결과와 비교한 결과 최대오차가 6.4%인 양호한 해석정밀도를 얻었다. 또한 2차원 보정모델에서 3상 단락사고 발생시 외부 댐퍼의 재질 및 두께 등의 파라메터를 변화시켜 내부댐퍼와 외부댐퍼의 와전류 손실 특성을 정량적, 정성적으로 알아 보았다.

본 연구결과, 초전도발전기와 같이 유효공극이 큰 전기기기의 해석에서 제안한 2차원 보정모델은 계산용량 및 계산시간 등의 단점으로 적용이 곤란한 3차원 과도해석의 보조적인 수단으로 유효하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 정보통신부의 정보통신 우수 시험학교 지원 사업에 의하여 수행된 연구결과 입니다.

참 고 문 헌

[1] J. L. Smith, Jr., "Overview of the development of superconducting synchronous generators," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 19, no. 3, pp. 522-528, 1983.

[2] 한송엽, "초전도 교류발전기의 개발현황과 문제점," 대한기계학회지, vol. 27, no. 3, pp. 180-186, 1987.

[3] J. Kirthey, and M. Furuyama, "A design concept for large superconducting a.c. generator," *IEEE PAS-94*, no. 4, pp. 1264-1269. 1975.

[4] 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.

[5] P. G. Therond, O. Moreau and C. Kieny, "3D electromagnetic model of a full superconducting generator," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 28, no. 2, pp. 1398-1401, 1992.

[6] 한필완, 전연도, 이주, 이관섭, "유효한 2차원 모델을 이용한 리니어 브레이크 성능 해석," 98년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 601-607, 1998.

[7] 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", *Proceedings of ICEE*, vol. I, pp. 772-775, 1998.

[8] 조영식, 홍정표, 이주, 권영길, 류강식, "설계변수 변화에 따른 초전도 동기 발전기의 유기기전력 특성," 99년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, vol. 1, pp. 65-69, 1999.

[10] K. Muramatsu, T. Nakata, N. Takahashi and K. Fujiwara, "Comparison of coordinate systmes for eddy current analysis in moving coordinates," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 28, no. 2, pp. 1186-1189, 1992.

저 자 소 개

전 연 도(全 衍 度)

1970년 3월 4일 생. 1996년 한양대 전기공학과 졸업. 1998년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2290-0342

E-mail : ydchun@hymail.hanyang.ac.kr

이 형 우 (李 衡 雨)

1974년 1월 11일 생. 1998년 한양대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 02-2290-0349

E-mail : karussel@hymail.hanyang.ac.kr

이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공박). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 공대 전자전기공학부 전임강사.

Tel : 02-2290-0342

E-mail : julee@email.hanyang.ac.kr

홍 정 표 (洪 正 杓)

1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1996년 한양대 산업과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수

Tel : 0551-279-7517

E-mail : jphong@sarim.co.kr

권 영 길 (權 永 吉)

1959년 7월 28일생, 1982년 부산대 기계공학과 졸업, 1984년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1990년 동 대학원 기계공학과 졸업(공박), 1990년~1991년 한국기계연구원선임연구원, 현재 한국전기연구소 초전도 응용연구그룹 그룹장

류 강 식 (柳 康 植)

1956년 8월 20일 생, 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공박), 현재 한국전기연구소 전략기술연구단 단장