한국소음진동공학회 2012년 추계학술대회논문집, pp. 476~481

발전기 고정자의 진동특성을 위한 전처리기 프로그래밍

Pre-processor programing for the vibrational characteristic of generator's stator

안창기†· 배용채*·함지웅**·이동원***

Chang-Gi Ahn†, Yong-Chae Bae, ji-woong Ham and Dong-Woen Lee

Key Words : Generator(발전기), FEA(유한요소해석), Excitation Force(가진력), Frequency Response Analysis (주파수응답해석), Stator End Windings(고정자 권선)

ABSTRACT

A plant's generator system under operating condition has been suffered the vibration from the excitation force with 120Hz. The vibration is generated in the stator end windings. For analyze dynamic characteristics of the generator's stator, its finite element model were obtained using ANSYS software package for modal and harmonic analysis. we compare the analysis result with experimental data. The results show that the resonance frequency, which is related with second ecliptical mode on the stator end windings 129Hz. The experimental results are good agreement with the FEA model.

1. 서 론

현재 가동 중인 발전기는 발전소에서 매우 중요한 설비로서 주기적인 위상차가 서로 다른 진동으로 인하여 허용 진동(진폭)이 높은 수준이다. 이러한 높은 진동상태가 지속될 경우, 발전기 구조물은 피로에 의한 균열까지 발생될 수 있는 것으로 예상되기 때문에 이를 위하여 발전기의 운전조건에 대한 구조적 동특성을 파악하고 진동 저감을 위한 대안을 모색하고자 한다.

또한, 여러 대안 조건에 대하여 발전기 고정자 권선 단말부의 진동 저감상태를 주파수응답해석을 통하여 비교 및 분석함으로써 발전기 고정자 구조물의 건전성을 확보하고자 한다.

현재 185MW급 발전기는 국내의 발전소에서 사용하고 있는 매우 핵심적인 발전 설비로서 전기를 생산하는 역할을 담당하고 있다. 따라서 발전기는 해당 용량에 따라 발전기의 크기와 외형적 형상이 다소 상이하게 보이지만, 내부 회전체의 구조적 형상과 고정자 권선의 외형은 매우 유사한 구조적 형상을 지니고 있다. 일반적으로 국내에서 주로 운전중인 발전기는 여러 제작사(GE, Kitachi, Alstom등)에 의하여 만들어졌으며 대부분의 발전기는 회전자와 고정자로 나눌 수 있고 고정자는 몸체(Frame), 고정자의 철심, 권선과 권선의지지 구조물 및 헤더 등으로 구성되어 있다. 그리고 고정자 권선은 스페이서(spacer block)를 이용하여 끈으로 고정하고 있으며지지 링(Supporters of ring type)으로 권선을 지지하고 있는 형태이다.

발전기의 구조적 형상에서 알 수 있듯이 운전 중에는 로터의 회전에 의하여 유도기전력이 발생되고 3상(3-phase) 발전기의 경우는 로터가 1회전(Cycle)시 120도의 위상차를 나타내는 기전력이 발생하는 것으로 알려져 있다. 즉, 로터의 가진 주파수(회전주파수)에 의하여 고정자 권선과 권선의 단말 부에는 주기적인 진동을 유발시키며 피로에 의한 균열까지 발생될 수 있으므로 이러한 사고를 예방하기 위해서는 먼저 해당 발전기의 고정자 및 권선이 가지는 고유진동수를 파악하여야 하고 해당 고정자 구조물의 고유진동 주파수는 가급적 가진 주파수의 영역에 존재하지 않도록 하여야 한다.

† 안창기 ; 정회원, 충남대학교 기계공학과
E-mail : shckan@gmail.com
Tel : 010-8802-7899
* 전력연구원
** 충남대학교 기계공학과
*** GS EPS(주) / 정비운영팀

그러므로 발전기의 구조적 건전성을 확보하기 위해서 보다 경제적인 방법으로 알려진 유한요소해석(Finite element analysis)을 이용하여 해당 발전기의 시험에 의한 동특성 결과를 평가하고 여러 구조적 변경 조건을 적용하여 현재의 진동상태보다 안정된 발전 설비를 구축하고자 한다.

2. 2장 제목

2.1 이론적 배경

발전기 고정자에 대한 진동특성은 강성행렬을 이용하여 자유진동해석 및 조화응답해석을 수행할 수 있다.

자유진동해석을 위한 기본 운동방정식은 아래 식 2-1과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=\{0\} \qquad 2\text{-}1$$

$$\{u\}=\{\phi\}_i \cos\omega_i t \qquad 2\text{-}2$$

여기서,

$\{\phi\}_i$	=	i-th Eigenvector
ω_i	=	i-th Natural circular frequency
t	=	Time

위의 식으로부터 i번째 고유진동수(ω_i)를 구하기 위해서 식(2-2)을 식(2-1)에 대입하고 이를 $f_i(Hz)$로 나타내면 식(2-3)과 같다.

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \qquad 2\text{-}3$$

따라서 식2-3과 같이 고유진동수를 구하여 발전기 권선 단말부의 법선방향으로 적용된 하중을 이용하여 감쇄가 있는 상태의 조화응답해석을 수행할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F^a\} \qquad 2\text{-}4$$

여기서,

[M]	=	Structural mass matrix
[C]	=	Structural damping matrix
[K]	=	Structural stiffness matrix
$\{\ddot{u}\}$	=	Nodal acceleration vector
$\{\dot{u}\}$	=	Nodal velocity vector
$\{u\}$	=	Nodal displacement vector
$\{F^a\}$	=	Applied load vector

$$\{u\}=\{u_{\max}e^{i\phi}\}e^{i\Omega t} \qquad 2\text{-}5$$

$u_{\max}$	=	Maximum displacement
i	=	Square root of -1
Ω	=	Imposed circular frequency
f	=	Imposed frequency
t	=	Time
ϕ	=	Displacement phase shift

$$\begin{aligned}\{F^a\} &= \{F_{\max}e^{i\varnothing}\}e^{i\Omega t} \\ &= \{F_{\max}(\cos\varnothing + i\sin\varnothing)\}e^{i\Omega t} \\ &= (\{F_1\}+i\{F_2\})e^{i\Omega t}\end{aligned} \qquad 2\text{-}6$$

여기서,

$F_{\max}$	=	Force anplitude
ϕ	=	Force phase shift
$\{F_1\}$	=	$\{F_{\max}\cos\varphi\}$=Real force vector
$\{F_2\}$	=	$\{F_{\max}\sin\varphi\}$=Imaginary force vector

식2-5와 식2-6을 정리하면 식2-7과 같은 형태로 쓸 수 있으며 식2-4를 이용하여 조화응답해석을 수행한다.

$$\begin{aligned}&([K]-\Omega^2[M]+i\Omega[C])(\{u_1\}+i\{u_2\}) \\ &=\{F_1\}+i\{F_2\}\end{aligned} \qquad 2\text{-}7$$

2.2 3차원 형상 및 구조

3차원 모델링을 구현하는 작업은 유한요소해석을 위한 전처리 작업에 해당되며 발전기의 구조적 형상을 이해하거나 해당 구조물의 조립상태를 파악하는데 매우 큰 장점을 지니고 있다. 발전기의 구조는 먼지나 습기의 침입방지와 수소가사의 누설을 방지하기 위하여 완전밀폐구조로 되어있으며 냉각매체로 공기, 수소가스, 물을 사용하는 구조로 되어있다. 그러므로 발전기의 주요 구조는 Figure 1에서 나타낸 것과 같이 프레임(Base frame), 하우징(Housing), 고정자(Stator), 회전자(Rotor), 여자기((Exciter), 베어링(Bearing)으로 나눈다.

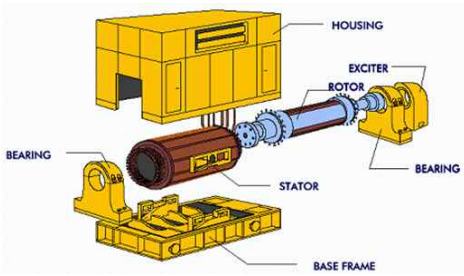

Figure 1. Construction of the turbine generator

발전기 권선의 진동을 저감시키고 고정자의 철심과 권선은 효율적인 형상 구현과 유한요소모델을 위하여 3차원 모델링 전용프로그램(Solidwork 3D CAD S/W)을 사용하여 구조적 형상을 모델링하였다.

발전기를 구성하고 있는 주요 구조물을 포함한 모델을 완성할 때 실제로 측정한 치수를 형상에 반영하여 모델링함으로서 해당 모델의 신뢰성을 확보하였다. 고정자 권선에 대한 그림을 Figure 2에 나타내었고, 이를 바탕으로 완성된 3차원 모델을 Figure 3에 나타내었다.

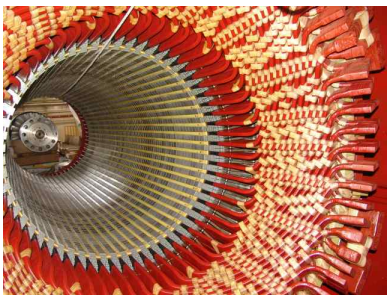

Figure 2. Construction of the stator coil

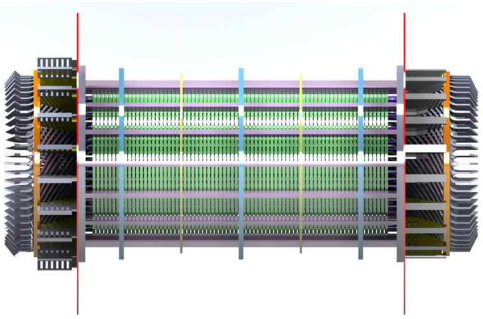

Figure 3. Support system on end winding coil

2.3 유한요소모델

발전기 고정자 구조물에 대한 3차원 유한요소모델링과 동특성해석을 수행하기 위해서는 범용구조해석 프로그램인 엔시스 상용코드(ANSYS V12.1)를 사용하였다.

고정자 철심은 규소강판을 성층 후 원형단면의 긴 막대 형상을 지닌 볼트로 체결되어 있으며 외곽에 고정키로 고정시켜 제작한다. 그러므로 유한요소모델링은 성층을 고려하여 여러 개의 솔리드 요소를 생성함으로써 상대적으로 전단응력이 낮은 고정자 철심을 모델링하였다.

권선은 3차원 모델링의 치수를 바탕으로 절곡 형상을 상세하게 모델링하였으며, 권선 단말부의 안쪽 권선과 바깥쪽권선은 부분적으로 끈으로 묶여 있는 형상을 지니고 있기 때문에 유한요소모델에서는 권선과 권선 사이를 스프링 요소를 사용하여 스프링 상수를 입력할 수 있도록 유한요소모델을 완성하였다. 권선에 대한 유한요소모델은 Figure 4에 현장에 설치된 발전기 권선의 사진과 함께 나타내었다.

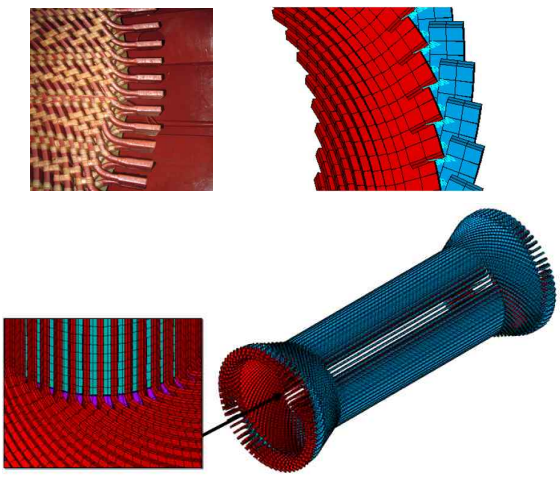

Figure 4. Finite element model of the stator coil

2.4 경계조건 및 해석조건

유한요소모델의 경계조건은 Figure 5와 같이 케이싱과 연결된 압력용 원형 판재(Pressure plate)의 바깥 절점과 고정자 코어에 연결된 원형 프레임 판재의 가장자리 절점들을 고정조건으로 적용하였다. 고정자 코어는 프레임 및 하우징에 상당히 복잡한 형태로 연결되어 있으며 강체 상태로 고정되어 있지 않기 때문에 이러한 점을 고려하여 Figure 6과 같이

고정자 코어의 바깥 원형 판재에 스프링요소를 적용하여 보다 적절한 강성조건을 적용하여 고정조건을 반영하였다.

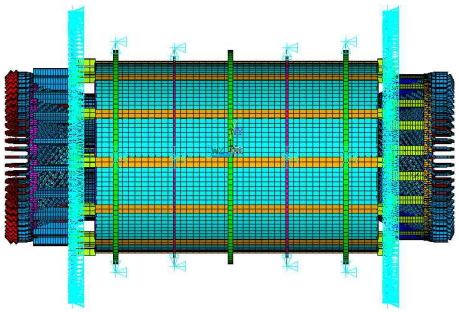

Figure 5. The boundary condition of finite element model of turbine generator

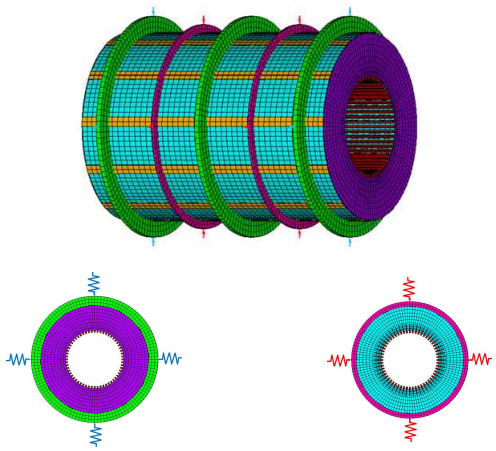

Figure 6. The boundary condition of finite element model of stator core

발전기 고정자 구조물에 대하여 동특성해석을 수행하기 위해 모드 추출방법인 브록란쵸스법(BLock Lanczos method)을 이용하여 발전기의 고유진동수와 모드형상을 도출하였다.

주파수 응답해석은 물체의 거동을 시간영역에서 주파수 영역으로 변환시켜 주파수 별로 동적응답의 크기를 분석하는 기법이다. 따라서 특정한 주파수에서 동적 응답이 큰 진폭(Amplitude)을 나타낸다면 이 물체는 이 주파수 근처에서 구조적으로 취약하다는 것을 암시한다. 이처럼 주파수 응답해석은 발전기의 운전 중 전자력에 의한 주파수별 응답특성을 제공하여 공진 여부를 파악하고 권선에 대한 건전성을 평가하기 위해 수행되었다.

2.5 동특성 검증

3차원 형상을 토대로 한 유한요소모델은 현재 운전 중인 발전기의 환경조건과 동일한 해석조건을 적용하여 타당한 구조물의 동특성을 도출하였는지 확인할 수 있다. 발전기 고정자 권선 단말부의 기계적 건전성을 평가하기 위하여 전력연구원에서 2007년부터 2011년까지 GT 11호기, GT 12호기와 ST 1호기에 대하여 권선에 대한 주파수 응답시험, 권선 단말부의 선형성 시험 및 모드시험, 고정자철심에 대한 모드시험을 수행하였다. 모드시험의 결과자료를 토대로 각 모드의 고유 주파수를 Table 1에 정리하였다. 또한 유한요소모델의 모드 해석 결과가 모드시험 결과와 유사함을 확인하였다.

Table 1 The modal test results of generators

Turbine	Date	Turbine End			Exciter End		
		1 N.D	2 N.D	3 N.D	1 N.D	2 N.D	3 N.D
GT #11	2007	88.7 117	129	165	89.6 114	126 137	-
	2009	88.4 116	124 130	163	89 114	125 140	-
	2011	88.2 116	126 128	163	88.8 113	130 137	149
GT #12	2007	93.1 98.9	130		93.2 119	133 137	-
	2009	91.9 122	128 138	-	97.3 116	122 136	-
	2011	92.2 98.2	129 140	165	98.2 117	134	-
ST #1	2009	94.4	115 128	137 144	108	118 137	147.1
	2011	93	116 127	134	108	118 137	-
FEM Analysis Results		93.3	129.3	132.2	107.3	138.3	141.8

2.6 대안수립 및 주파수 응답결과

고정자 권선 단말부의 해석결과를 통하여 고유진동수 120Hz 근방에서 타원형 모드를 확인하였으며, 이는 발전기 운전 중 발생되는 전자력에 의해 가진 주파수 120Hz와 일치하여 공진을 초래할 수 있다. 그러므로 고정자 권선 단말부의 진동특성이 가진 주파수 120Hz 영역을 회피할 수 있도록 권선 단말부의 안쪽에 부가적으로 강성을 보강할 수 있는 보강대를 설치하여 공진을 회피하고자 한다. 보강대는

원형 링 형태로 직격이 1600~1700mm이고 단면직경이 60mm와 80mm를 유한요소모델에 설치하여 비교하였다. 유한요소모델에서 보강대의 위치는 기존 단말 권선부의 외곽에 설치된 링에서 끝단 방향으로 20mm~25mm인 지점에 권선 단말부의 안쪽에 설치하였다.

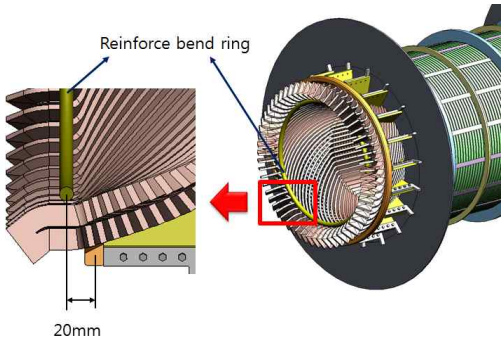

Figure 7. 3D shape of the applied reinforce bend ring

발전기의 공진을 피하기 위해 기존의 발전기의 모델에서 고유진동수의 주파수는 115Hz~140Hz 영역을 회피하여야 한다. Table 2에서 알 수 있듯이 보강대를 설치하였을 때 링 직경 60mm의 경우 2N.D. 고유진동수가 약 17% 향상되어 150.6Hz가 됨을 확인하였다. 보강대의 직경에 따라 고유진동수의 차이가 1%밖에 나지 않으므로 이는 직경이 60mm의 보강대를 설치하였도 공진주파수 영역을 충분히 회피할 수 있음을 알 수 있다.

Table 2. The results of FEM modal analysis

	Turbine End			Exciter End		
	1 N.D	2 N.D	3 N.D	1 N.D	2 N.D	3 N.D
Initial FEM results	93.3	129.3	132.2	107.3	138.3	141.8
Improved FEM results (D=60)	93.6	150.6	155.4	107.4	158.0	164.1
Improved FEM results (D=80)	93.6	152.2	158.1	107.4	160.1	165.6

발전기 권선에 보강대 설치 유무에 따라 주파수 응답해석 결과의 차이가 있으며 보강대를 설치한 후의 전체적인 주파수 응답의 변위가 낮아졌음을 확인하였고, 회피 주파수 영역(115~140Hz)에 공진이 존재하지 않으므로 공진의 영향을 피할 수 있을 것으로 판단된다. Figure 8과 Figure 9는 주파수 응답을 나타내고 있다.

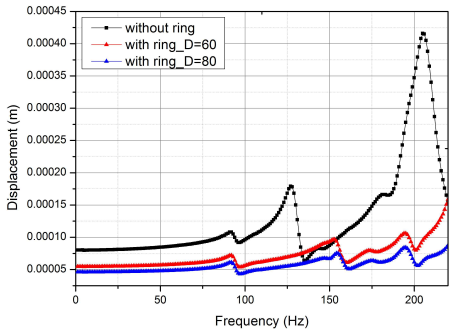

Figure 8. Frequency response at 0 degree (Turbine End)

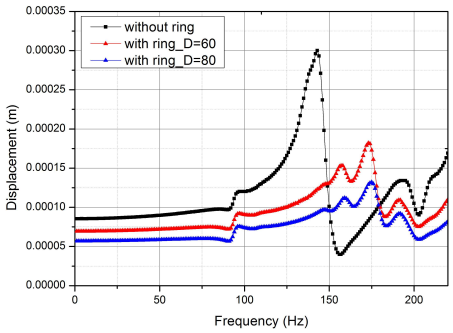

Figure 9. Frequency response at 0 degree (Exciter End)

2.7 대안수립 및 주파수 응답결과

최종 완성된 유한요소모델링과 해석의 조건 및 모든 입력파일은 사용자의 편의성을 위하여 GUI(Graphical User Interface) 프로그래밍 하였다. 그러므로 대부분의 입력은 GUI 프로그램 내부에서 입력될 수 있도록 해당 입력 항을 변수(Parameters)로 적용하였고 해당 변수를 그림으로 나타내어 그 변수가 뜻하는 바를 쉽게 이해할 수 있도록 하였다.

GUI 프로그램은 비쥬얼베이직(Visual basic v6) 프로그램을 이용하여 만들었으며 발전기 고정자의 구조물에 대하여 그림으로 형상을 나타내었으며 해당 변수의 치수를 입력할 수 있도록 약 5페이지로 구성하였다. GUI 프로그램의 첫 번째 페이지는 권

선코일의 크기를 결정할 수 있고, 두 번째 페이지는 고정자 코어와 연관된 크기의 변수를 결정할 수 있다. 그리고 세 번째 페이지는 권선을 지지하는 지지링과 압력용 판재의 변수를 결정할 수 있고, 네 번째 페이지는 터빈 측과 여자기 측의 권선 지지대의 두께와 크기를 변경할 수 있도록 만들어졌다. 마지막으로 다섯 번째 페이지는 보강대의 설치여부를 선택적으로 수행할 수 있도록 하였고 설치위치를 결정할 수 dLT으며 보강 구조물의 단면(사각형 및 원형 단면) 형상을 선택한 후 그 크기를 입력할 있도록하였고, 재료의 물성 값을 입력할 수 있도록 하였다.

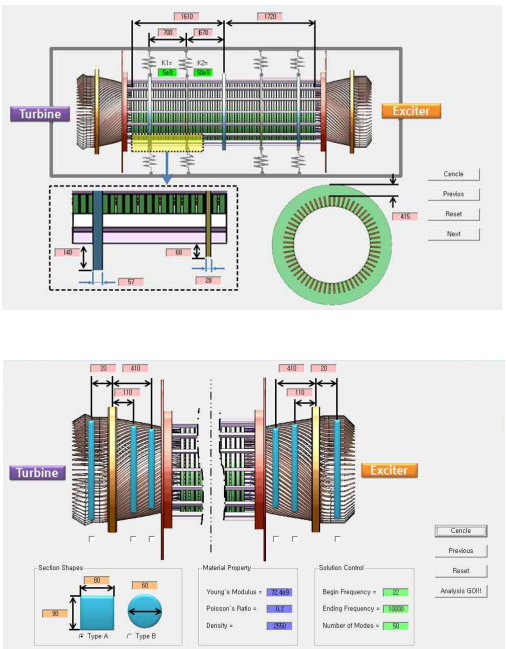

Figure 10. Parameters of the reinforcing bend for graphical user interface

3. 결 론

공진에 의해 진동 문제가 발생할 수 있는 점을 고려하여 발전기 고정자의 진동특성해석을 통하여 진동특성을 확인하고 공진을 회피하여 진동저감을 구현하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석의 정확성을 높이기 위해 현재 발전소 현장에서 사용하고 있는 발전기에 대하여 동일한 해석조건을 적용하여 타당한 구조물의 동특성을 도출하였고, 시험에서 나타난 고유진동수와 고유모드형상이 모드시험 결과의 범위 내에 매우 잘 일치함을 확인하였다.

발전기 운전 중 전자력에 의해 발생되는 가진 주파수는 120Hz이며 운전 중 권선의 온도의 상승함을 고려할 때 공진을 피해야할 주파수는 115Hz~140Hz 이므로 주파수응답 해석 결과에서 나타난 터빈 측의 127Hz는 공진에 영향이 있는 것으로 판단된다.

발전기 고정자 권선 단말부의 타원형 모드(2N.D.)에 해당되는 고유진동수가 공진주파수 영역을 피하기 위해서는 권선 단말부 안쪽에 단면직경이 60mm와 80mm, 전체직경이 1600mm~1700mm인 링 형태의 보강대를 적용하여야 한다. 이를 적용하여 유한요소해석을 수행한 결과 권선 단말부 타원형모드(2N.D.)와 삼각형모드(3N.D.)의 고유진동수가 약 17% 상승하였다. 보강대의 고유진동수의 차이가 1%밖에 나지 않으므로 직경이 60mm인 보강대를 설치해도 공진주파수 영역을 충분히 회피할 수 있을 것으로 판단된다.

유한요소모델링과 해석의 조건 및 모든 입력파일을 사용자의 편의를 위하여 GUI 형태로 프로그램을 개발하였다. 대부분의 입력은 GUI프로그램 내부에서 입력될 수 있도록 하였으며 해당 입력 항목을 변수로 적용하였다.

따라서 향수 발전기 유한요소해석에 관한 프로그램을 이용하여 발전기 고정자의 고유진동수와 모드를 예측하고 발전기 고정자의 동적 응답거동에 대항 활용연구에 이용할 수 있으며 효과적인 진단/예측 및 방안을 위한 수단으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

(1) Y. C. Bae, etc., "Comparison of Vibration Characteristics of Stator Windings by Generator Model", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, 1999

(2) Y.C. Bae, etc., "Modeling / Vibration Analysis of Generator Stator End Windings", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, 2000

(3) H. S. Kim, etc., "Vibration Characteristic & Winding Absorption in Boryung Power Plant 2", KEPRI TM, 2003, 2005