

유한요소해석을 이용한 가스터빈 발전기 로터의 계자권선 변형 해석

Investigation of the Coil Deformation of the Gas Turbine Generator Rotor Using Finite Element Analysis

윤완노 · 박현구 · 강명수 · 김준성

W. N. Yun, H. K. Park, M. S. Kang and J. S. Kim

(접수일 : 2009년 7월 20일, 수정일 : 2009년 10월 5일, 채택확정 : 2009년 10월 13일)

Key Words : Combined Cycle Power Plant(복합화력발전소), Gas Turbine(가스터빈), Generator Rotor(발전기 로터), Coil(계자권선), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract : The generator for gas turbine power generation consists of the rotor which generates magnetic field, the winding coil which is the path for the field current and the wedge and retaining ring which prevents the radial movement of the coil. Relatively severe deformation was observed at the coil end section during the inspection of the generator for peaking-load operation, and the thermal-electricity and the centrifugal force were evaluated by the simple modeling of the windings to find the cause. But the simulation stress was not sufficient to induce the coil plastic deformation. The analysis result seems to be applicable to the base-load generators which runs continuously without shut down upto a year, but there had been more deformation than simulated for the generator which is started up and shut down frequently. The cause of the coil deformation was the restriction of the expansion and shrinkage. The restriction occurs when the winding coil shrinks, and the stress overwhelms the yield stress and cause the plastic deformation. The deformation is accumulated during the start-ups and shut-downs and the thermal growth occurs. The factors which induce the coil restriction during the expansion and shrinkage should be reduced to prevent the unallowable deformation. The resolutions are cutting off the field current earlier during the generator shut-down, modifying the coil end section to remove the stress concentration and making the insulation plate inserted between the coil end section and the retaining ring have the constant thickness.

1. 서 론

복합화력발전소 가스터빈 발전기는 신속한 기동과 부하 추종 능력 때문에 90년대부터 국내에 첨두 부하(peak load)용으로 많이 건설되었다. 가스터빈 발전기는 크게 전자기장을 발생시키는 로터(회전자), 로터에 직류전류를 공급하는 여자기(exciter), 교류 전류를 공급하는 고정자로 구성되어 있으며, 일반적으로 3가지 주요 부품 중 발전기 로터에 주로 손상이 발생되고 있다. 발전기 로터의 구조는 계자권선(coil)을 수용하고 전자기장을 발생하는 로터 몸체와 전류의 통로가 되는 계자권선, 절연시스템,

계자권선의 반경방향 이탈을 방지하는 단부보호환(retaining ring)등으로 구성되어 있다¹⁾.

일반적으로 발전기 로터의 설계수명은 30년이나 기동·정지가 빈번한 가스터빈 발전기의 경우 설계 수명의 30~50%밖에 되지 않고, 운전 중 발전기 로터의 열적 민감도(thermal sensitivity)에 의한 고진동 발생으로 긴급 정비를 하는 경우가 종종 발생되었다. 발전기 로터의 열적 민감도는 주요 부품의 손상이나 변형 등에 의해 로터 몸체에 비대칭적인 변형이 발생되고 로터가 휘어져서 고진동을 유발하는 것을 말한다. 특히 복합화력발전소 로터의 분해 정비시 주요 부품의 육안점검 결과 계자권선의 과다 변형과 절연지 손상에 의한 층간 단락 등이 많이 발견되었다. 발전기 로터에 작용하는 응력은 직류 전류 공급시 발생하는 전자기력과 주유훈에 의한 열응력, 운전시 회전속도에 의한 원심력이며, 직류 전

윤완노(책임저자) : 한전 전력연구원 엔지니어링센터
E-mail : smappy2@hanmail.net, Tel : 042-865-7512
박현구 : (주)한국서부발전 발전처
강명수, 김준성 : 한전 전력연구원 엔지니어링센터

류는 약 1,000 Vdc 정도로 전자기력의 힘은 작으나 원심력과 열응력 같은 기계적인 힘은 매우 크다²⁾.

본 논문에서는 가스터빈 발전기 로터 열적 민감도의 원인이 될 수 있는 계자권선 단부의 과다 변형 원인을 밝히기 위해 계자전류 공급시 계자권선의 열분포, 응력, 변형량 등과 회전시에 발생하는 원심력에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 또한 주요부품의 조립공차, 정비절차 등의 조사를 수행하였다. 이러한 다각적인 조사를 바탕으로 계자권선 과다 변형 원인을 규명하고 대책을 수립하였다.

2. 발전기 로터 및 열변형 특성

2.1 발전기 로터 개요

계자권선의 과다 변형 원인을 밝히기 위해 유한요소해석을 수행한 가스터빈 발전기는 GE 7F 기종이며, 1992년부터 상업운전을 시작한 150 MW 용량이다. 가스터빈 발전기의 주요 규격은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of the gas turbine generator

Item	Unit	Specification
Model		GE 7FH ₂
Apparent power	KAV	215,700
Rotor speed	rpm	3,600
Armature volt	V	13,800
Cooling method/pressure	psi	Hydrogen/30(40℃)
Field ampere	A	1,403
Exciter volt	V	500
Allowable temperature	℃	125(on field by resistance)

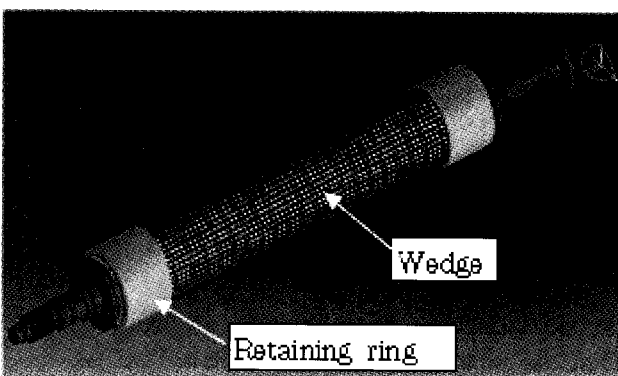


Fig. 1 Assembly drawing of generator rotor

발전기 로터는 몸체에 2개 극(N, S극)의 계자권

선을 수용할 수 있도록 슬롯이 파여져 있으며 각 극에 여러 개의 계자권선이 나선형으로 계속 연결되는 구조로 되어 있다. 반경방향으로 계자권선의 이탈 방지를 위해 Fig. 1과 같이 로터 중앙에는 웨지가 단부에는 단부보호환이 설치되어 있다. 계자권선 단부에는 Fig. 2와 같이 계자권선간 일정 간격을 유지시켜 주는 간격편(space block)이 설치되어 있으며 최종적으로 로터와 일체로 되어 있는 센터링 링(centering ring)에 의해 축방향 간극이 구속된다.

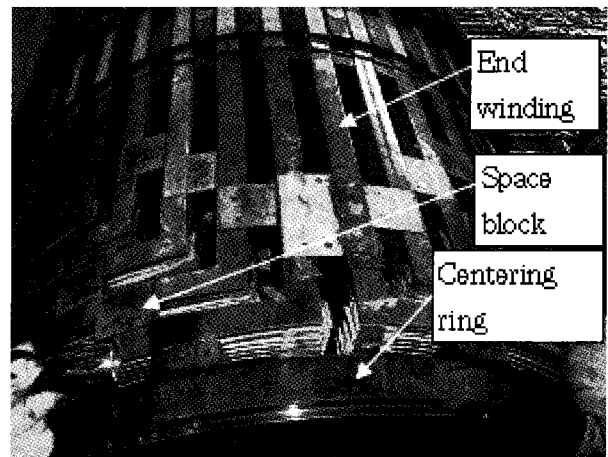


Fig. 2 End coil, space block and centering ring of generator rotor

계자전류는 여자기 → N극 bore copper → N극 1번 계자권선(11층) → 2번~8번 계자권선(12층) → S극 8번 ~ 1번 → S극 bore copper로 회로를 형성하여 인가된다. 계자권선의 종류는 코너 부위가 사각형인 사각형 type(square corner type)과 둥근 형상의 C type이 있는데, GE 7F의 경우 사각형 type이다. 계자권선간의 절연을 위해 계자권선 사이에 층간절연지가 삽입되는데, 이 층간 절연지는 제작 조립시에 일정온도로 가열하여 계자권선에 분당되며, 계자권선과 동일한 냉각홀이 뚫어져 있어, 권선 냉각 매체 흐름에 영향을 주지 않도록 되어 있다.

2.2 발전기 로터 열변형 특성

발전기 로터의 열변형의 특성은 계자전류의 변화에 따라 로터의 회전속도 성분인 1X 주파수 성분이 변화하면서 진동의 크기도 변화한다. 즉, 계자전류 변화에 따라 로터가 휘는 것을 의미한다. 발전기 로터의 열변형은 가역적인 경우와 비가역적인 경우로 나누는데, 계자전류가 증가했다가 처음 상태로 복귀되었을 때 진동의 크기도 처음의 상태로 복귀되는

경우를 가역적, 복귀되지 않은 경우를 비가역적 열 변형이라고 한다. 가역적 열변형이 발생할 수 있는 경우는 1) 층간단락 2) 계자권선 냉각통로의 막힘 또는 비대칭적 냉각 3) 간격편 구속 등이 있고, 비가역적 열변형이 발생하는 경우는 1) 절연편차 2) 웻지 팽창 구속 3) 계자권선 팽창 구속 등이 있다. 현장에서 육안 점검시 발견된 사실을 종합해 보면 여러 가지 원인이 복합적으로 작용함을 알 수 있다. 특히 발전기 로터의 절연 시스템에 큰 영향을 미치는 것은 사용 온도인데 온도가 높은 경우 절연물의 열화를 가속시켜서 절연물의 수명을 단축시키고 결과적으로 열변형량이 커지게 된다. 계자권선 온도가 높아질 수 있는 원인은 설계불량, 절연지 이동 등으로 계자권선 냉각통로 막힘 등이 있다. 그리고 재질이 구리인 계자권선과 합금강인 로터와의 열팽창 계수 차이로 계자권선이 항상 빨리 팽창 수축되며 이러한 팽창 수축에 구속이 발생되면 계자권선의 변형이 가속되고 간격편 이탈, 절연지 밀림 등이 발생되어 열변형이 커지게 된다. 따라서 발전기 로터의 열변형 방지를 위해서는 계자권선의 팽창 구속이 자유롭게 되도록 정비하는 것이 중요하다.

2.3 발전기 로터 계자권선 변형 특성

발전기 로터의 분해 점검시 계자권선 단부 변형량의 경우 4개 호기 계자권선 변형량 조사결과 최대 변형량이 5~6mm 정도 되는 것으로 확인되었다.⁽³⁾ 계자권선 단부 변형은 Fig. 3과 같이 서로 접촉되어 있는 것도 발견되었다. 이런 경우 간격편에 의해 일정간격 떨어져 있는 독립적인 계자권선간의 접촉으로 새로운 전기 통로가 형성되어 계자권선의 온도 불평형을 유발할 수 있다.

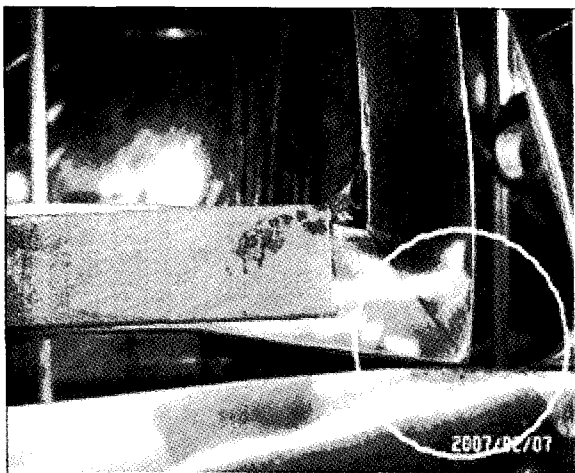


Fig. 3 Example of end coil deformation

3. 유한요소해석

3.1 계자권선 모델링

발전기 로터 열변형의 원인을 분석하기 위하여 계자권선을 현장에서 실측하여 CAD 도면을 작성하였고, 이 도면을 기본으로 하여 유한요소해석을 위한 3차원 모델을 만들었다. 유한요소해석 모델은 Fig. 4와 같고, 축대칭 형상의 특성을 고려해 1/2형상에 대해 모델링하고 열전기 해석을 수행하였다. 열전기 해석시 로터는 발열 및 냉각 조건에 미치는 영향이 매우 미비하여 생략하였다.

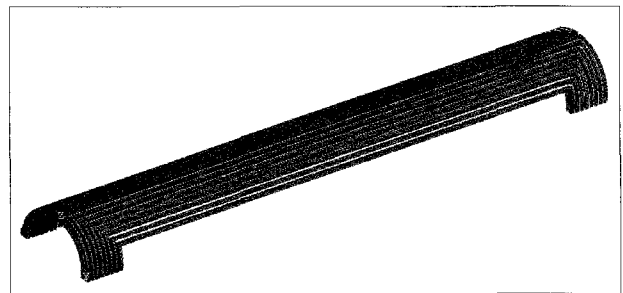


Fig. 4 FEA model of generator rotor coil

3.2 계자권선 재료물성 및 해석조건

가스터빈 계자권선은 일반적으로 순동에 은을 소량 함유한 재료를 사용하며 열전기 해석 및 원심력 해석을 위해 Table 2에 제시된 물성치를 사용하였다.

1일 동안 발전기에 공급된 계자전류의 크기는 Fig. 5와 같으며 기동 초기와 발전기 출력이 160 MW 되기 전까지는 약 600 A의 전류가 공급되었고 160 MW 이상의 출력에서는 약 1,000 A의 계자전류가 공급되었다.

Table 2 Mechanical properties of rotor coil

Mechanical properties	Unit	Value
Yield strength	MPa	206~310
Elongation at break	%	18.0
Electrical resistance	ohms/m-g	0.1569 at 20°C
Thermal conductivity	W/mm°C	0.401
Electrical conductivity	1/Ωmm	58 × 10 ³
Modulus of elasticity	GPa	110
Poisson's ratio	-	0.34
Density	kg/mm ³	8.3×10 ⁻⁶
Specific heat	J/kg°C	385

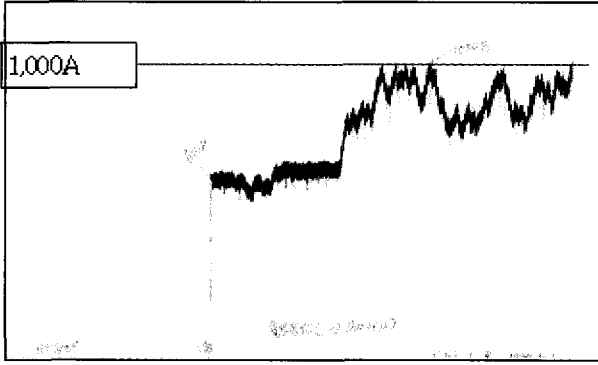


Fig. 5 Example of field current trend

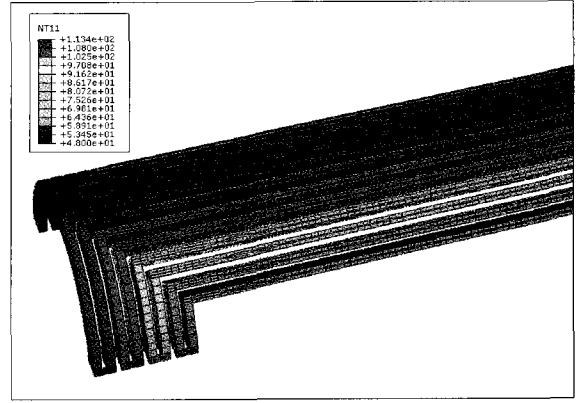


Fig. 6 Temperature distribution of coil at 1,000 A

유한요소해석에서는 전류에 의한 발열의 크기를 계산하기 위해 ABAQUS의 “Coupled thermal-electrical analysis” 알고리즘을 사용하였고, 통전되는 전류에 기인한 실제 계자권선의 냉각은 수소가스의 유동조건을 고려한 CFD(computational fluid dynamics) 해석을 통해서 해야 하나, 단순화를 위해 열복사 조건에 의해 냉각을 고려하였다. 해석의 경계 조건에서 계자권선의 축방향 팽창은 간격편과 콘택터에서만 구속하는 것으로 단순화하였고, 기동·정지를 고려하지 않았다. 해석에는 329,532개의 절점과 111,605개의 요소가 사용되었으며, 요소형식은 DC3D8E(8-node linear brick; coupled thermal-electrical elements)이다. 냉각가스의 초기 온도는 실제 운전조건인 46 °C를 적용하였고, 계자전류는 500~1,000 A를 적용하였다. TE(turbine end)측과 계자전류가 공급되는 CE(collector end)측 대칭성을 고려하여 CE측을 주로 해석하였다.

3.3 열전기 해석 및 고찰

3.3.1 온도 분포 해석

계자권선 모델링을 이용하여 계자전류가 1000 A로 인가되었을 때 각 계자권선의 온도 분포를 해석한 결과는 Fig. 6과 같다.

해석 결과를 보면 계자 전류가 처음으로 인가되는 1번 계자권선의 온도가 약 50 °C이었고 최고로 높은 온도는 8번 계자권선이었으며 116 °C이었다. Fig. 7은 CE 측에서 계자권선의 절점의 위치를 표시하였다.

Fig. 8은 각각의 절점에서 인가되는 전류의 크기에 따른 계자권선의 온도 분포를 나타내었다. 실제 운전중 계자권선의 온도를 측정할 수 없어서 결과의 정확성을 확인할 수 없지만 제작사 보증온도가 125 °C인 것과 참고자료를 조사한 결과 온도분포가 유사하다고 판단된다⁴⁾.

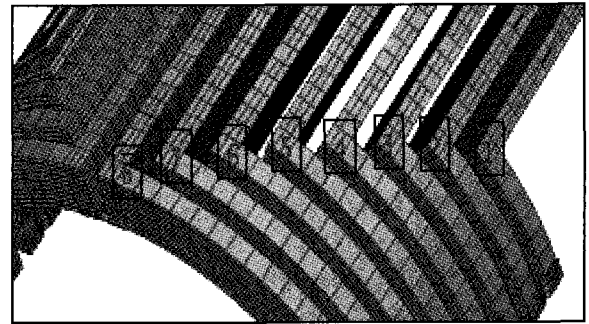


Fig. 7 Position and number of defined nodes at collector end

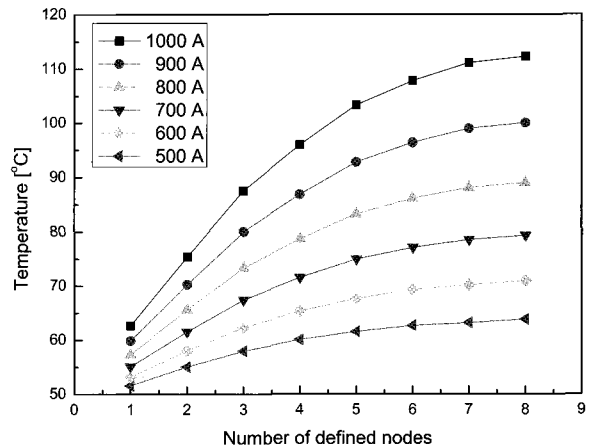


Fig. 8 Temperature vs. various coils for defined nodes at collector end

3.3.2 계자권선 단부 응력해석

계자권선에 발생한 열은 계자권선의 열팽창계수에 따라 변형을 발생시키고 이는 응력으로 계산된다. 이에 대한 크기와 분포를 평가하기 위해 계자권선의 구조 해석(structural analysis)을 수행하였다. 경계 조건은 간격편의 개수와 위치뿐만 아니라 계자권선과 로터 그리고 웻지와와의 구속조건을 고려하

였다. 본 해석에서는 ABAQUS의 “3D structural analysis” 알고리즘을 사용하였다. 해석에는 329,532개의 절점과 111,605개의 요소가 사용되었으며 요소 형식은 C3D8I(8-node linear brick, incompatible modes)이다.

해석을 위한 모델링은 Fig. 9와 같고 해석결과는 Fig 10, 11과 같으며 최대 응력이 작용하는 1,000 A 조건에서 해석을 수행하였다.

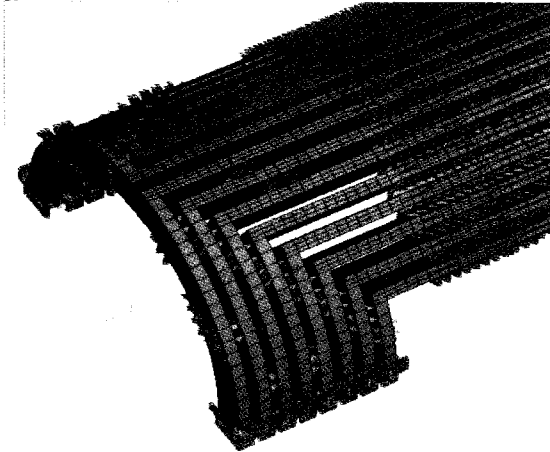


Fig. 9 FEA model of coils for structural analysis

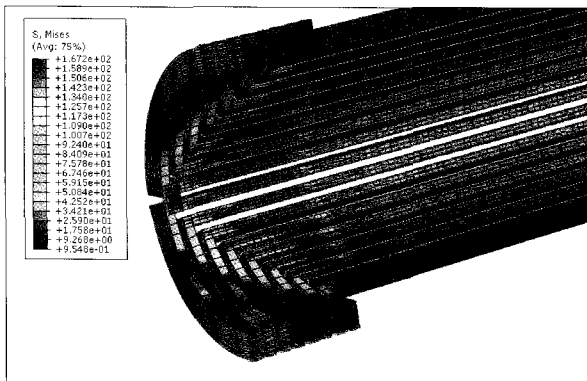


Fig. 10 Von Mises stress distribution at collector end(1,000 A)

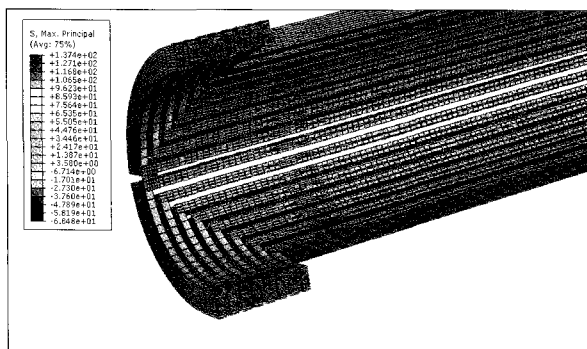


Fig. 11 Max. principal stress distribution at collector end(1,000 A)

해석 결과 1,000 A의 전류가 인가될 때 응력의 크기는 100~130 MPa의 크기를 보였다. 인장과 압축응력을 해석하기 위해 최대 주응력인 Max. principal stress 해석을 수행한 결과 상대적으로 온도가 낮은 1~2번 계자권선에서는 20~25 MPa의 응력이 발생되었고 온도가 가장 높은 7~8번 계자 권선에서는 웻지와 접촉부에서 40~50 MPa의 응력이 발생되었고 계자권선 사이 간격편이 위치한 곳에서는 85~100 MPa의 인장응력이 발생되었다.

3.3.3 계자권선 단부 변형량 해석

계자전류 인가시 응력해석을 진행하면서 변형량도 해석하였다. Fig. 12는 변형량 해석을 위한 좌표를 나타내었고 X' 방향이 축방향이다.

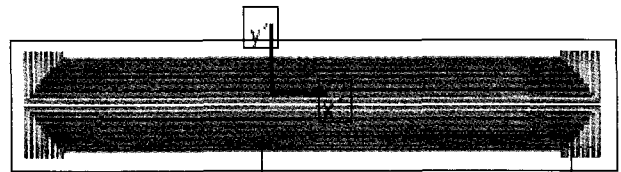


Fig. 12 Defined path for displacement

Fig. 13에는 8번 계자권선의 반경방향 최외곽 층에 대하여 길이방향으로 발생하는 변위의 크기를 전류의 크기에 따라 나타내었다.

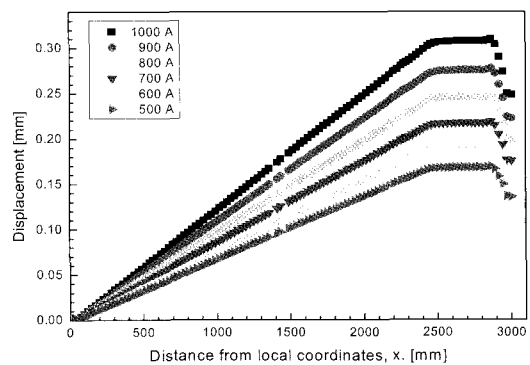


Fig. 13 Displacement vs. defined path for #8 coil

변형량 해석 결과 전류의 크기가 증가할수록, 계자권선의 길이가 길수록 변형량은 증가하였고, 최대 변형이 발생한 8번 계자권선의 변형량은 1,000 A에서 0.31 mm이었다. 이 값은 로터 중앙에서 한쪽 방향의 크기이기 때문에 양쪽의 크기는 0.62 mm가 된다. CE측에서 변형량과 형상을 Fig. 14에 보여주고 있다.

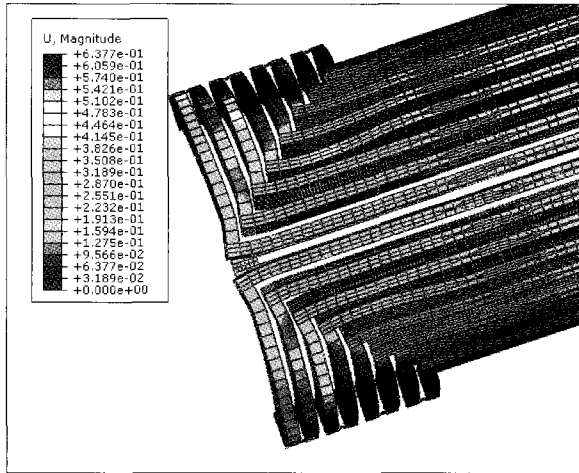


Fig. 14 Displacement and deformed shape of coils at collector end under 1000 A

3.4. 원심력 해석 및 고찰

3,600 rpm으로 회전하는 로터의 원심력 해석을 수행하기 위해 Fig. 15와 같이 모델링을 하였다. 해석모델의 경계조건은 계자권선과 웨지와의 접촉관계를 고려하여 계자권선의 바깥부에 대하여 반경방향 변위를 구속하였다. 또한 간격편의 위치를 고려하여 구속조건을 사용하였다.

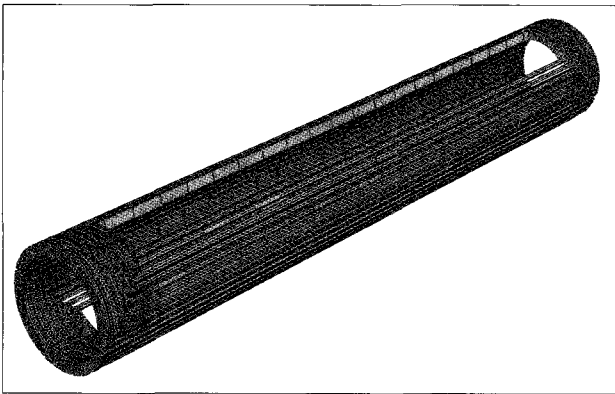


Fig. 15 FEA model for centrifugal force analysis

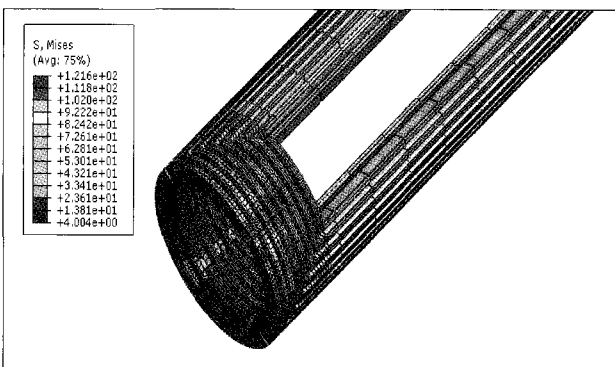


Fig. 16 Von Mises stress at 3,600 rpm

Table 3 Results of finite element analysis

Item	Unit	Results	Location
Max. tensile strength	MPa	100~130	Between coil and space block
Max. deformation	mm	0.31	Near the space block of end winding
Centrifugal force	MPa	90	Contact area with wedge
	MPa	55	Inside winding

4. 해석 결과 종합 및 고찰

열전기와 원심력 해석 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 원심력과 열전기 해석은 단순화를 위해 각각 수행되었다. 해석 결과를 고찰해 보면 계자권선 단부에서만 인장응력과 원심력의 크기가 비슷하고 다른 부위에서는 원심력의 크기가 큼을 알 수 있다. 계자전류가 인가되는 시점은 로터 회전속도가 95 % 되었을 때인데, 이때는 원심력이 크게 작용하는 속도이기 때문에 계자권선 단부를 제외하고는 원심력 때문에 열적 팽창 수축을 할 수 없다는 것이다. 최대 변형량은 0.3 mm 정도이고 변형 형상은 Fig. 14와 같이 주로 코너부위에 집중되어 있다.

석탄화력발전소와 같이 기저부하(base load) 발전기 로터의 변형량은 열전기 해석의 결과처럼 매우 적으나, 매일 기동·정지를 하는 발전기의 경우 저사이클 피로와 계자권선 팽창 수축 구속에 의해 기동 횟수가 증가할수록 변형이 누적되어, 몇 년간 운전 후에는 총 변형량이 크게 발생됨을 알 수 있다⁴⁾. 즉, 발전기 정지시 구속이 발생되면 계자권선은 정지 상태의 위치로 복귀하지 못하고 소성 변형이 발생된다. 다음 기동시 계자권선이 팽창하였다가 정지시 구속이 발생되고 그 크기가 항복응력보다 크면 열변형 성장(thermal growth)이 커지게 된다. 이러한 열변형의 성장 과정으로 이론적 변형량보다 변형이 커지게 된다. 따라서 열변형 성장을 억제하기 위해서는 팽창 수축시의 구속을 방지하는 것이 중요하다. 특히 발전기 로터 단부에서의 단부 보호환 아래 들어가는 절연판의 두께와 표면 거칠기가 매우 중요한 역할을 한다. 최하부 절연판은 슬립면(slip plane)이라고 하며 코팅으로 표면을 개선하기도 한다.

가스터빈 건설 후 초기의 정지 시퀀스는 Fig. 17과 같이 12.5 % 속도에서 계자전류를 차단하였다.

이 경우는 로터 회전속도가 감소되어 원심력에 의한 응력의 크기는 매우 작으나, 계자전류의 공급으로 계자권선의 열응력은 큰 상태이어서 계자권선의 팽창이 발생된다. 이러한 정지 절차 때문에 고진동 발생과 발전기 로터 부품 손상, 계자권선 변형이 많이 발생되어서 발전기 정지후 95 % 속도에서 계자전류를 차단하는 것으로 시퀀스를 바꿔 발전기 로터의 안정성을 향상시켰다.

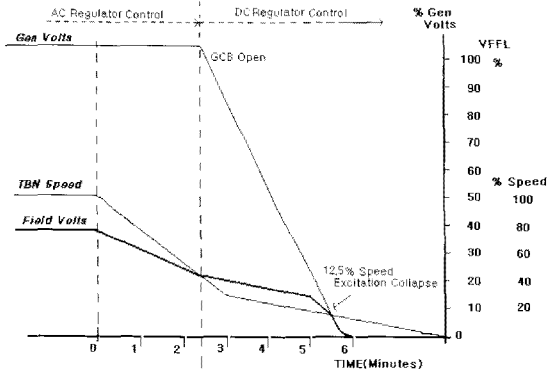


Fig. 17 Shut down curve of gas turbine generator

계자권선 코너가 둥근 C-type 계자권선의 분해점검시 유사 운전 조건에서 변형량이 작음을 보면 계자권선 코너부가 사각형인 square corner type은 코너부위에 응력 집중현상으로 변형이 많이 됨을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

가스터빈 발전기 로터의 계자권선 변형의 원인을 분석하고, 변형 방지 대책 수립을 위하여 수행한 유한요소해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 발전기 로터의 열전기 해석을 수행한 결과 계자권선의 온도 분포는 1번에서 8번 계자권선까지 온도가 증가하였고 1,000 A에서 8번 계자권선의 온도가 116 °C까지 증가하였다.
- 2) 응력해석과 변형량 해석 결과 최대 응력은 계자권선 코너부에 85~100 MPa의 응력이 단부 계자권선의 간격편이 있는 곳에서 작용하였고 최대 변형량은 계자권선 코너 부위에서 한 쪽 방향으로 0.3 mm 되었다.
- 3) 원심력 해석 결과 계자권선의 반경 방향으로 최상부 웻지와 접촉부에서 90 MPa의 응력이 작용하였고 내부에서는 55 MPa의 응력이 작용하였다.
- 4) 기저부하로 운전하는 석탄화력발전소의 경우

열전기 해석 결과와 현장조사 결과가 비교적 일치하나, 매일 기동·정지를 하는 가스터빈 발전기의 경우 변형량이 많았으며 이는 잦은 기동 정지시 팽창 수축의 구속 발생에 의한 계자권선의 열변형 성장 때문이었다.

5) 계자권선의 열변형 성장을 방지하기 위해서는 계자권선의 열팽창 수축시에 구속이 없도록 단부 보호환 절연판의 두께를 일정하게 하고, 정지시 계자전류를 빨리 차단해야 한다. 또한 응력 집중 구조로 되어 있는 사각형의 계자권선 코너를 둥근 C-type으로 개선이 필요하다.

참고 문헌

1. Ronald J. Zawoysky, William M. Genoves, 2001, "Generator Rotor Thermal Sensitivity - Theory and Experience", GE power Systems Report, GER-3809.
2. R.F Weddleton, A.C Sismour, 1992, "Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation", pp. 473~478.
3. 박현구, 2009, "일일기동정지 발전기 로터 계자권선의 손상 원인분석", 충남대 산업대학원 석사 학위 논문.
4. Greg C. Stone, et al., 2004, "Electrical insulation for rotating machines", A John Willey & Sons, INC., Publication, pp. 181~191.
5. 김용환외 4명, 2007, "영구자석형 직류전동기 축계의 유한요소모델 개선과 진동해석", 한국동력기계공학회지 제 11권 제 1호, pp. 20~27.