

발전기 고정자 단말권선 모델링 및 진동 특성 분석

(Modeling / Vibration Analysis of Generator Stator End Windings)

°배용채*, 이 현*, 홍승모**

Abstract

발전기 운전중 발생하는 전자력은 고정자 권선 특히 단말권선의 진동을 유발시켜 피로 균열을 발생시킬 수 있으며 이로 인한 권선 누수 사고 및 발전기 수명 저하를 초래할 수 있다. 본 논문에서는 500MW급 발전기 고정자 단말 권선을 모델링하여 이를 운전중인 발전기 고정자 권선 단말부의 진동 특성과 비교하였다.

1. 서론

발전소에서 사용하고 있는 발전기는 전기를 생산하는 매우 중요한 기기이다. 특히 발전소의 대용량화, 고효율화에 따라 대부분의 대용량 발전기는 권선에서 발생하는 열을 냉각시키기 위하여 회전자에는 수소를, 고정자에는 물을 사용하고 있다. 따라서 발전기 운전중 고정자 권선의 누수 또는 수소 누설은 발전기 운전에 적지 않은 문제를 발생시킨다. 특히 고정자 권선 누수로 인한 주절연 파괴는 발전소의 불시 정지를 초래하고 이를 정비하기 위하여 장기간이 소요되므로 경제적인 손실이 매우 크게된다. 최근 국내의 발전소에서 자주 발생하는 수냉각 발전기 고정자 누수 사고의 주요 원인은 고정자 권선 클립 브레이징부의 부식 현상과 진동에 의한 마멸 및 피로 균열을 들 수 있다. 권선 브레이징부에 대한 부식 메카니즘은 GE, EPRI등의 연구를 통하여 이미 밝혀진 바 있으며, 냉각수의 수질은 발전소 관련부서의 세심한 관리하에 있다. 한편 발전기의 기계적 진단은 거의 이루어지지 않고 있으며 주로 절연 진단 등과 같은 전기적인 시험 및 분석에 의하여 발전기의 상태 점검이 수행되고 있다.

하지만 전술한 바와 같이 발전기 운전중 발생하는 전자력에 의한 진동은 발전기의 신뢰성있는 운전과 수명에 큰 영향을 끼친다. 따라서 본 논문에서는 국내에 운전중인 수냉각 발전기 고정자 권선 단말부의 진동에 초점을 맞추어 500MW급 발전기 고정자 권선 단말부를 ANSYS 모델링하고 해석한 결과를 실제 운전중인 발전기 고정자 권선의 진동 모드와 비교 분석하였다.

2. 수냉식 발전기 고정자 구조

발전기는 제작사에 따라 차이가 있으나 정상 운전중 발생하는 전자력 또는 로타 회전력에 따른 기계력과 같은 정상 상태의 힘과 3상 단락과 같은 과도력에 견딜 수 있는 구조로 제작되어야 한다.

일반적인 수냉각 발전기 고정자의 구조는 그림1과 같으며 크게 프레임, 고정자 철심, 권선 및 권선 지지장치, 그리고 냉각수 공급을 위한 테프론 호스와 헤더로 구성된다. 고정자 프레임에 고정된 키바(key bar)에 적층된 고정자 철심의 슬롯에 고정자 권선이 2단으로 삽입되며, 이들을 구속하기 위하여 웨지가 사용된다. 고정자 슬롯에서 나온 상하 권선은 스페이서와 끈으로 인근 권선들과 묶여 있으며 내부 링과 외부 링 그리고 권선 지지장치에 의하여 구속되어 있다. 따라서

* 한전 전력연구원 발전연구실

** 신성 ENG

고정자 슬롯부에 비하여 권선 단말부의 기계적 구속 상태가 비교적 취약하며, 실제로 발전기 고정자 냉각수 누수 및 권선 마멸 현상이 고정자 권선 단말부에서 자주 일어나고 있다.

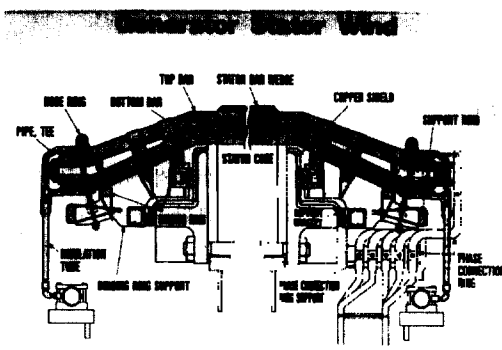


그림 1 발전기 고정자 구조

고정자 권선의 내부 구조는 그림 2와 같이 전기가 흐르는 내부 동도체에는 발생하는 열을 냉각 시키기 위하여 많은 냉각수 통로가 있으며 외부에는 마이카-에폭시 절연 재료로 싸여 있다.

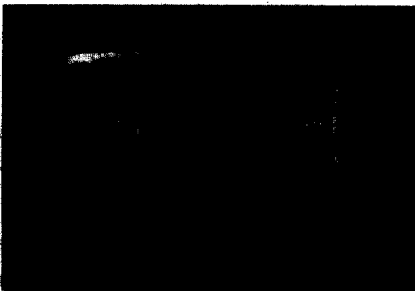


그림 2 수냉식 발전기 고정자 권선 구조(500MW)

3. 고정자 단말 권선의 진동³⁾

발전기 고정자 권선에 작용되는 힘은 터빈-발

전기 로터의 불평형 또는 기계적 결함에 의하여 발생되는 힘과 전자력, 유니트 기동 정지 및 부하 변동에 따른 열 팽창력, 그리고 돌발적인 사고로 인한 단락 또는 계통 분리 등과 같은 비정상 운전 조건에서 발생하는 과도적인 힘 등을 들 수 있다. 본 논문에서는 비정상 상태에 의한 과도한 힘에 비해 상대적인 크기는 작지만 정상 운전중 항상 작용하는 힘으로 진동 및 피로 현상을 유도하는 전자력에 관점을 맞추었다. 발전기 고정자 권선에 작용하는 전자력은 전류와 자속 밀도의 벡터 외적으로 표현된다. 발전기 회전자와 고정자 사이에서 발생하는 전자장에 기인한 전자력으로 말미암아 발전기는 정적인 변형을 일으키며, 실제 운전중에 회전자에 의하여 전자장이 회전하므로 발전기는 동적인 힘을 받는다. 즉, 2극 발전기의 경우 운전 주파수의 2배, 4극 발전기의 경우 운전 주파수의 4배인 120Hz의 가진 주파수를 가지게 된다. 이는 고정자 권선 및 권선 단말부에 진동을 유발시키며 피로로 인한 균열 및 수명 감소를 야기시킨다. 전자력은 정상 운전중 고정자 권선에 지속적으로 작용되고 고정자 권선 지지 구조의 건전성에 큰 영향을 준다. 따라서 모든 권선은 충분한 구속력을 가진 적절한 지지 장치를 필요로 하며 고정자 권선을 포함한 구조물들의 고유 진동수는 반드시 120Hz와 일정 범위만큼 떨어져야 한다.

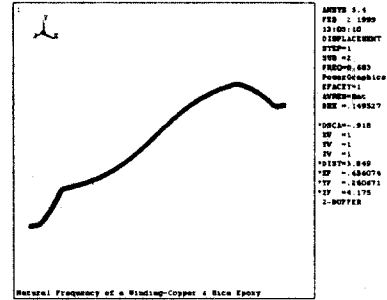
특히 관심이 되는 권선 단말부의 진동은 권선 지지 장치의 느슨함에 관련이 있으며 이 진동의 크기는 공진의 경우를 제외하고는 비교적 서서히 증가된다. 권선 단말부에서의 진동은 여러 가지 파급 사고를 유발시킬 수 있다. 따라서 권선 단말부의 진동은 미연에 방지하여야 하며 진동을 감지하였을 때는 즉시 대책을 세워야 한다. 고정자 권선과 스페이서(spacer) 사이의 상대 운동은 마멸의 원인이 되고 부가적으로 느슨하게 하여 더욱더 큰 진동과 마멸을 유발시킨다. 이러한 현상은 계속 축적되어 심각한 상태에 이르게 한다.

4. 고정자 권선 진동 해석

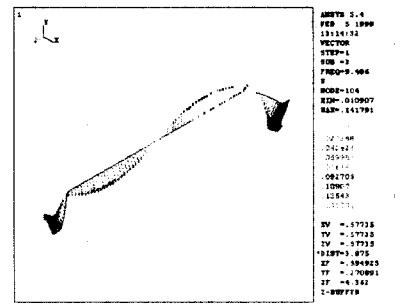
발전기 고정자 권선의 진동 특성을 파악하기 위하여 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 단일 권선 및 고정자 단말 권선을 모델링하여 해석하고 그 결과를 실제 권선에 대한 데이터와 비교 분석하였다. 현재 국내 표준 화력 발전소에서 주로 운전되고 있는 500MW급 발전기 고정자 권선을 대상으로 발전기 운전중 전자력에 의하여 발생하는 120Hz의 가진 주파수와 고정자 단말 권선의 공진 여부를 파악하고 불량 부분을 보완하기 위하여 권선 단말부를 모델링하여 해석하는 것은 매우 의미있는 일이라 할 수 있다. 하지만 발전기 고정자 권선 전체를 3차원적으로 모델링하여 해석하기에는 구조의 복잡성, 해석 시간 등을 고려할 때 여러 가지 어려움이 따른다. 따라서 전체 권선의 모델링 및 해석 시간의 단축을 위하여 모델링을 단순화 시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 전체 권선 모델링의 단순화에 대한 타당성을 검증하기 위하여 현재 발전소에서 운전되고 있는 단일 권선을 솔리드 모델링하여 해석한 결과와 빔(beam) 요소로 단순화하여 해석한 결과를 비교 분석하였다.

4.1 단일 권선 해석

발전기 고정자 단말 권선을 빔요소로 단순화하고 등가 물성치를 산정하여 해석한 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 그림 3과 같이 동 권선과 절연 재료를 모두 고려하여 솔리드 해석한 결과와 고정자 권선을 구성하는 복합 재질의 물성치를 증가시켜 빔요소를 이용하여 해석한 결과를 비교 분석하였다. 그림에서 보는바와 같이 고정자 단일 권선의 모드 형상이 각각 잘 일치함을 볼 수 있다. 또, 해석 결과의 검증 기준을 삼기 위하여 해석에 사용한 단일 권선의 주파수 응답 시험을 수행한 결과는 그림 4와 같다.



(a) solid modeling



(b) beam modeling

그림 3. 단일 권선의 모드해석 결과

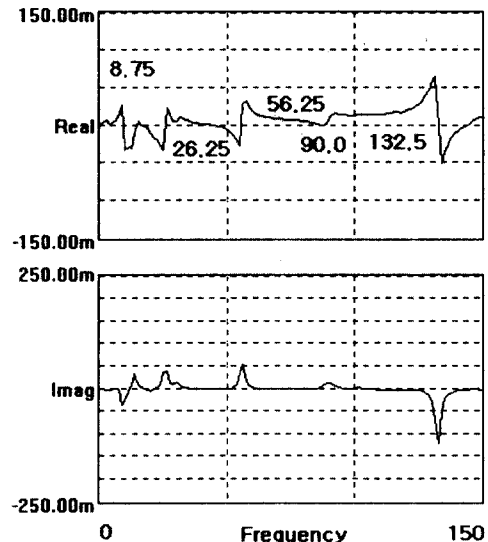


그림 4. 단일 권선에 대한 주파수 응답 시험

표 1은 이상의 해석 결과와 시험 결과를 정리한 것으로써 복합 재질을 고려한 해석 결과와 빔 요소로 단순화하여 물성치를 증가시킨 후 해석한 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 이들 해석 결과는 실험에 의하여 구한 권선의 고유주파수와 잘 일치함을 보여준다. 이상의 결과를 볼 때, 복합 재질로 구성된 권선의 물성치를 증가시키고 빔 요소로 단순화하여 해석하는 것이 타당함을 알 수 있다.

표 1 단일 권선 해석 및 실험 결과

고유 주파수	해석 결과			실험 (Hz)	오차 II (%)
	복합재질	등가	오차 I (%)		
1 차	8.68	9.49	+9.3	8.75	-8.5
2 차	25.87	25.91	-0.2	26.25	-1.3
3 차	55.18	56.15	+1.8	56.25	-0.2
4 차	92.61	90.46	+2.3	90.0	+0.5
5 차	138.73	132.83	+4.2	132.5	+0.2

오차 I = (등가물성치에 의한 결과 - 3차원 모델링의 결과) / (등가물성치에 의한 결과) × 100

오차 II = (실험결과 - 등가물성치에 의한 결과) / (실험결과) × 100

4.2 고정자 단말 권선 해석

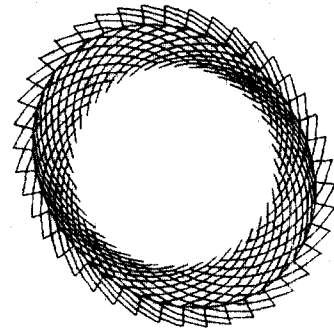
권선 해석의 단순화에 대한 타당성 검증을 토대로 발전기 고정자 단말 권선을 그림 5와 같이 빔 요소로 모델링하여 해석하였다. 해석은 Block Lantzos Method를 사용하였으며 발전기 고정자 코어 끝단에서의 경계 조건으로 발전기 축방향을 제외한 모든 방향을 구속하였다. 그림 6은 500MW급 발전기 고정자 단말 권선을 ANSYS 해석한 결과이다.

4.3 검증

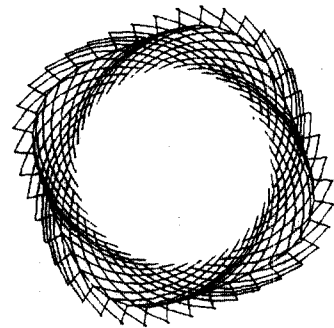
발전소 발전기 고정자 단말 권선을 모델링하여 해석한 결과를 검증하기 위하여 국내 500MW급 표준화력 발전소의 발전기 고정자 단말 권선에 대한 모드 시험을 수행하였다.



그림5 고정자 권선 모델링 (isotropic view)



(a) n = 2 (52Hz)

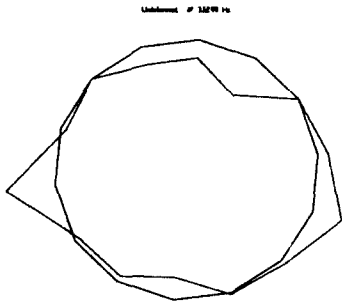


(b) n = 4 (82Hz)

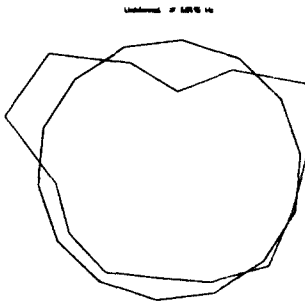
그림 6 고정자 단말 권선 진동모드

그림7은 'H' 발전소 발전기 고정자 여자기측의 권선 단말부를 14등분하여 모드 해석 소프트웨어

인 'STAR'를 이용하여 분석한 결과로써 발전소에서 중요하게 고려해야할 2차 모드와 4차 모드를 나타내며 이 결과를 해석 결과(그림 6)와 비교해 볼 때 잘 일치함을 알 수 있었다.



(a) $n=2 : 53\text{Hz}$



(b) $n=4 : 85\text{Hz}$

그림 7 고정자 단말 권선의 모드 시험 결과

5. 결 론

국내에서 운전되는 500MW급 표준 화력 발전소의 발전기 고정자 단말 권선에 대한 진동 해석 결과, 실제 발전기 고정자 단말 권선에 대한 진동 모드 시험 결과와 잘 일치하였다.

6. 참고 문헌

1) R. K. Singal, K. Williams, " Vibration

Behaviors of Stator of Electrical Machines Part I : Theoretical Study " , Journal of Sound and Vibration, 1987, 115(1),

2) S. Watanabe, S. Kenjo, K. Ide, F. Sato, M. Yamamoto, " Natural Frequencies and Vibration Behaviour of Motor Stators" , IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.4, April 1983, pp 949 ~ 956.

3) 배용채 외, "수냉식 발전기 고정자 권선의 진동 특성", 소음진동학회 춘계학술대회, 5. 1999

4) 배용채 외, "발전기 모델별 고정자 권선의 진동 특성 비교", 소음진동학회 춘계학술대회, 6. 2000