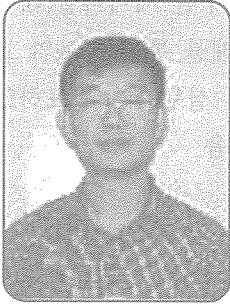


발전기 고정자 권선의 진동 특성 해석 및 적용 사례



한전전력연구원 발전연구실
책임연구원 배용채
Tel : (042) 865-5346

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 운전 중 고정자 권선의 누수 또는 수소 누설은 발전기 운전에 적지 않은 문제를 발생시킨다. 특히 고정자 권선 누수로 인한 주절연 파괴는 발전소의 불시정지를 초래하고 이를 정비하기 위하여 장기간이 소요되므로 경제적인 손실이 매우 크다.

최근 국내외 발전소에서 자주 발생하는 수냉각 발전기 고정자 누수 사고의 주요 원인은 권선 특히 고정자 권선 클립 브레이징부의 부식 현상과 고정자와 회전자 사이에 유기되는 전류와 자속 밀도와의 상호작용으로 인한 전자력을 가진력으로 하는 진동을 들 수 있다. 이로 인하여 권선의 격임부, 권선과 냉각수의 연결 부위 또는 고정자 권선 클립에서의 피로 현상이 누적되고 급기야는 균열에 의한 누수 사고를 유발시킬 수 있다. 특히 고정자 슬롯 단말부에서의 진동에 의한 마멸 현상은 절연물의 손상을 가져와 주절연재를 파손시킬 수 있다. 발전기 시일 오일의 누유 등으로 인한 오염은 이러한 마멸 현상을 촉진시키는 요인이 된다. 최근 권선 누수 현상을 유발시

켜 발전 정지 및 보수를 실시한 사고 사례들을 볼 때 고정자 권선 단말부의 진동에 의한 마멸 및 균열 현상을 빼놓을 수가 없으며 이는 비교적 구속력이 약한 권선 단말부의 진동에 의한 피로 균열이라 할 수 있다.

진동으로 인한 상기의 손상은 수냉각 발전기 뿐 아니라 모든 발전기에서 발생하는 문제로써 복합 화력 발전소의 공랭식 발전기에서도 진동으로 인한 손상 문제가 발생되고 있다. 한편 발전기 진단 및 수명 평가의 일환으로 현재 발전소에서 주로 사용되는 방법은 전기적 시험에 근거하고 있으나 발전기의 기계적 진단은 거의 이루어지지 않고 있다. 전술한 바와 같이 발전기 운전 중 발생하는 전자력에 의한 진동은 발전기의 신뢰성 있는 운전과 수명에 큰 영향을 끼친다.

따라서 본 고에서는 국내에 운전 중인 발전기 고정자 권선 단말부의 진동에 초점을 맞추어 발전기 고정자 권선 단말부를 ANSYS를 이용하여 모델링하고 해석한 결과와 실제 운전 중인 발전기 고정자 권선의 진동 모드와 비교 분석하였다. 또한 발전기 고정자 권선에 기계적 건전성 시험을 통하여 불량 권선을 진단하고 권선을 보완한 사례를 기술하였다.

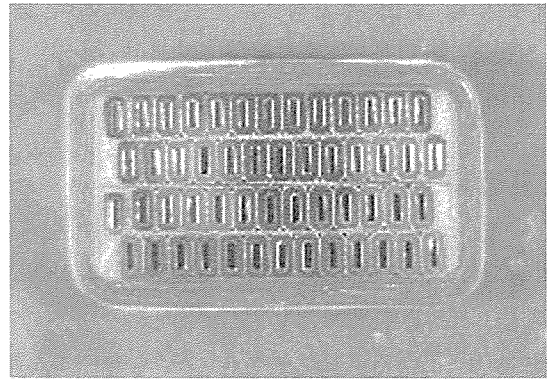
2. 수냉식 발전기 고정자 구조

발전기는 제작사에 따라 차이가 있으나 정상 운전 중 발생하는 전자력 또는 로터 회전에 따른 기계력과 같은 정상 상태의 힘과 3상 단락과 같은 과도력에 견딜 수 있는 구조로 제작되어야 한다.

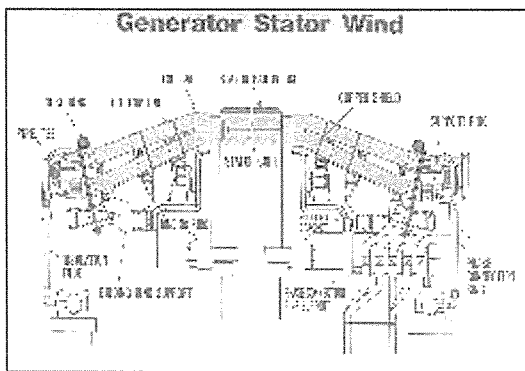
일반적인 수냉각 발전기 고정자의 구조는 그림 1과 같으며 크게 프레임, 고정자 철심, 권선 및 권선 지지장치, 그리고 냉각수 공급을 위한 테프론 호스와 헤더로 구성된다. 고정자 프레임에 고정된 키바(key bar)에 적층된 고정자 철심의 슬롯에 고정자 권선이 2단으로 삽입되며, 이들을 구속하기 위하여 웨지가

사용된다. 고정자 슬롯에서 나온 상하 권선은 스페이서와 끈으로 인근 권선들과 묶여 있으며 내부 링과 외부 링 그리고 권선 지지장치에 의하여 구속되어 있다. 따라서 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.

고정자 권선의 내부 구조는 그림 2와 같이 전기가 흐르는 내부 동도체에는 발생하는 열을 냉각시키기 위하여 많은 냉각수 통로가 있으며 외부에는 마이카에폭시 절연 재료로 둘러싸여 있다.



[그림 2] 수냉식 발전기 고정자 권선



[그림 1] 발전기 고정자의 구조

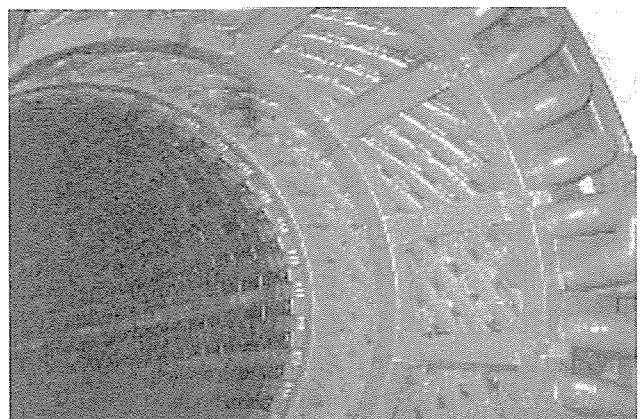
3. 고정자 단말 권선의 진동

발전기 고정자 권선에 작용되는 힘은 터빈-발전기 로터의 불평형 또는 기계적 결함에 의하여 발생하는 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 고에서는 비정상 상태에 의한 과도한 힘에 비해 상대적인 크기는 작지만 정상 운전 중 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 운전 중에 회전자에 의하여 전자장이 회전하므로 발전기는 동적인 힘을 받는다. 즉, 2극 발

전기의 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 운전 중 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 과급 사고를 유발시킬 수 있다. 사진 1은 국내 I 발전소의 전자력에 의한 권선 진동으로 발생된 절연파괴의 예를 보이고 있다. 따라서 권선 단말부의 진동은 미연에 방지하여야 하며 진동을 감지하였을 때는 즉시 대책을 세워야 한다. 고정자 권선과 스페이서 사이의 상대 운동은 마



[사진 1] 권선 진동에 의한 절연파괴

떨의 원인이 되고 부가적으로 느슨하게 하여 더욱더 큰 진동과 마멸을 유발시킨다. 이러한 현상은 계속 축적되어 심각한 상태에 이르게 한다.

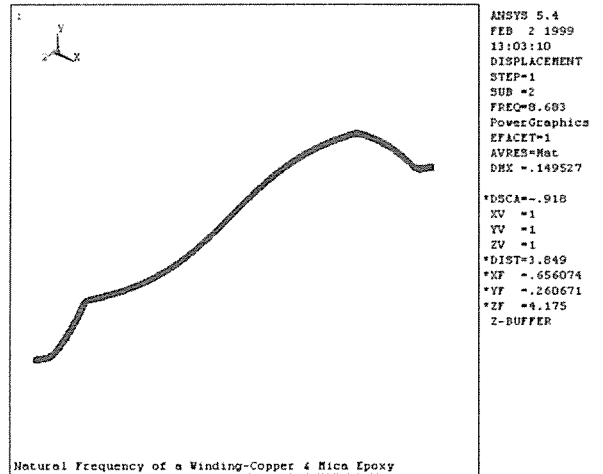
4. 고정자 권선의 진동 해석

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 발전기 고정자 권선을 대상으로 발전기 운전 중 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 단순화시킬 필요가 있다. 따라서 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.

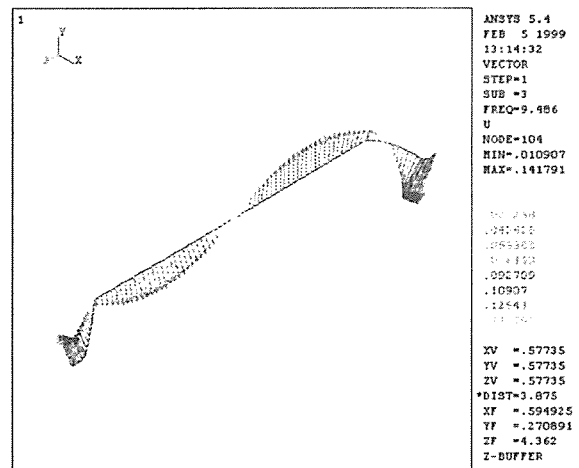
4.1 단일 권선 해석

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 재료의 물성치를 등가시켜 빔요소를 이용하여 해석한 결과를 비교 분석하였다. 그림에서 보는바와 같이 고정자 단일 권선의 모드 형상이 각각 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한, 해석 결과의 검증 기준을 삼기 위하여 해석에 사용한 단일 권선의 주파수 응답 시험을 수행한 결과는 그림 4와 같다. 표 1은 이상의 해석 결과와 시험 결과를 정리한 것으로써 복합 재질을 고려한 해석 결과와 빔 요소로 단순화하여 물성치를 등가시킨 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 등가시키고 빔 요소로 단순화하여 해석하는 것이 타당함을 알 수 있다.



(a) solid modeling



(b) beam modeling

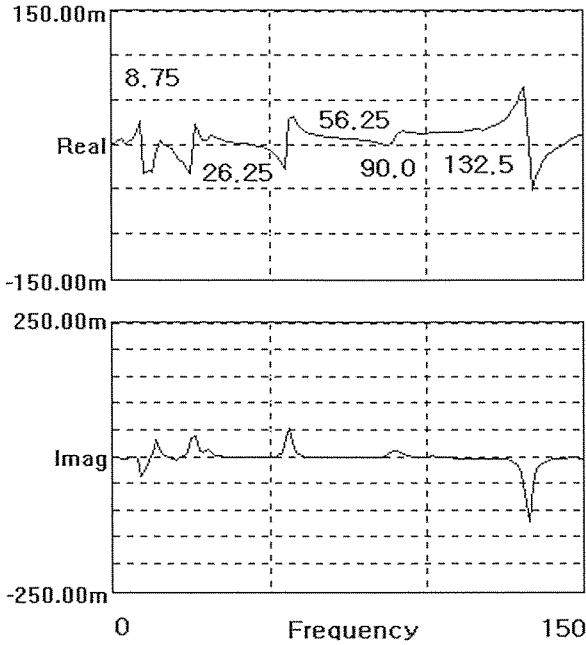
[그림 3] 단일 권선의 모드해석 결과

[표 1] 단일 권선 해석 및 실험 결과

고유 주파수	해석 결과			실험 (Hz)	오차II (%)
	복합재질	등가	오차I (%)		
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

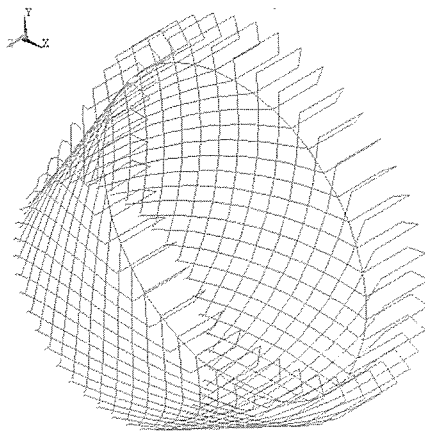
오차 II=(실험결과-등가물성치에 의한 결과)/(실험결과) × 100



[그림 4] 단일 권선에 대한 주파수 응답 시험

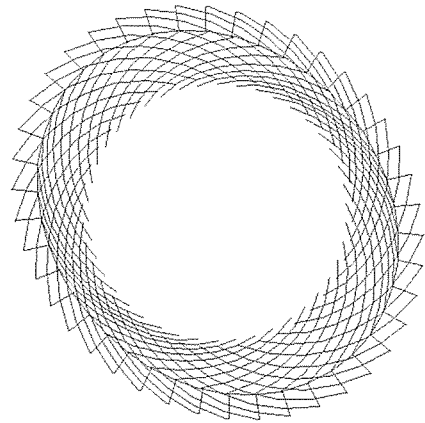
4.2 고정자 단말 권선 해석 및 시험

권선 해석의 단순화에 대한 타당성 검증을 토대로 발전기 고정자 단말 권선을 그림 5와 같이 빔 요소로 모델링하여 해석하였다.

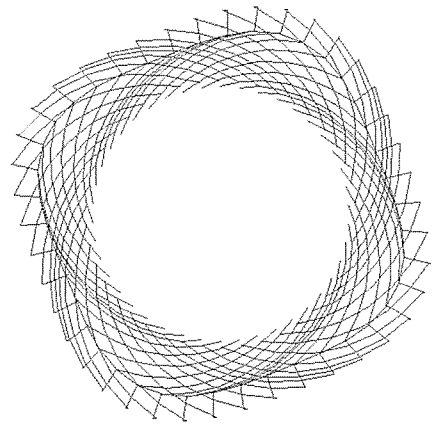


[그림 5] 고정자 권선 모델링

해석은 Block Lanczos Method를 사용하였으며 발전기 고정자 코어 끝단에서의 경계 조건으로 발전기 축 방향을 제외한 모든 방향을 구속하였다. 그림 6은 발전기 고정자 단말 권선을 ANSYS 해석한 결과이며 이를 검증하기 위하여 발전소의 발전기 고정자 단말 권선에 대한 모드 시험을 수행하여 비교한 결과 그림 7과 같이 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.



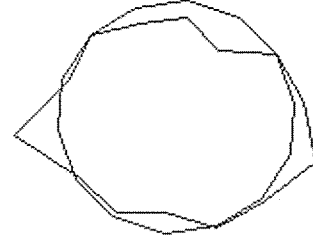
(a) $n = 2$ (52Hz)



(b) $n = 4$ (82Hz)

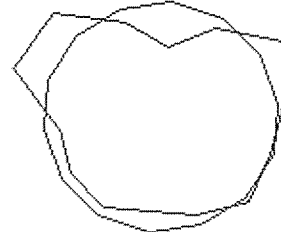
[그림 6] 단말 권선 진동 해석 결과

Undeformed, # 3:52.99 Hz



(a) $n=2$: 53Hz

Undeformed, # 6:84.96 Hz



(b) $n=4$: 85Hz

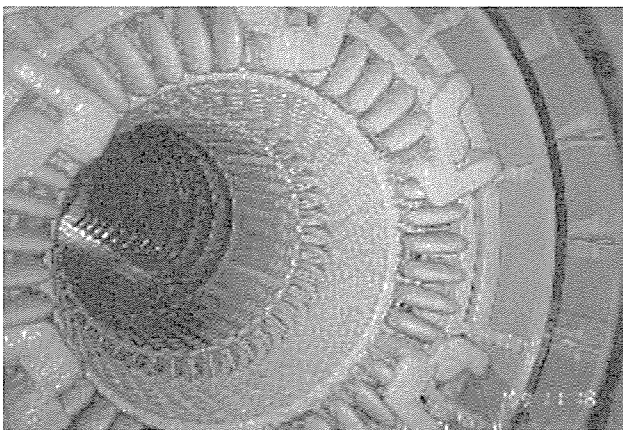
[그림 7] 단말 권선의 모드 시험 결과

5. 사례 분석

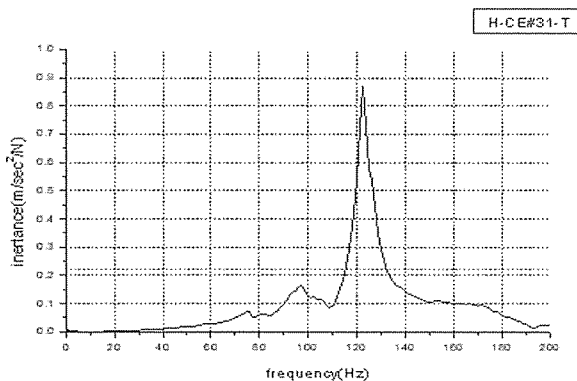
전력연구원에서는 현재까지 약 100여기의 국내 발전소의 발전기 고정자 권선에 대한 진동 특성 평가를 수행하고 있으며 그 결과, 수냉각 발전기 뿐 아니라 복합화력의 공랭식 발전기의 불량 상태를 예측 진단하여 보완하였다. 본 고에서는 국내 대용량 발전기의 대부분을 차지하고 있는 수냉각 발전기 고정자 권선 불량 보완 사례와 공랭식 발전기의 진동에 의한 철심 손상 사례를 기술하였다. 본 시험은 발전기 고정자 철심과 고정자 권선으로 나누어 평가 하며 고정자 권선에 대한 시험은 크게 선형성 시험, 주파수 응답 시험 및 모드 시험으로 구분할 수 있다.

5.1 수냉각 발전기 권선 보완 사례

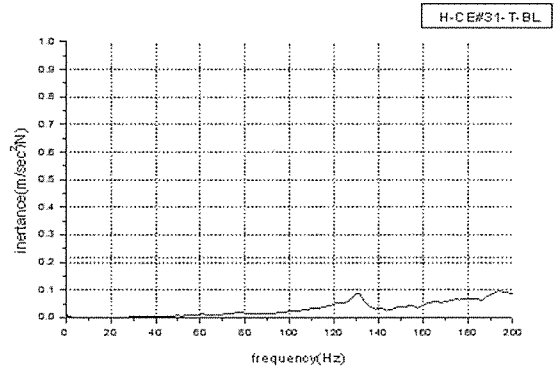
국내 T 발전소의 고정자 권선에 대한 진동 특성 시험 결과, 다수의 권선이 전자력에 의한 가진 주파수와 공진 위험 영역에 권선의 고유 진동수가 존재함을 알 수 있었으며 사진 2와 같은 보완을 통하여 그림 8과 같은 양호한 진동 특성을 얻을 수 있었다.



[사진 2] 불량 권선에 대한 보완



(a) 평가 결과(122Hz, 869mm/sec²/N)



(b) 권선 보완 후

[그림 8] 불량 권선 보완 전후의 진동 특성 비교

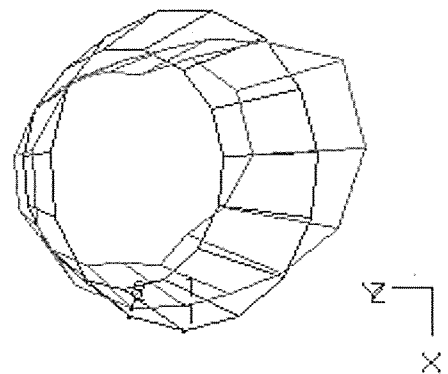
5.2 공랭식 발전기 철심 손상 사례

복합화력 발전소에서 운전중인 공랭식 발전기의 고정자 권선에 대한 진동 특성 시험을 수행한 결과, 고정자 권선 단말부의 진동 모드가 2극 발전기에서 회피하여야 할 2차 모드가 전자력에 의한 공진 주파수인 120Hz 부근에 존재하여 전자력에 의한 공진으로 인한 부품 탈락과 이로 인하여 철심이 손상된 사례이다. 그림 9는 권선 단말부의 진동 모드를 보이고 있으며 사진 3은 철심 손상을 보인다.



[사진 3] 철심 손상 사례

Undeformed, # 6:128.06 Hz



[그림 9] 고정자 권선 단말부 진동 모드

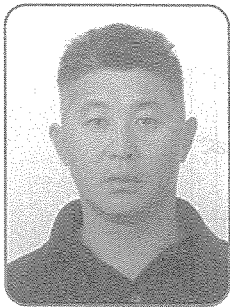
6. 결론

발전기 고정자 철심 및 권선의 기계적 건전성을 확보함으로써 운전중 발생 가능한 진동에 의한 마멸, 누수 등 제반 문제점을 예방할 수 있으며, 발전기 수명 단축 요인을 저감할 수 있다. 전력연구원에서는 발전기 고정자 철심 및 고정자 권선에 대한 진동 특성 시험을 통하여 불량 권선의 보완 및 진동 손상에 대한 예측 진단을 수행하고 있으며 이를 통하여 발전기 운전 신뢰성 증진과 수명을 제고할 수 있으리라 사료된다. 또 발전기 고정자 권선의 효과적인 보완을 위하여 국내에서 운전되는 화력 발전소의 발전기 고정자 단말 권선에 대한 진동 해석을 수행하였으며 그 결과, 실제 발전기 고정자 단말 권선에 대한 진동 모드 시험 결과와 잘 일치하였다. 상기 결과를 통하여 향후 발전기 고정자 권선에 대한 설계 변경 등의 효과적인 대응이 가능하리라 기대된다. 또 발전소 발전기 고정자 권선의 진단 데이터를 확보하여 차기 정기 정비시 진단의 지표로 삼음으로써 발전기 수명 및 발전소 운전 신뢰성을 증진시킬 수 있게 되었다.

7. 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) Y.C Bae, H.S Kim, Y.W Kim, H. Lee, S.H Kim, "Evaluation of Mechanical Integrity for Water Cooled Generator Stator Windings in Power Plants", ACSIM, 2000
- 4) 배용채, 김희수, 김연환, 이현, "수냉식 발전기 고정자 권선의 진동 특성", 소음진동학회 춘계 학술대회, 5. 1999
- 5) 배용채 외, "발전기 모델별 고정자 권선의 진동 특성 비교", 소음진동학회 춘계 학술대회, 6. 2000

기력발전소 터빈 정비사례



한전기공(주)
기술연구소 전문원실
일반전문원 김 병 철
Tel : (031)710-4428

I. 개요.

1. 현황.

○○사 100MW 복합증기터빈은 Single Reheat Two

Cylinder Tandem Compound Double Flow Condensing Type(TC2F-25)으로 MHI에서 공급하여 1987년 9월 10일부터 상업운전 개시후 2001년 8월 22일 까지 115,300 시간의 운전기록을 가지고 있으며 건설이후 고압케이싱 증기누설, 증기입구부 고온볼트 손상교체 5회 이상으로 노즐박스 방열판 설치 및 고압 케이싱 열전대 설치등의 정비이력을 가진 기기로서 2001년 8월 베어링 사고로 인한 증기터빈 점검시 각부에 대한 점검 및 수정기록으로 동종의 설비를 관리하는데 참고 사례로 활용을 위해 기고한다.

2. 주요정비 내용.