

발전용 가스터빈 Rotor 정지조건별 최적 Turning 운전시간 고찰: 501기종 현장실험 중심으로

유원주* · 이창열*

*한국동서발전(주)

A Study on Optimal Turning Operation Time for Rotor Stop Condition in Gas Turbine: Based on Field Test of W501 Machines

Won-Ju Yu* · Chang-Yeol Lee*

*Korea East-West Power Co., Ltd.

Abstract

As the capacity of renewable power generation facilities rapidly increases, the variability of electric power system and gas turbine power generation is also increasing. Therefore, problems may occur that require urgent repair while the gas turbine rotor is stopped. When the gas turbine rotor turning is stopped and then restarted, if the turning period is not appropriate, severe vibration may occur due to rotor bending.

As a result of the experiment, it was confirmed that normal operation is possible when the gap data measured at the start of rotor turning after maintenance work is similar to the existing value. And the vibration value at the start of rotor turning was lower as the rotor temperature was lower or the stop period was shorter.

Keywords : Gas Turbine, Rotor Bending, Bearing Vibration, Turning Operation, Disc Cavity Temperature

1. 서론

최근 신재생 발전설비의 급격한 용량 증가로 인해 전력 계통에 대한 변화가 커지면서 [1] [2] 침투부하를 주로 담당하던 가스터빈 복합발전의 필요성과 [3] 함께 운전상태의 변동성도 급격히 커지고 있다. 따라서 가스터빈 Rotor를 정지해야 하는 고장과 긴급작업 발생이 많아지고, 장기간 급전대기가 필요한 상황도 많이 발생하는 문제점이 있다.

가스터빈 발전설비 긴급정지로 인한 Rotor 정지시나 장기간 정지후 Turning 시간이 적절하지 않으면 굽힘현상(bending)에 의한 손상이나 고진동이 발생할 수 있다. [4] 가스터빈 Rotor는 터빈의 에너지를 회전 운동으로 전달하는 장치로, 정상적인 회전 운전시에는 상하부에 균일한 하중과 온도분포가 작용하므로 굽힘현상이 발생되지 않는다. 그러

나 Rotor 회전이 정지될 경우에는 자체 중량으로 인한 기계적 하중이 작용하거나 Rotor 주변 환경 조건에 의한 온도 차이로 열응력이 작용하여 [Figure 1]과 같은 굽힘현상이 발생하게 된다. [5] 양측에 베어링이 지지하는 일반적인 형태에서는 중간에 하중이 작용하여 굽힘현상이 발생하게 되고, 상하부의 온도차가 많이 발생하는 경우에는 온도가 높은 부분이 팽창하여 굽힘현상이 발생하게 된다. [Figure 2]는 굽힘현상이 발생한 상태에서 회전운동으로 교정이 될 경우 축의 굽힘각도 변화상태를 나타내는 그래프로, 시간이 경과하면서 복귀하게 된다. [6]

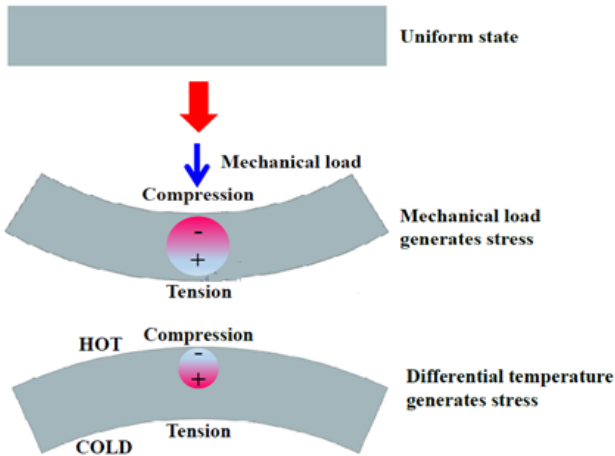
일반적으로 Rotor를 정지하는 경우에는 굽힘현상 최소화를 위하여 충분한 Turning 운전 시간이 요구된다. 그러나 Rotor 정지조건에 따라 적절히 대응할 수 있는 최적 Turning 시간에 대한 연구가 부족하여 대부분 제작사에서 정해진 기준으로만 운전하고 있다. 제작사 기준으로는

†Corresponding Author : Won-ju Yu, Technical Expertise Research Center, Korea EWP Co., 77, Gubongsanbuk-ro 94, Soe-gu Deajeon, E-mail: u86104@ewp.co.kr

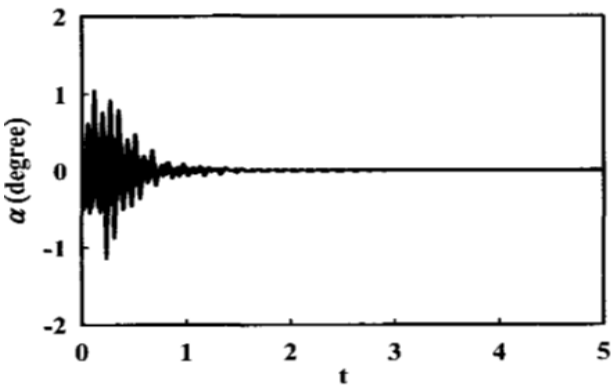
Received August 18, 2023; Revision September 19, 2023; Accepted September 27, 2023

Turning 운전시간이 일괄적으로 장시간 소요되는 경향이 있다. 그러나 시간을 단축할 경우 대형고장 발생 우려가 있고, 필요 이상으로 시간이 소요될 경우에는 손실이 커지는 문제점이 있으므로 최적의 Turning 운전 시간에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 실제 운영중인 가스터빈에서 정비를 위하여 Rotor Turning 정지시, 정지조건에 따라 발생하는 진동값 안정에 소요되는 Turning 운전 시간의 상관관계를 분석하였으며, 경제성과 안정성을 고려한 최적의 Turning 운전 시간에 대하여 고찰하였다. Rotor 진동은 질량 불평형, 베어링 이상, 유체간섭, 굽힘현상 등 다양한 원인에 의해서 발생할 수 있으나, [7] Turning 정지시에는 주로 Rotor 중량에 의한 굽힘현상이 발생하게 된다. Rotor 굽힘현상은 정지시점의 금속온도와 주변온도, 정지 작업 시간과 Turning 방법과도 상관관계가 있으므로, 향후 가스터빈 설비 운영자가 고려해야 할 방향에 대하여 논하고자 한다.



[Figure 1] Bending phenomenon due to mechanical load and temperature difference [5]

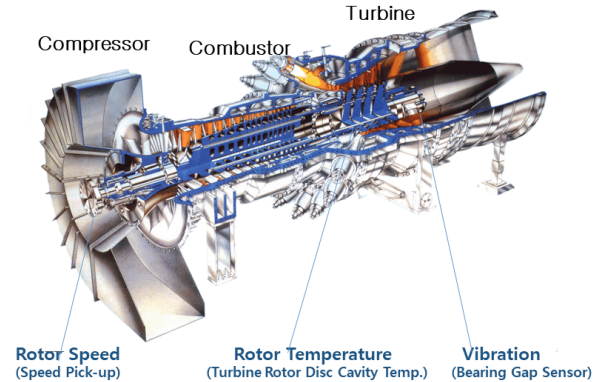


[Figure 2] Time response of the rotor bending angle about the X-axis [6]

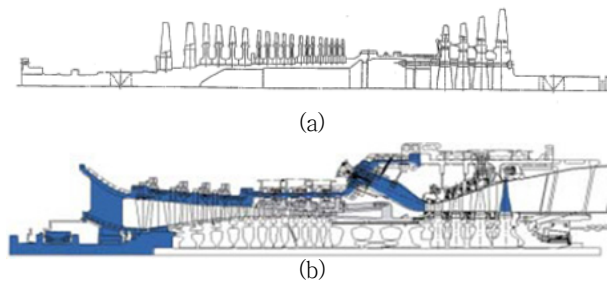
2. 실험대상 및 방법

[Figure 3]은 실험대상 설비인 WH(현재 Siemens)사의 W501D5(100MW급)와 W501F(160MW급) 기종의 가스터빈 구성도를 나타내었으며 [8], [Figure 4(a,b)]는 W501D5와 W501F 기종의 가스터빈 Rotor 형식을 나타낸 것이다. [Figure 4(a)]의 Rotor는 4개의 터빈측 Disc를 Multiple Bolt로 조립하였으며, 압축기측은 내부가 비어 있고 외부에서 링을 열박음하는 방법으로 제작되었다. [Figure 4(b)]의 Rotor는 W501D5와는 조금 다르게 압축기와 터빈 측 모두 Disc 형식의 Rotor를 Multiple Bolt로 조립하는 구조로 제작되었다.

가스터빈 Rotor 정지조건에 따른 진동발생 영향을 파악하기 위하여 [Figure 3]에서와 같이 측정장치를 설치하였다. Speed Pick-up 센서로 Rotor 회전수를 측정하였고, 터빈 2단 Rotor 디스크 공극(disc cavity, DCC)에 Thermocouple 센서를 설치하여 Rotor 온도를 측정하였으며, 베어링 베어링의 Gap 센서로 진동의 크기를 측정하여 정지시점의 조건과 Turning 운전시간의 변화에 따른 상관관계를 분석하였다.



[Figure 3] Gas turbine structure and sensing position [8]



[Figure 4] Gas turbine W501D5 shrink-fit type(a) and W501F multi-bolt disc type(b) rotor

<Table 1>은 가스터빈 제작사별 Rotor 재질을 나타내

었으며, 실험대상 설비인 WH/Siemens 사는 크롬 몰리브덴이 포함된 자성체의 철강재를 사용하고 있다.

<Table 2>는 W501D5, W501F와 상위 기종인 M501J 가스터빈의 Rotor 굽힘현상 해소를 위한 운전기준을 나타낸 것이며, M501J 기종의 가스터빈에서는 일부 개선된 운전기준이 적용되고 있다.

<Table 3>은 연구대상 설비의 Rotor 운전상태별 회전수와 진동 관리기준과 정상범위 운전값을 나타낸 것으로, 본 논문의 상관관계 분석시 운전 기준값으로 적용되었다.

<Table 1> Gas turbine rotor material by manufacturer

Manufacturer	Rotor material	Remark
WH/Siemens	Ni-Cr-Mo-V	magnetic substance
	22Cr-Mo-V, 12Cr-Ni-Mo	
MHPS	3.5Ni-Cr-Mo-V	
ABB	12Cr-Ni-Mo-V	
GE	IN 706	non-magnetic
	IN 718	

<Table 2> Standards for gas turbine rotor turning by manufacturer[9] [10]

Item	Description	
Turning stop point	- Over 72hrs after GT shut down * M501J : Over 48hrs - Disc cavity temp. under 65°C (Stop less than 1min above 65°C, rotates and maintains 180° as much as the stop period)	
Required turning hours	- Over 24hrs before GT start-up * M501J GT turning hours	
	Stopped hours	Required hours
	Over 3hrs	Over 12hrs
	1~3hrs	Over 8hrs
	~ 1hr	Over 4hrs

<Table 3> Rotational speed and vibration value by operation condition

Operation mode	Speed (rpm)	Vibration (μm)	
		Normal	Alarm
Turning	3	4~7	-
Spin	500~900	20~40	-
Normal	3600	~100	146

3. 결과 및 고찰

3.1 단시간 Rotor Turning 정지 영향

3.1.1 Rotor 온도가 기준값인 경우

[Figure 5]는 Rotor 온도가 제작사 제시 기준온도(65°C)와 유사한 54~65°C에서 정지하여 약 6시간 동안 정지작업후 Turning 운전한 경우의 진동값을 측정된 결과이다.

Turning 운전 시작시 진동값은 정지전의 8μm보다 6배 정도 높은 약 48μm로 운전되었고, 시간이 지날수록 감소하는 추세를 보였다. Turning 운전 초기에는 빠르게 감소하다가 시간이 지날수록 감소폭은 줄어들어 약 8시간이 경과한 후에는 정지전의 진동값과 유사해졌으며, [Figure 2]와 유사한 형태로 나타나는 것을 알 수 있었다. 9시간 Turning 운전후 정지전 진동값과 유사한 상태에서 가스터빈 운전을 위한 기동을 시도한 결과 정상적인 상태로 운전되었다.

Rotor 온도가 제작사 제시기준 온도 근처에서 Turning 운전을 정지한 경우에는 원래의 진동값으로 복귀하는데 정지시간보다 더 긴 Turning 운전 시간이 필요하였으며, 약 6시간 정지시 8시간 Turning 운전후 진동값이 안정되었다.

3.1.2 Rotor 온도가 기준보다 낮은 경우

[Figure 6]은 Rotor 온도가 제작사 제시기준 온도(DCC 65°C)보다 낮은 21~28°C 상온에서 정지하여 약 5시간 동안 정지작업후 Turning 운전한 경우의 진동값을 측정된 결과이다.

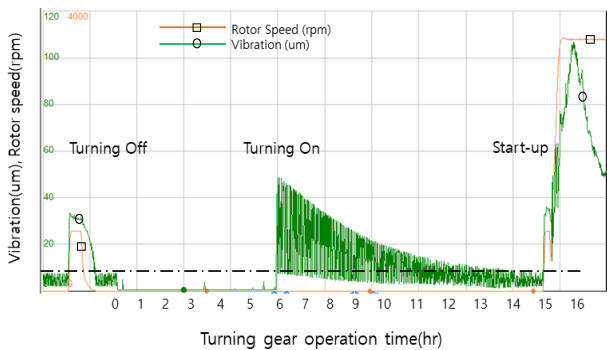
Turning 운전 시작시 진동값은 정지전의 7μm보다 2.4 배 정도 증가한 약 17μm로 운전되었고, 시간이 지날수록 감소하는 추세를 보였다. [Figure 5]보다 감소폭은 작지만, Turning 초기에 빠르게 감소하다가 시간이 지날수록 감소폭은 줄어들어 약 4시간이 경과한 후에는 정지전의 진동값과 유사해졌다. 동일한 진동값에서 2시간 추가로 Turning 운전후 가스터빈 운전을 위한 기동을 시도한 결과 정상적인 상태로 운전되었다.

Rotor 온도가 제작사 제시기준 온도보다 낮은 상온 상태에서 Turning 운전을 정지한 경우에는 정지시간보다 짧은 Turning 운전으로 원래의 진동값으로 복귀되었으며, 약 5시간 정지시 4시간 Turning 운전후 진동값이 안정되었다.

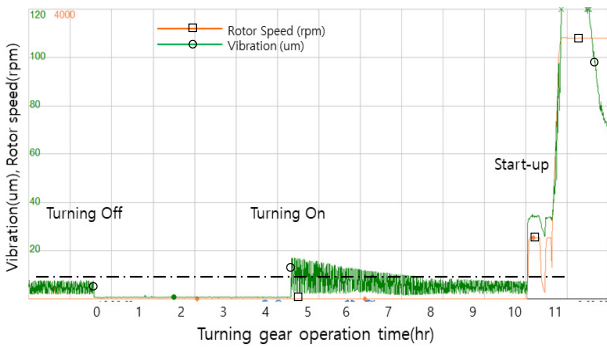
3.1.3 Rotor 온도가 기준보다 높은 경우

[Figure 7]은 Rotor 온도가 제작사 제시 기준(DCC 65℃)보다 높은 110~120℃에서 정지하여 약 4.5시간 동안 정지작업후 Turning 운전 및 Spin 운전을 시도한 경우의 진동값을 측정한 결과이다.

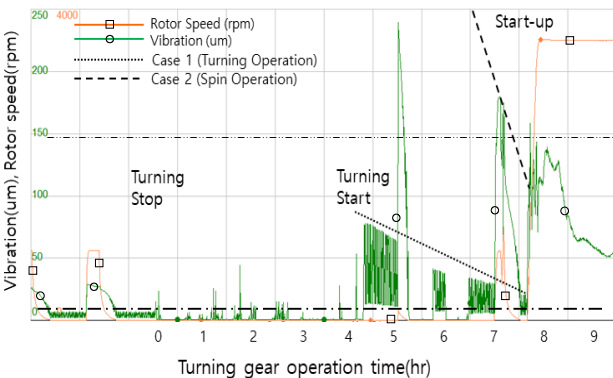
Turning 운전 시작시 진동값은 정지전의 7μm보다 10배이상 높은 약 78μm로 운전되었으며, 시간이 지날수록 빠르게 감소하는 추세를 보였다.



[Figure 5] Vibration trend when rotor turning stopped for 6hrs at 65℃



[Figure 6] Vibration trend when rotor turning stopped for 5hrs at 28℃



[Figure 7] Vibration trend when rotor turning stopped for 5hrs at 120℃

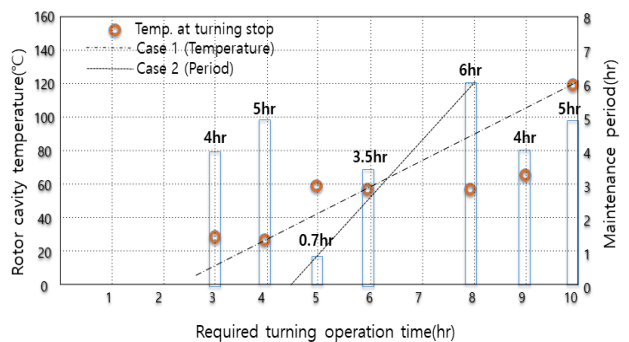
약 1시간 Turning 운전후 65μm에서 1차 Spin 운전을 시도하였으나, 승속중 120rpm에서 진동값이 정상값보다 매우 높은 235μm이상으로 급격히 증가하여 운전이 불가하였다. <Table 2>에서와 같은 굽힘현상 감소 방안으로 Rotor 정지시 각도에서 180° 회전하고 약 0.5시간 유지후 다시 Turning 운전을 시행한 결과, 진동값은 많이 감소하였으나 여전히 기존 진동값보다는 매우 높은 상태로 나타나 추가 Turning 운전을 시행하였다. 약 3시간 Turning 운전후 진동값은 정지전보다 약 4~5배정도 높은 30μm까지 감소하여 2차 900rpm Spin 운전을 시도한 결과, 진동값은 감소하였으나 179μm로 정상운전 값보다 매우 높게 나타났다. Turning 운전시 진동값이 약 20μm까지 감소한 상태에서 3차 Spin 운전을 시도한 결과, 900rpm에서 진동값이 110 μm로 감소되었으며, 3600rpm까지 승속한 결과 정상적인 운전상태의 진동값보다 높은 약 140μm까지 상승하였으나 점차 안정되는 추세를 보였다.

[Figure 7]의 Case 1은 Turning 운전시 진동값 감소 추세이고 Case 2는 Spin 운전시 진동값 변화추세로, Turning 운전시의 진동값이 속도가 높아지는 상태의 진동값에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 이는 Rotor의 굽힘현상에 의해 질량 불균형이 발생하는 것으로, 회전시 원심력이 증가함으로써 식(1)과 같이 회전수 증가에 따른 진동값도 급격히 증가하였다.

$$X \propto me\omega^2 \quad \text{식(1)}$$

여기서 X 는 진폭, $me=kg\cdot mm$, $\omega=회전각속도$

Rotor 온도가 제작사 제시기준보다 더 높은 상태에서 Turning 운전을 정지할 경우 정지전 진동값보다 훨씬 높게 나타났으며, 정지되었던 시간보다 더 많은 시간이 경과되어야 원래의 진동값으로 복귀되는 것으로 나타났다.



[Figure 8] Required turning operation time according to rotor temperature and stop period

3.1.4 실험결과 고찰

[Figure 5~7]의 실험결과를 통하여 단시간 긴급정비의 경우, 정비후 Rotor Turning 운전시 진동값이 정지전 진동값과 유사하게 복귀한 상태에서는 설비의 정상 기동과 운전이 가능함을 알 수 있었다.

[Figure 8]은 [Figure 5~7]과 같이 일정시간 긴급작업 후 다시 Rotor를 Turning 운전하는 경우, Turning 운전 시작시점에서 정지전 진동값으로 복귀하여 안정되는데 소요되는 몇 가지 사례의 시간을 측정한 결과이다. Rotor Turning 운전 시작후 진동값은 Turning 정지시 Rotor 온도가 낮을수록, 정지시간이 짧을수록 더 낮은 것으로 나타났다. 따라서 단시간 긴급정비작업 또는 Rotor Tuning 운전 시작후 진동값을 빨리 안정시키기 위해서는, 가능한 Rotor 온도가 낮은 상태에서 정지하고 정비작업 시간을 최대한 짧게 할 필요가 있는 것으로 분석되었다.

실험결과, Rotor 온도가 낮은 상온에서 정지하여 4~5시간 정비할 경우에는 진동값 안정을 위한 터닝시간이 정지시간보다 짧은 3~4시간 정도 필요하였고, 정지기준 온도인 65℃ 근처에서 정지할 경우에는 정지시간보다 긴 6~8시간 정도의 Turning 운전이 필요하였다. Case 1에서와 같이 동일한 시간동안 정비를 위하여 Turning 운전이 정지된 경우에도 정지시 Rotor 온도에 따라 진동값 안정에 필요한 Turning 운전시간은 2배이상 차이를 보였다. 즉 가능한 Rotor 온도가 낮은 상태에서 Turning 운전이 정지되어야 급힘현상에 의한 진동영향이 적음을 알 수 있었다. 또한 Case 2에서와 같이 유사한 Rotor 온도에서 Turning 운전을 정지한 경우에도 정지된 시간에 따라 진동값 안정에 필요한 Turning 운전시간은 다르게 나타났다. 즉 가능한 Turning 운전 정지시간이 짧아야 급힘현상에 의한 진동영향이 적음을 알 수 있었다.

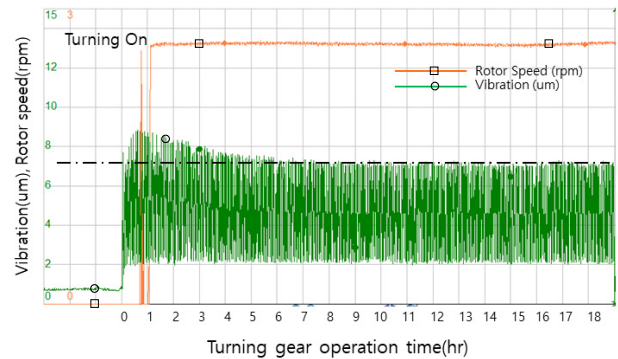
Case 1과 Case 2의 실험결과로 볼 때, 단시간 Rotor Turning 정지 작업시의 급힘현상은 정지시 온도와 정지시간에 모두 영향을 받지만 온도에 더 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

3.2 장기간 Rotor Turning 정지 영향

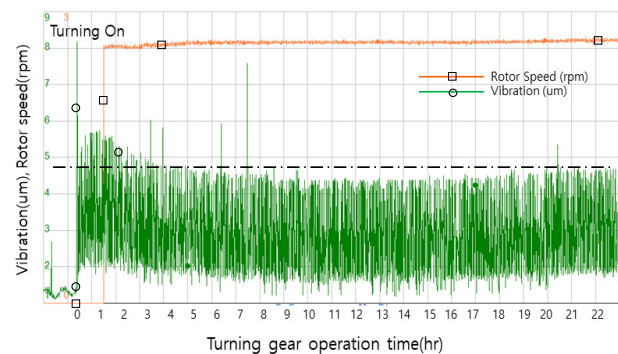
3.2.1 Rotor 온도가 기준값인 경우

[Figure 9]는 Rotor 온도가 제작사 제시 기준온도인 65℃에서 정지하여 33일간 정비작업후 상온인 28℃에서 Turning 운전을 시행한 경우 진동값을 측정한 결과이다. 단 장기간 정지중에도 터빈 Blade 교체작업을 위하여 간헐적으로 Turning을 시행하였다.

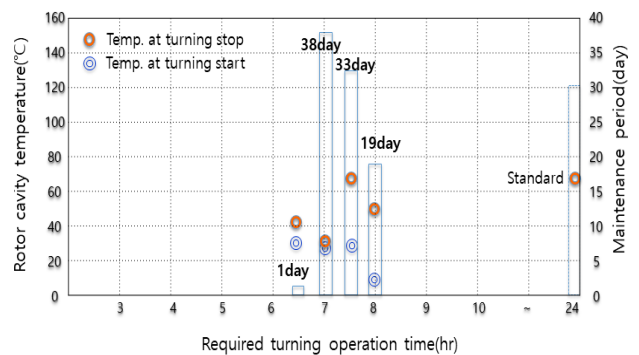
Turning 운전 시작시 진동값은 기존의 정지전보다 30% 정도 높은 약 9 μ m로 운전되었고, 시간이 지날수록 감소하는 추세를 보였다. 동일하게 Turning 운전 초기에는 빠르게 감소하다가 시간이 지날수록 감소폭은 감소하여 약 7~8시간이 경과한 후 정지전의 진동값과 유사하게 복귀되었다.



[Figure 9] Vibration trend when rotor turning stopped for 33days at 65℃



[Figure 10] Vibration trend when rotor turning stopped for 38days at 29℃



[Figure 11] Required turning operation time according to rotor temperature and stop period

3.2.2 Rotor 온도가 기준보다 낮은 경우

[Figure 10]은 Rotor 온도가 제작사 기준온도보다 낮은 29℃에서 정지하여 30일간 장기 정비작업후 Turning 운전을 시행한 경우 진동값을 측정된 결과이다. 단 장기간 정지중에도 동일하게 터빈 Blade 교체작업을 위하여 간헐적으로 Turning을 시행하였다.

Turning 운전 시작시 진동값은 정지전보다 25%정도 높은 6 μ m이하로 운전되었고, 시간이 지날수록 감소하는 유사한 추세를 보였다. Turning 초기에는 빠르게 감소하다가 시간이 지날수록 감소폭은 감소하여 약 7시간이 경과한 후에는 정지전의 진동값과 유사하게 되었다.

3.2.3 실험결과 고찰

[Figure 9,10]의 실험결과를 통하여 장기간 Rotor Turning 정지시, Rotor 온도가 제작사 제시 기준온도와 같거나 낮은 상태에서 정지할 경우에는 단기간 정지시의 실험결과와는 다르게 나타났다. 장기간 Turning 정지시에는 정지시 온도와 정지기간에 따른 Turning 운전 시작시 진동값 편차와 기준값으로의 복귀시간 차이가 크지 않음을 알 수 있었다.

[Figure 11]은 [Figure 9,10]과 같이 Rotor를 장기간 정지하는 정비작업후 다시 Turning 운전하는 몇가지 경우에 대해, Turning 운전 시작시점에서 정지전 기준 진동값으로 안정되는데 소요되는 시간을 측정된 결과이다.

Rotor Tuning 운전 시작후 진동값은 Turning 정지시 Rotor 온도가 기준값 이하일 경우 온도와 정지기간에 따른 상관관계는 거의 없는 것으로 나타났다. Turning 정지시 Rotor 온도가 낮을수록, 정지시간이 짧을수록 더 빨리 안정되는 단기간 긴급작업시 안정시간과는 다른 결과를 보였다. 이는 Rotor 온도에 따라 영향을 받으면서 굽힘현상이 제한되고 이에 따라 진동값의 복귀시간도 제한되므로 유사한 결과를 보이는 것으로 판단되었다.

이러한 결과의 차이로 볼 때, 장기간 정지가 필요한 정비작업시에는 Rotor를 기준온도 이하로 냉각시킬 수 있는 충분한 시간이 주어지고, 정비작업중에도 회전부 점검과 터빈 Blade 교체 작업을 위하여 간헐적으로 Turning을 진행하므로 굽힘현상이 더욱 감소될 수 있는 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 가스터빈 Rotor Turning 운전 정지시 온도와 정지 시간에 따른 진동값 변화 영향에 대하여 고찰

하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

(1) Rotor Turning 운전 정지시의 조건에 따라 Rotor 굽힘현상이 발생되며, 굽힘이 발생된 정도의 값은 Turning 운전 시작시 베어링 Gap 센서 진동값으로 확인할 수 있었다. 모든 실험에서 Turning 운전 시작시 진동값은 기본보다 높은 상태에서였으며, Turning 운전 시간이 경과함에 따라 감소하는 동일한 추세를 보였다.

(2) 단시간 정비작업시 Rotor Turning 운전의 영향을 분석한 결과, Rotor Tuning 운전 시작 진동값은 정지시 Rotor 온도가 낮을수록 정지시간이 짧을수록 더 낮게 나타났다. 진동값이 안정되는 시간은 Tuning 정지시 Rotor 온도가 상온일 경우에는 정지시간보다 더 짧았고, 기준온도 가까이 높은 상태에서 정지할 경우에는 정지시간보다 더 긴 시간이 필요하였다.

(3) 장기간 정비작업시 Rotor Turning 영향을 분석한 결과, 기준온도 이하에서 정지할 경우 단시간 정비작업시와는 다르게 정지시 온도와 정지기간에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한 기동시 제작사 Turning 운전 시간 제시기준보다 더 짧은 시간에 진동값이 안정되는 것으로 나타났다.

(4) 정지작업후 Rotor Turning 운전시 측정된 진동값이 정지전 값과 유사한 범위에 근접할 경우에는 가스터빈을 기존과 같이 정상적으로 운전이 가능함을 확인하였다. Turning 운전시 진동값이 기존보다 높은 상태에서 승속 운전할 경우에는 더 높은 진동값으로 나타나 운전이 불가하였다.

따라서 가스터빈 Rotor 굽힘현상 최소화와 안정적인 운전을 위해서는, Turning 운전 정지시 온도를 가능한 낮게 하고 정지시간을 짧게 유지하여야 하며, Turning 운전시 진동값이 기존 진동값과 유사하게 복귀한 상태에서 설비를 기동하여야 한다. 또한 정지작업중 가능한 시간동안이라도 Turning 운전을 시행할 경우 더 빠른 시간에 굽힘현상을 해소할 수 있을 것으로 본다. 그리고 향후 가스터빈 분야에서 Rotor 정지후 Turning 운전 시작시 발생하는 베어링 Gap Data를 기반으로 자동 분석하여 설비의 기동가능 시점과 기동시 예상되는 진동값을 사전에 알려줄 수 있는 진단시스템 적용 연구도 추가적으로 이루어져야 한다.

5. References

- [1] M. J. Kim, S. H. Myung, S. H. Kim(2019), "Analysis of flexible resource requirements to increase renewable energy acceptance in power system." Journal of KIIEE, 33(11):63-70.

- [2] H. R. Jeon, D. H. Choi, S. M. Beak, S. H. Lee, H. J. Lee(2023), "An analysis and overseas case studies on installation of synchronous condenser in a power system for improving inertia." Journal of KIIT, 21(1):49-59.
- [3] IEA(2022), World energy outlook 2022. IEA Report.
- [4] E. Poursaeidi, A. R. Razavi(2008), "An investigation on the cause of a rotor bending and its thermal straightening." IJE Transactiona B: Applications, 21(2):281-287.
- [5] W. K. Cho(2018), Multi-physics simulating process for bent turbine rotors. Korea Marine and Ocean University
- [6] I. C. Bang, J. T. Chung(2001), "Dynamic analysis of an automatic dynamic balancer in a rotor with the bending flexibility." Transactions of the KSME A, 25(7):1125-1130.
- [7] T. S. Kim(2010), Vibration reduction for gas turbine engine by vibration spectral analysis method. Korea Aerospace University.
- [8] SIEMENS(2008), Advaced SGT6-5000F Development. SIEMENS Energy, Power-Gen International 2008.
- [9] WH Electric(1997), W501F gas turbine operation manual. Westinghouse Electric.
- [10] MHI(2013), M501J gas turbine operation and maintenance manual. Misubishi Heavy Industry LTD.

저자 소개



유 원 주

울산대학교 산업경영공학과 석사, 호서대학교 에너지기후융합기술학과 박사 취득.
현재 한국동서발전(주) 기술전문연구센터 책임전문원 재직 중.
관심분야: 가스터빈 고온부품, 수소/암모니아 연소기 개발 등



이 창 열

헬싱키대학원 경영학과 석사, 호서대학교 에너지기후융합기술학과 박사 취득.
현재 한국동서발전(주) 안전기술부사장 재직 중.
관심분야: 친환경 발전설비 운영, 에너지 기술, 에너지기후융합 기술개발 등