

전압이 서서히 낮아지는 특성을 보이고 있어 슬롯방전에 의한 절연물의 열화가 지속적으로 진행되고 있는 것으로 평가하였다. 따라서 절연물의 특성상 열화가 상당히 진전된 경우에는 갑작스럽게 절연파괴 사고로 진행될 수 있기 때문에 약간의 변화라도 감지되는 시점에서는 권선교체 등 정비대책을 강구해야 한다. 그래서 장기적인 운전과 안정적인 전력공급을 위해서는 권선교체 계획을 수립하여 차기에 권선교체를 시행할 것을 권고하였다. 1년후 수명연장을 위한 발전기 고정자권선에 대한 전체 권선교체를 시행하였다. 수명연장을 위한 권선교체 후 절연특성값도 양호하게 나타났으며, 장기운전을 위한 품질을 확보하게 되었다. 또한 절연물의 열화상태를 관리하기 위해서는 주기적인 절연진단으로 절연열화 특성치의 변화추이를 지속적으로 관리할 것을 권고하였다.

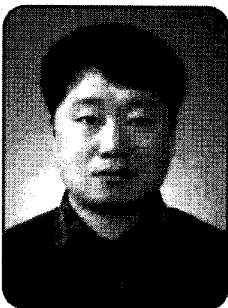
(참고문헌)

[1] 김희동, 양규현, 주영호 “가스터빈 발전기 고정자 권선의 절연상태 평가”, 전기학회논문지, 2010.
 [2] Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian

Culbert, Hussein Dhirani, “Electrical Insulation for Rotating Machines_ Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair”, IEEE Press Series on Power Engineering, 2004.

[3] IEEE Std 1434-2000, IEEE Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery
 [4] IEEE Std 62.2-2004, IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus-Electrical Machinery
 [5] 발전기 권선열화 평가기준 위원회 “발전기권선 절연열화판정기준”, 전력중앙연구소 기술연구소보고 No.67001, 1967. 4
 [6] Y. Ikeda, H. Fukagawa, “합성레진 절연발전기 권선의 절연열화 판정법”, 전력중앙연구소보고 .W88046, 1988. 6
 [7] 한국전기연구원, 한전KPS, “발전기 절연수명 진단 시험기술 연구”, 1993. 8

드럼 보일러의 변압운전



한전전력연구원
 엔지니어링센터
 기계설비진단팀
 선임연구원 백세현
 Tel : (042)865-7522

1. 개요

변압운전이란 부하에 따라 주증기 압력을 변동시켜 운전하는 방법으로서, 주증기 제어변 개도를 크게 하여

교축손실을 감소시킬 뿐만 아니라, 터빈의 열응력 및 보조기기의 동력절감을 가져와 부분부하에서 열효율을 증가시키기 위한 목적이 있으며 관류형 보일러에서는 일반화된 운전방법이다.

그러나 변압운전은 기저부하 정압운전을 주로 담당하는 드럼형 보일러에서는 적용사례가 극히 드물고 변압운전을 위한 고려사항에 대한 문헌도 찾아보기 어려운 실정이다.

따라서 본 보고서에서는 장시간 저부하 운전을 하는 드럼 보일러에서 변압 운전을 시행할 경우 예상되는 효과 및 고려해야 할 사항에 대하여 시험적용 사례를 기초로 분석하였다.

II. 검토내용

1. 보일러 압력제어방식 개요

가. 정압운전

보일러에서는 주증기 압력을 일정하게 유지하고 부하에 따라 터빈에 요구되는 증기량을 터빈 제어밸브로 조절하는 방식으로서 터빈제어밸브에서 열손실이 크기 때문에 상대적으로 저부하 운전시간이 많은 발전소 운전방식으로는 부적절하므로 기저부하용 발전소에 유리하다.

나. 변압운전

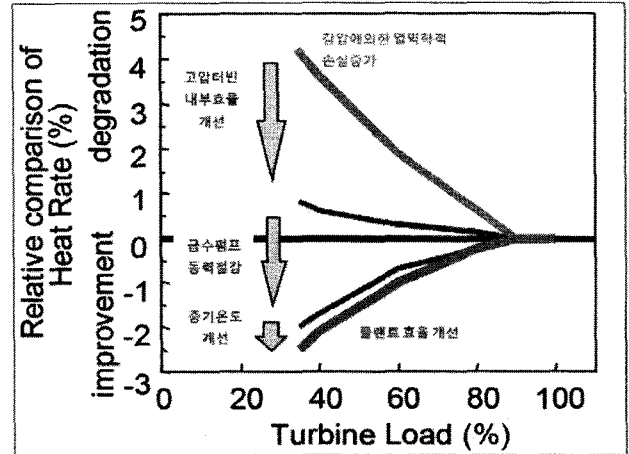
정압운전이 일정한 증기 압력하에서 출력변화에 따라 터빈 제어밸브를 제어하는 반면, 변압운전은 터빈제어밸브를 개방시킨 상태에서 부하별로 증기압력을 변화시켜 출력을 조절하는 운전방식으로서, 효율향상 및 열응력 저감에 유리하다.

다. 정압운전 보일러를 변압운전으로 변경하는 방안 비교(하단 표 참조)

2. 변압운전 시행시 예상되는 효과

가. 발전소 열소비율 개선

○ 변압운전을 채택하면 주증기 압력저하에 따른 열역학적 손실에도 불구하고, 정압 운전에 비하여 터빈 내부효율 향상, 보일러 급수펌프 소비동력 감소 및 증기온도 유지 효과에 의하여 전체 발전소 열소비율은 개선된다.



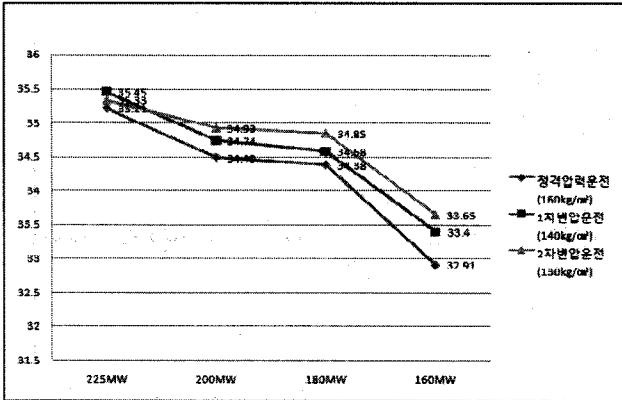
[그림1] 변압운전에 따른 Heat Rate 변화 개념

항 목	보일러 전체를 변압운전	보일러 드럼출구에제어밸브설치
방 법	○ 보일러 급수펌프(BFP) 로부터 터빈전단까지 전체를 변압운전	○ 드럼 출구에 제어밸브(boiler throttle valve)를 설치 - 보일러 급수펌프에서 드럼출구 제어 밸브까지는 정압운전 - 제어밸브에서 터빈까지는 변압운전
장 점	○ 보일러 급수펌프 동력감소 ○ 터빈 열응력 감소 ○ 열소비율 개선	○ 터빈열응력 감소
단 점 및 문제점	○ 질탄기 및 공기에열기 성능변화 및 보일러 효율변화 가능성 있음 ○ 보일러 급수펌프 특성 검토필요 ○ 드럼 출구측 water 유입 (carry over) 가능성 있음 ○ 보일러 전체 열적특성 재검토필요	○ 열소비율 개선 효과는 없음 ○ 보일러 전체 열적특성 재검토 필요 ○ 적용여건 불리

○ [그림 2]은 MGR 300MW 인 Y화력의 감압운전 시험 결과이다.

감압 운전의 효과는 75% 부하(200MW)에서는 크지 않으나 54% 부하(160MW)인 저부하 조건에서 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

또한 정격압력 160kg/cm² 대비 87.5% (140kg/cm²) 및 81.3%(130kg/cm²) 수준으로 감압량이 클수록 효과가 큰 것으로 나타났다.



[그림 2] 참고자료 (Y 화력 감압운전 시험시 효율변화)

나. 보일러측 열응력 감소

○ 변압운전을 하게 되면 보일러 튜브내 압력이 낮아져 열응력이 경감되는등 튜브 사용 조건을 완화시켜 수명연장은 물론 파열 사고도 줄일 수 있다.

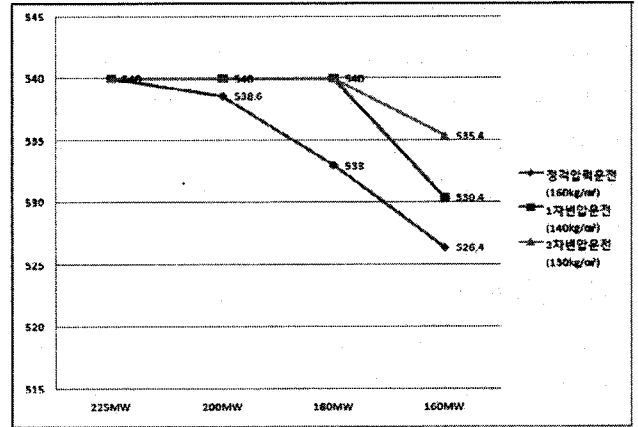
○ 보일러 기동/정지시에는 응력에 의한 피로 수명소비가 발생되는데, 운전압력을 낮추게되면 최대 응력 수준도 낮아지게 되므로 기기의 피로수명을 향상된다.

○ 또한 보일러 튜브내 증기의 비체적이 커져 체적유량이 증가하므로 저부하시 튜브내 유량분배가 안정되어 편류에 의한 튜브 국부 과열을 줄여준다. 이를 정량적인 금액으로 환산하기는 어려우나 고장방지방지, 수명연장을 고려하면 그 효과가 지대한 것으로 판단된다

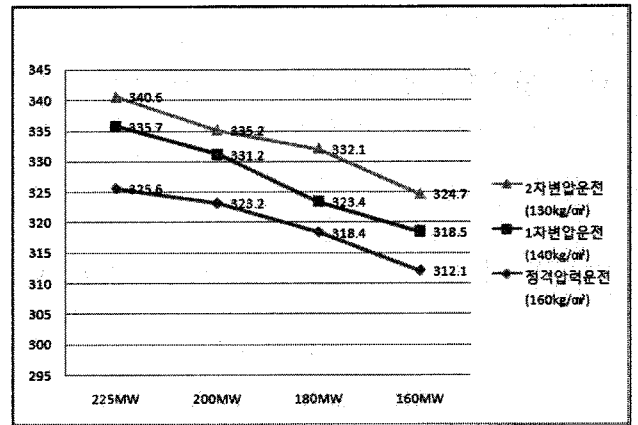
다. 저부하시 보일러 출구측 증기온도 확보

○ 보일러 과열기 및 재열기 출구측 증기온도는 보일러 열전달 특성상 부하가 낮아짐에 따라 정격치보다 저하한다. 하지만 감압 운전시 과열기 출구측 증기는 비열(kcal/kg · °C)이 낮아져 같은 열입력에 대하여 흡수가 양호하게 되어 증기 온도는 증가한다. 또한 재열증기 온도도 변압운전에 따라 자연스럽게 높아지게 된다.

○ [그림 3]과 같이 Y화력의 감압운전 시험운전 결과 저부하에서도 정격부하 대비 재열증기온도 확보가 가능하였으며, 감압량이 클 경우 더욱 양호한 결과를 얻는 것으로 나타났다.



[그림 3] 참고자료 (Y화력 재열증기온도시험실적)



[그림 4] 참고자료 (Y화력 고압터빈출구온도시험실적)

3. 변압운전으로 변경시 예상 문제점

일반적으로는 아임계압 보일러는 정압운전방식을 채택하고 있으며 일부 국외의 드럼형 보일러는 변압운전방식을 채택하기도 한다.(초기 설계시부터 변압운전으로 설계) 해외에서는 Fost wheeler의 경우 기존 정압보일러에 HP-Bypass 신설 및 과열저감기 추가등 개조작업을 통하여 기동시간 단축 및 변압운전을 시행한 사례가 있다. 내에서도 과거 YS화력에서 변압운전에 대한 시험을 시행한 기록이 있으며, YD 화력도 저부하시 제한된 범위에서 감압 운전을 시행한 사례가 있다.

기존 정압운전 보일러를 변압운전방식으로 변경하기 위해서는 아래와 같은 사항에 대한 검토를 위하여 충분한 실증 시험 운전을 사전에 충분히 시행하여야 될것이다.

가. 기동 및 저부하운전시 절탄기 운전특성 변화

○ 변압운전을 하기 위해서는 기동 및 저부하 운전시 보일러 급수펌프의 압력을 낮추게 되는데, 운전압력 저하에 따라 절탄기내 포화압력(saturated pressure) 낮아져 비등현상이 발생할 가능성이 있다.

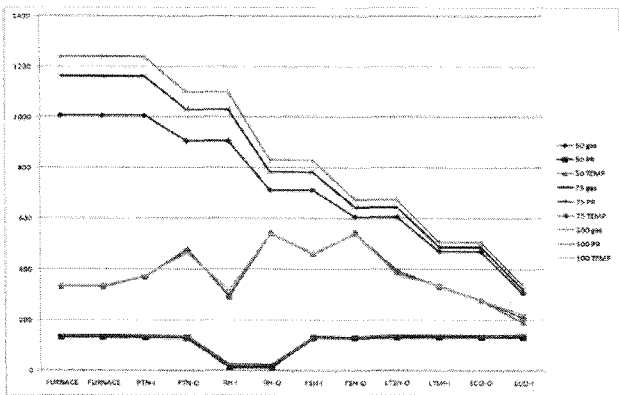
이를 방지하기 위해서는 저부하운전시 보일러 급수펌프를 일정압력 이상으로 유지하거나, 절탄기 출구온도를 낮추기 위해 절탄기 전열면적을 축소시켜야 한다.

그러나 절탄기 전열면 축소 방안은 배기가스 온도 증가, 공기예열기 효율감소에 의한 보일러 효율감소가 수반되므로 검토에서 제외한다.

○ 변압운전 압력범위의 최고압력은 최고부하 주증기 압력조건 (고압터빈 입구기준)이고, 최저압력은 최저부하시 절탄기 출구에서 증기발생을 방지하기 위한 최소 압력(급수온도에 해당되는 포화압력) 이상의 조건과 기동시 고압터빈 롤링 조건에 해당되는 보일러 압력 이상의 범위에서 충분한 여유를 두고 결정한다.

[표 1] OO화력 economizer outlet 설계온도 및 해당 포화압력

구분	NR	75% NR	50 NR	25%NR	비고
유체온도(℃)	277	278	279	244	
포화압력 (kg/cm ²)	62.6	63.5	64.5	36.7	eco outlet 기준
고압터빈 롤링조건	40kg/cm ² 에서 과열도 56도 이상				



[그림 5] OO화력 Temp 선도 (Gas 측 및 유체측)

나. 증기온도 및 spray water control valve 개도

○ 압력 저하에 의한 증발 잠열 증가로 인하여 furnace 측 열흡수 패턴이 변경됨에 따라 동일

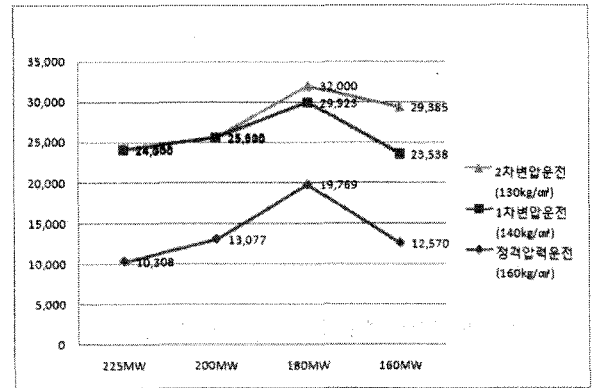
부하시 연료 공급율이 변경되게 되고 과/재열기측의 열흡수 분배도 변화가 발생된다.

○ 또한 증기온도는 일반적으로 저부하시 정격온도보다 낮아지지만 감압을 하면 압력 저하에 따른 비열감소로 증기온도가 상승되므로 정격온도 유지를 위한 spray water flow가 증가되어야 한다. 또한 TBN gov valve의 교축에 의한 증기온도 강하가 적어 고압 터빈 출구온도가 상승된다

○ 따라서 감압을 하면 주증기 온도가 상승하여 spray water flow가 증가하므로 설계 유량범위 초과 및 응동성 문제점 발생 가능성이 있다

○ [그림 6]은 Y화력의 감압운전 시험시의 spray water flow 측정 결과이다

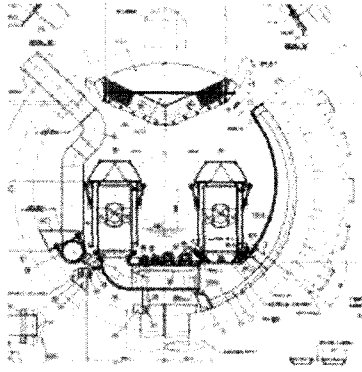
normal 조건에서 최대값을 나타내는 60% 부하(180MW)를 기준으로 검토결과, 정격압력 운전시 spray water flow는 19,769 kg/h였고 압력비율 81.3% (130kg/cm²)에서는 spray water flow가 약 32,000kg/h (정격치의 162%)로 증가되었다.



[그림 6] 참고자료(Y 화력 Spray water flow 실적)

다. 변압운전에 의한 과열기측 water 유입 가능성

○ 드럼형식의 보일러 운전시 드럼내부의 수위는 항상 일정하게 유지되어야 하나, 압력의 순간적인 변화 및 변압운전에 의하여 drum 압력이 심하게 낮아질 경우에는 steam의 체적이 커지게 되어, drum separator의 capacity가 줄어들게 되므로 과열기로 습분이 유입될 가능성이 있다. 그러나 부하감소와 더불어 유량도 동시에 감소하므로 일반적인 경우 저부하 영역에서는 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

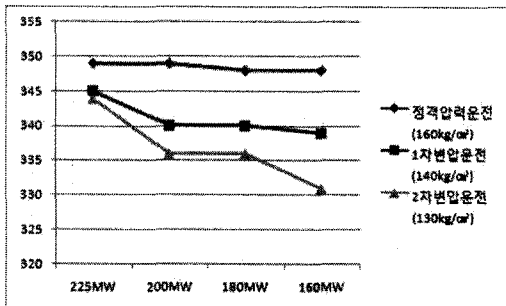


[그림 7] Drum Separator

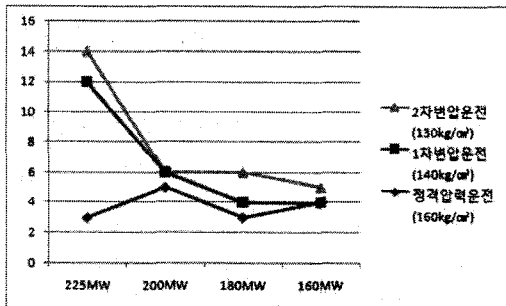
라. 드럼 metal 온도 변화

문헌에 따르면 포화증기의 온도변화는 저압이 될 수록 크므로 드럼의 Metal 온도 변화량이 커지게 되어 드럼의 온도편차가 크게 발생되는 것으로 알려져 있다.

Y 화력의 시험결과를 검토하면 [그림 8, 9]와 같이 최대금속온도 및 상하부 온도차는 변화폭이 작아 운전에는 큰 문제점이 없는 것으로 판단된다. 그러나 향후 변압운전 시험을 시행하는 경우에는 드럼 metal 온도 편차에 대하여 정확한 측정이 필요하다.



[그림 8] 참고자료(변압운전시 드럼의 최대금속온도)



[그림 9] 참고자료(변압운전시 드럼의 Metal 온도 변화)

마. 보일러 전체 열적 특성 재검토

○ 일반적으로 드럼보일러의 전열면 (eco, water wall, SH, RH등)은 정압 운전 특성을 기준으로 설계되어 있으며, 보일러 운전방식을 변경할 경우

보일러전체 전열면에 대한 운전조건 및 열적 특성이 변할 가능성이 있으므로 보일러 공급사로부터 상기사항에 대한 확인이 필요하다.

예를들면 감압운전 상태에서는 정해진 과열증기 온도를 얻기 위해 요구되는 열량이 상대적으로 적다. 그러나 증발기에서는 증발잠열의 증가 때문에 필요한 증발량을 얻기 위해 투입되어야 하는 열량이 정압 운전시 대비 증가되어야 한다. 이런 증발잠열을 보상을 위한 furnace 에서의 firing rate 증가는 대류 전열면에서는 과도한 열흡수를 초래하게 될 것이다.

바. 보일러 급수펌프(boiler feed pump) 특성검토

○ 기존보일러의 급수펌프는 정압운전 특성에 맞추어 설계되었으므로 변압운전 가능 범위 및 제어 logic 확인이 필요하다

사. 드럼보일러를 변압 운전시 속응성

○ 관류 보일러에서는 급수와 화염강도의 2가지 병렬 공정이 증기발생을 결정하는반면, 드럼 보일러에서 증기발생은 오직 화염강도 변화에 의존한다. 따라서 증기의 저장능력과 근본적인 증기 발생의 지연 특성은 드럼보일러가 관류 보일러보다 크다. 터빈 밸브가 고정된 상태에서 부하변동이 발생되면, 동시에 증기 압력의 변화가 수반되는데 이러한 압력의 변화량은 정압 운전시보다 변압운전의 경우가 상대적으로 크게 된다. 또한 관류 보일러에 비하여 드럼 보일러의 실제 증기 발생 특성은 속응성이 떨어지는데, 이러한 특성은 변압 운전을 시행하는 경우에는 더 큰 영향을 받는다. 또한 상대적으로 큰 저장용량을 가진 드럼 보일러 일수록 더욱 속응성은 둔하게 된다.

○ 저장된 증기량이 많을수록 실제 증기 유량의 관성은 더 증가 하며, 온도편차 역시 더 커진다. 변압 운전에서의 온도 편차는 정압 운전시보다 더 크며, 드럼 보일러의 변압운전시에는 더욱 심한 경향이 있다

○ 위와같이 변압 운전시의 증기저장 특성 및 증기온도에 의한 증기저장을 고려하면 드럼보일러를 변압 운전하는 경우에는 정압운전시보다 속응성 측면에서는 불리한 영향이 미칠것으로 판단된다.

III. 결론

- 초기 보일러 설계시 아임계압 드럼형 보일러를 변압운전으로 구성한 사례가 국외에는 있으나 일반화된 설계는 아니다.
- 정압운전 보일러를 변압 운전으로 변경하였을 경우 보일러 급수펌프 동력감소, 보일러 열용량 감소, 플랜트 열소비를 개선등과 같은 장점이 있으나, 저부하 운전의 비중이 클 경우에만 기대 효과가 클 것이다.
- 변압운전 시행시에는 아래와 같은 문제점이 발생할 가능성이 있으므로 시험운전 시행 계획시 대책 반영이 필요하다.
 - 최대 감압 범위는 기동시 고압터빈 롤링 및 저부하 운전시 절탄기내 포화온도 조건 대비 충분한 마진을 두고 시행.
 - 압력 저하에 의한 증발 잠열 증가로 인하여 furnace 측 열흡수 패턴이 변경됨에 따라 과/재열기측 온도유지를 위한 spray water control valve 개도증가 및 GR fan 재순환을 감소 필요.
 - 과도한 감압시 drum에서 seperator 용량 부

족으로 과열기측에 water유입가능성이 있으므로 시험 압력은 단계별로 감압하여 시행하고 배관측 온도감시를 병행.

- Drum 상하부 metal 온도차 감시.
- 보일러 전체 열적 특성 변동에 대한 대비.
- 보일러 급수펌프(boiler feed pump) 변압 가능범위 및 제어 logic 확인.

○ 실제 변압운전을 시행하기 전에 부하 및 압력범위별로 단계적으로 충분한 시험운전 시행이 필요하다.

○ 변압운전을 시행하게 되면 속응성측면에서는 정압 운전시보다 저하될것으로 판단 되는바, 드럼형 보일러의 변압운전 개념은 저부하시 제한적인 범위 내에서 감압 운전을 통한 플랜트 효율 향상의 목적에 국한하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

<Reference>

1. 발전설비기술지원 길라잡이 시스템 : 한전전력연구원
2. 발전소년보 및 보수 사례집 : Y화력발전소
3. Constant & Sliding-Pressure Options for New Supercritical Plants : Riley Power Inc

[표 2] 부하 및 압력 범위별 시험계획 예

부하	압력					보일러측 주요측정 및 감시대상
	100%	90%	80%	70%	xx%	
100%						○ 증기온도(S/H, Hot R/H, Cold R/H) ○ Spray Water Valve 개도 ○ GR Fan 부하 ○ 과열기 Water유입여부(배관측 온도측정) ○ Drum 포화온도, Metal 온도 및 상하부편차 ○ 수냉벽 위치별 온도 ○ 과/재열기 각 Bundle 입출구 온도
90%						
80%						
70%						
xx%						
xx%						
- 자동운전 상태에서 Load Master Controller를 수동으로 변경하고 연료 공급량을 수동으로 일정하게 하여 Load Limit 로 Gov Valve 개도를 서서히 증가시켜 시험압력으로 조정후 안정된 운전상태에서 각 기기의 운전상태를 기록						