

2013년 2월
석사학위논문

열성능 진단시험을 통한
영광1,2호기 발전소 2차 계통
효율 증대 방안 분석 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 천 호

열성능 진단시험을 통한
영광1,2호기 발전소 2차 계통
효율 증대 방안 분석 연구

A study on the efficiency improvement of the plant secondary
System in NPP #1,2 by thermal performance
diagnostics test

2013년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 천 호

열성능 진단시험을 통한
영광1,2호기 발전소 2차 계통
효율 증대 방안 분석 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 천 호

김천호의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 부교수 김진원 (인)

위 원 조선대학교 교수 김승평 (인)

위 원 조선대학교 교수 송종순 (인)

2012년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 발전소 설비현황	2
1. 증기 발생기	2
2. 터빈	3
3. 발전기	3
4. 습분 분리 재열기	3
5. 복수기	3
6. 급수펌프	4
7. 급수 가열기	4
제 3 장 영광 1호기 정밀 열성능 진단	5
제 1 절 정밀 열성능 진단 개요	5
1. 개요	5
2. 열성능 진단 목적	5
제 2 절 정밀 열성능 시험 수행	6
1. 열성능 진단 항목	6
2. 시험 방법	6
3. 특설 계측기 설치	7
4. 데이터 취득	9
5. 계통격리	10
6. 성능시험 조건	10
제 4 장 성능진단 결과 분석	11
제 1 절 서론	11
제 2 절 발전단 전기출력 및 터빈사이클 열소비율	11
제 3 절 고압터빈 성능 분석	13
제 4 절 저압터빈 성능 분석	15
제 5 절 MSR 성능 분석	16

제 6 절 급수가열기 성능 분석	17
제 7 절 복수기 성능 분석	19
제 5 장 2차 계통 효율 향상 방안	21
제 1 절 발전소 효율 향상 방안 도출	21
1. 급수 가열기 연속 배기 유량 최적화	21
2. 습분분리 재열기(MSR) 잉여 증기유량 최적화	23
3. 복수기 진공도 보정 곡선 수정	24
4. 복수기 진공도 개선	25
5. 증기발생기 1 입구 주급수 온도 측정용 RTD 점검	27
6. 원자로 열출력 계산 프로그램상에서의 주급수 유량 계산 점검	28
제 2 절 발전소 효율 영향기기 운영 방법 개선	29
1. 급수가열기 연속 배기 유량 조절	29
2. 습분분리재열기(MSR) 가열증기 유량 조절	32
3. 하절기 복수기 진공도 최적 운영	34
제 6 장 결론	37
참고문헌	38

표 목 차

표 3.1	영광 1호기 2차 계통 정밀 열성능 진단 항목	6
표 3.2	영광 1호기 주급수 유량계 (Flow Nozzle) 사양	8
표 4.1	영광 1호기 정격조건 기준 2차계통 성능지표 (CV#4 교축손실 보정 전)	12
표 4.2	영광1호기 정격조건 기준 2차계통 성능지표 (CV#4 교축손실 보정 후)	13
표 4.3	영광 1호기 고압터빈 성능지표	14
표 4.4	영광 1호기 저압터빈 성능지표	15
표 4.5	영광 1호기 MSR 성능지표	16
표 4.6	영광 1호기 급수가열기 TTD	17
표 4.7	영광 1호기 급수가열기 DCA	18
표 4.8	영광 1호기 복수기 성능지표	20
표 5.1	영광 1호기 참조시험별 정격조건 발전단 전기출력 비교	21
표 5.2	영광 1호기 참조 시험 조건별 발전단 전기출력	22
표 5.3	영광 1호기 증기발생기 입구 주급수 유량 비교	28
표 5.4	MSR 2단 재열기 유량 조절 밸브 조절 현황표	32
표 5.5	복수기 전열관 세척계통 운전 개선에 따른 운전 변수 변화	36

그림 목차

그림 2.1	발전소 개략도	2
그림 5.1	GV 밸브 개도 대비 온도곡선	23
그림 5.2	영광 1호기 복수기 진공도 보정곡선 비교	24
그림 5.3	영광원자력 본부별 해수 온도 대비 복수기 진공 압력 변화 추이	25
그림 5.4	영광 1호기 복수기 진공압력 대비 발전단 전기출력	26
그림 5.5	영광 1호기 증기발생기 입구 주급수 온도 변화 추이	27
그림 5.6	복수 및 주급수 계통 개략도	29
그림 5.7	급수 가열기 연속 배기설비 개략도	30
그림 5.8	영광 1, 2호기 송전단 출력변화	30
그림 5.10	영광 1호기 증기발생기 급수온도 변화	31
그림 5.10	영광 2호기 증기발생기 급수온도 변화	31
그림 5.11	습분분리기 2단재열기 배기설비 개략도	32
그림 5.12	MSR 2단재열기 증기유량 곡선	33
그림 5.13	MSR 가열증기유량과 출력곡선	33
그림 5.14	복수기 전열관 세척계통 개략도	34
그림 5.15	복수기 전열관 세척계통 스크린 구조	35
그림 5.16	영광 1,2호기 송전단 출력 변화	35
그림 5.17	복수기 전열관 세척계통 운전 개선에 따른 복수기 진공변화	36

ABSTRACT

A study on the efficiency improvement of the plant secondary System in NPP #1,2 by thermal performance diagnostics test

Kim, Chun Ho

Adviser : Prof. Song, Jong Soon, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Nuclear energy has been evaluated to be environmentally-friendly and economical. Thus, Korea is also now operating 23 nuclear power plants and plans additional construction of 9 units up to 2022.

Since nuclear energy is an unfinished alternative with issues to be solved including a high initial investment, a high social expense for site selection, a low social acceptance and the waste problem, however, it is not easy to meet the explosively-increasing electricity demand by constructing new power plants.

Therefore, optimization though the efficiency improvement of unit devices or peripheral devices for current power plants may in part contribute to meeting the energy demand.

The ultimate objective for the Thermal Performance Test of generation facilities is to help make an economical decision on the optimization of power plant operation by understanding the degree of degradation due to operation of relevant facilities, and establishing a maintenance plan on the basis of the degradation information.

In the precision thermal-performance diagnostic test at unit 1 of Yeonggwang Nuclear Power Plant, a preliminary test was conducted to confirm if the test

conditions are satisfied, and then a total of 7 tests based on the classification of 2 real tests at 100 % load and reference tests (TR04, TR05, TR06, TR07) were followed and the thermal performance of the turbine cycle was measured.

This paper was prepared to improve the availability of nuclear power plants and secure the economics by diagnosing the degradation state of each facility due to the long-term operation for unit 1 of Yeonggwang Plant and proposing the system analysis and method for optimum operation of the facilities.

제 1 장 서 론

원자력에너지는 친환경적, 경제적인 것으로 평가받는다. 그렇기 때문에 우리나라도 현재 23기의 원자력발전소를 운전중에 있으며 앞으로 2022년까지 9기의 원자력발전소를 추가적으로 건설할 계획에 있다.

그러나 원자력에너지는 초기 투자비용이 높고, 부지선정에 사회적비용이 많이 소모되며, 사회적 수용성이 낮고 폐기물 문제가 존재하는 등 해결과제를 안고 있는 미완의 대안이기 때문에 폭발적으로 증가하는 전력수요를 새로운 발전소를 건설함으로써 충족시키는 것은 쉽지 않은 일이다.

따라서 현재 발전중인 발전소의 단위기 효율 향상이나 주변기기 효율을 높여서 최적화함으로써 에너지 수요를 충족하는데 일부 기인할 수 있을 것이다.

발전설비 열성능 시험(Thermal Performance Test)의 궁극적 목적은 해당 설비의 운전 에 따른 열화(degradation) 정도를 파악하고, 이를 토대로 유지보수 계획을 수립하여, 발전소 운영 최적화를 위한 경제적 의사결정을 하는데 도움을 주는 것이다.

영광1호기에서 수행한 정밀 열성능 진단 시험은 시험조건 만족여부 확인을 위한 예비 시험을 먼저 실시하고, 100% 부하에서 본시험 2회 및 참조시험(TR04, TR05, TR06, TR07)으로 구분하여 총 7회의 시험을 실시하고 터빈 사이클 열성능을 측정하였다.

본 논문은 영광1호기의 장기적 사용에 따른 설비별 열화 상태를 진단하고, 설비의 최적운전을 위한 계통 분석과 방법을 제시함으로써, 발전소 이용률 향상 및 경쟁력을 확보하기 위해 작성하였다.

제 2 장 발전소 설비현황

영광 1, 2호기는 가압경수로(PWR)-1,000 MW 정격 용량으로 1986년, 1987년에 상업 운전을 시작하여 현재까지 운영 중에 있으며, 다음과 같은 설비현황을 가지고 있다.

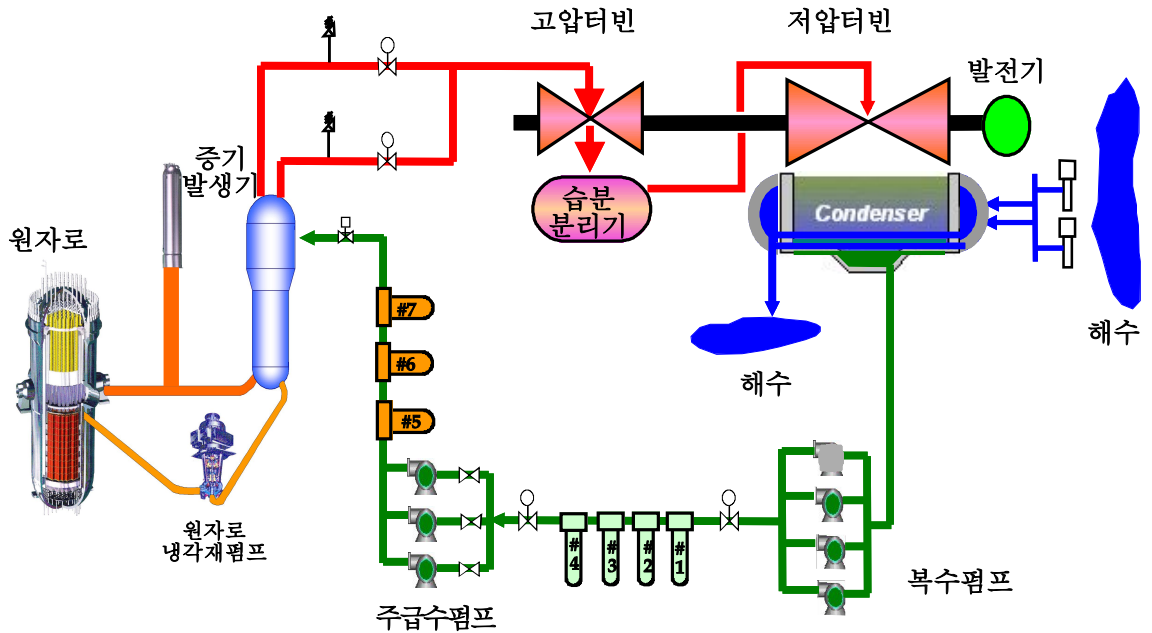


그림 2.1 발전소 개략도

1. 증기 발생기

3대의 증기발생기는 온도 279.0 °C, 압력 65.9 kg/cm²의 포화 증기를 생산하여 5,876 ton/hr의 유량으로 고압 터빈에 증기를 공급한다.

열출력 (MWt)	주증기 건도 (%)	열전달표면적 (m ²)	설계압력(kg/cm ²)		설계온도(°C)	
			1차	2차	1차	2차
2,912	99.75	5114	174.6	83.3	343	316

2. 터빈

증기발생기에서 보내 온 고온 고압의 증기를 팽창시켜 기계적 에너지로 변환시키는 것으로, 그 에너지로 발전기를 회전시켜 전력을 생산시키는 설비

형 식	정격출력	주증기 압력	열소비율	제 작 자
-Double Flow HP TBN -Double Flow LP TBN	1,043.036 MWe	64.385 kg/cm ²	2,400 kcal/kWh	고압터빈 : Alstom 저압터빈 : Westinghouse

3. 발전기

발전기에서 전력을 생산하는 최종설비로 원자력발전소 주발전기는 정상운전 중 송전망에 연결되어 전력계통과 동기를 유지한 상태에서 운전한다.

형 식	최대 용량	정격 전압	역률/주파수	제작자
4 Poles/3 Phase	1,284,000 kVA	22 KV	0.9 Lagging / 60 Hz	두산중공업(주)

4. 습분 분리 재열기

고압터빈에서 팽창된 습분을 동반한 포화증기를 습분분리기에서 습분을 제거하고, 1단 및 2단 재열기를 통해 과열 증기로 만들어 저압터빈에 공급하여 저압 터빈 날개 보호 및 열효율을 향상시킨다.

5. 복수기

증기사이클에서 열제거원으로서 저압터빈과 주급수 펌프 터빈 배기를 응축시키며, 터빈 우회 증기의 응축과 기타 급수가열기의 배수, 배기를 흡수하는 기능을 가진다.

형식	구성	Shell		Tube		열 제거 능력	운전 압력
		재질	설계압	재질	설계압		
정압, 탈기형, 표면식	3 Shells / Unit	탄소강	1.05 kg/cm ²	티타늄	3.5 kg/cm ²	24.25×10 ⁹ kcal/hr	722 mmHgVac

6. 급수펌프

수평, 단단 원심형 펌프로써 3대가 설치되어 있으며, 저압 급수 가열기에서 공급된 급수를 증기발생기 수위제어에 따라 증기 발생기에 충분한 급수를 공급한다.

정격 유량	전양정	터빈 사양	입구 유량	용량
2071.8m ³ /hr	594.4 m	657 HP, 8단 5,380 rpm,	17.7 m ³ /min	50%/대 (정상 운전 33.3%)

7. 급수가열기

가. 고압급수가열기

고압급수 가열기는 2계열로서 각 계열에는 3개의 급수가열기로 구성되어 있다.

※ No. 5, 6, 7 HP Heater, 2 Train

나. 저압급수가열기

저압 가열기는 3계열로서 각 계열에는 4개의 급수가열기로 구성되어 있다. 각 계열은 전체 복수유량의 50 %를 담당할 수 있는 용량으로 설계되어 있으며, 정상운전 중에는 정격유량의 33-1/3 %를 담당한다.

※ No. 1, 2, 3, 4 LP Heater located in each condenser neck, 3 Train

제 3 장 영광 1호기 정밀 열성능 진단

제 1 절 정밀 열성능 진단 개요

1. 개 요

본 성능진단 프로그램은 원자력 발전소 경쟁력 확보를 위한 효율적 설비 운영을 위해 영광원자력 1호기의 19차 계획 예방정비 이후 100 % 원자로 열출력에서 발전단 전기출력 및 터빈사이클 열소비율 진단을 통해 2007년 고압터빈 교체 이후 수행된 인수성능시험 대비 열 성능 변화 추이를 분석하고, 2차 계통 주요 설비별 열화 정도를 파악하고, 발전소 운영 최적화를 위한 경제적 의사결정을 하는데 있다.

2. 열성능 진단 목적

열성능 진단 목적은 100 % 원자로 열출력 및 정격 증기조건에서의 발전단 전기출력과 터빈사이클 열소비율 진단 및 발전소 열성능 모델링을 확보하고, 터빈 사이클 Heat Balance 분석을 통한 2차 계통 주요 설비별 (터빈, MSR, 급수가열기, 복수기 등) 성능 분석 및 기준 성능지표를 확보하기 위함이다. 또한 2차 계통의 밸브 누설에 의한 에너지 손실 요인을 점검하기 위해 수행하였다.

제 2 절 정밀 열성능 수행

1. 열성능 진단 항목

시험번호	진단 항목	날짜	시작	종료
진단시험 1 (TR02)	2차 계통 열 성능 및 단위 기기별 성능분석(100 % 원자로 열출력)	'10.12.28	13:00:00	15:00:00
진단시험 2 (TR03)	2차 계통 열 성능 및 단위 기기별 성능분석(100 % 원자로 열출력)	'10.12.29	11:00:00	13:00:00
참조시험 1 (TR04)	SGBD 계통이 발전단 전기출력에 미치는 영향 분석	'10.12.29	15:00:00	16:00:00
참조시험 2 (TR05)	HTR 연속배기 밸브가 발전단 전기출력에 미치는 영향성 분석	'10.12.29	17:00:00	18:00:00
참조시험 3 (TR06)	2차 계통 내 밸브 누설에 따른 발전단 전기출력 영향 분석	'10.12.29	19:00:00	20:00:00
참조시험 4 (TR07)	원자로 열출력 변화가 2차 계통 운전변수에 미치는 영향성 분석	'10.12.31	10:00:00	13:00:00

표 3.1 영광 1호기 2차 계통 정밀 열성능 진단 항목

2. 시험 방법

가. 진단시험

100% 원자로 열출력 진단시험(TR02, TR03)은 증기발생기 취출수 계통 (Blowdown System) 및 2차 계통 격리 밸브 차단상태에서 수행되었으며 이를 시험을 통해 터빈사이클 Heat Balance 계산을 이용한 단위기기별 성능 지표를 분석하고 발전소 열성능 모델링을 생성하였다.

나. 참조시험

- 1) 참조시험1(TR04) : 증기발생기 취출수 계통 정상 운전 및 2차 계통 격리밸브 차단 상태에서 증기발생기 취출수 계통 운전여부에 따른 발전단 전기출력 변화량 분석을 목적으로 수행되었다.
- 2) 참조시험2(TR05) : 고압/저압 급수가열기의 연속 배기밸브의 개폐에 따른 전기출력 변화량 분석을 위해 수행되었다.

3) 참조시험3(TR06) : 증기발생기 취출수 계통 정상 운전 및 2차 계통 격리밸브 개방 상태에서 2차 계통 내 정상운전 중 격리 밸브들의 누설에 따른 전기출력 변화량 분석을 목적으로 수행되었다.

※ 참조시험(TR04 ~ TR07)의 경우 증기발생기 취출수 유량의 측정 불확도 증가, 급수가열기 연속배기 유량 미측정 및 2차 계통 내 밸브 누설 등으로 인해 정밀한 터빈사이클 Heat Balance 분석에는 부적합하다.

따라서 이들 시험은 터빈 제작사가 제출한 성능보정 곡선을 이용해 터빈사이클 전체를 기준으로 한 발전단 전기출력 및 열소비율만을 분석하였다.

※ 참조 시험은 100 % 원자로 열출력 조건에서 수행되었다.

3. 특설 계측기 설치

가. 압력 측정 (Static Pressure)

Honeywell사의 Smart Type Pressure Transmitter가 사용되었으며, 관련 기술기준 요구 조건에 따라 Secondary Standard로부터 ± 0.1 % 이내 오차 범위에서 정밀 검교정이 수행되었다. 측정된 게이지 압력(Gauge Pressure)은 특설된 대기 압력계에서 측정된 압력을 보정하여 절대 압력(Absolute Pressure)으로 환산한 후 성능 분석에 사용되었다.

나. 온도 측정 (Temperature)

Chromel-Constant 재질의 E-Type 열전대가 사용되었으며 모든 온도 측정 포인트는 기계식 온도 보상 장치(Ice Bath Type Temperature Reference)에 의한 물리적 영점보정이 이루어졌다.

다. 유량 측정 (Flow)

주급수 유량(Primary Flow) 및 이차 유량(Secondary Flow) 계산을 위한 차압 측정에는 Honeywell사의 Smart Type Differential Pressure Transmitter가 사용되었으며, 관련 기술기준 요구 조건에 따라 Secondary Standard 로부터 ± 0.1 % 이내의 오차범위에서 정밀 검교정이 수행되었다.

1) 주급수 유량 (Primary Flow)

- 발전소 기준 유량(Primary Flow)인 주급수 유량 측정을 위해서는 증기발생기 입구에 설치된 기존 발전소 유량계(FE-476, FE-486, FE-496)를 사용하였으며 주요 사양은 아래 표 3.2와 같다.

Tag Number		FT-476A	FT-477A	FT-486A	FT-487A	FT-496A	FT-497A
Tap Set No.		1	2	1	2	1	2
Pipe Material		Carbon Steel					
Flow Element Material		Austenitic SS					
D20 : Pipe diameter	mm	393.6492		397.1036		392.2522	
d20 : Throat Dia. @20°C	mm	165.0746		165.0238		165.0238	
Cx From Calibration		0.99312	0.99578	0.99693	0.99354	0.99657	0.99206

표 3.2 영광 1호기 주급수 유량계 (Flow Nozzle) 사양

2) 이차 유량 (Secondary Flow)

터빈사이클 Heat Balance 계산 및 2차 계통 주요 설비별 성능 분석을 위해 필요로 하는 MSR 고압재열기 및 저압재열기 가열 증기 유량(Reheater Heating Steam Flow)과 배수 유량(Reheater Drain Tank Drain Flow), 급수구동용 펌프터빈 추기 증기유량(Feedwater Pump Turbine driving Steam Flow), 급수가열기 배수 펌프 출구 유량(Heater Drain Tank Drain Pump Discharge Flow) 등을 기존 발전소에 유량계를 이용하여 측정하였다. 그 외 고압터빈 Control 밸브 스템 누설 유량, 고압터빈 로터 축 밀봉 장치(Shaft Packing) 누설 유량, 저압터빈 로터 축 밀봉 장치 공급 유량 등 별도 유량계가 설치되지 않은 측정 포인트는 Martin's Fomular 및 설계 유량계수(C-Factor)를 적용하여 유량을 계산하였다.

라. 전력량 측정 (Electric Power)

ASME PTC 6.0 CODE에 따른 정확한 발전단 전기출력 측정을 위해서는 발전기 각 상(Phase)에서의 전력량 측정을 위해 검교정된 전압계(Potential Transformer) 및 적산 전력량계(Watt-hour Meter)가 임시로 설치되어야 한다. 전류 측정의 경우 운전 중인 발전소에 추가 설치가 불가능하므로 기존 발전소 전류계(Current Transformer)를 사용한다. 그리고 발전단 각 상의 전압 측정은 발전기 Terminal 혹은 발전소 운전용 전압계 Cabinet 내부 1차측 전압을 고압 케이블을 통해 특설 전압계 (Potential Transformer)로 결선하여 약 120 Volts로 감압된 2차측 전압을 측정하며, 각 상의 전류량은 전압 측정 포인트에 인접한 전류계 단자함(CT

Terminal Box)에 결선하여 측정한다. 각 부하별로 측정된 전압, 전류 및 적산 전력량을 이용하여 발전단 출력을 계산하는 과정은 아래 식과 같다

$$kW Output = \left(\frac{\#Counts}{TestTime(hrs)} \right) \times K \times WHMCF \times CTRCF \times PTRCF \times CTR \times PTR$$

Where,

K = Watt-hour meter constant

WHMCF = Watt-hour meter correction factor

CTRCF = Current transformer ratio correction factor

PTRCF = Potential transformer ratio correction factor

CTR = Current transformer ratio

PTR = Potential transformer ratio

4. 데이터 취득(Data Acquisition)

본 성능진단 프로그램을 위해 특설된 계측기를 통해 측정된 데이터는 현장에 특설된 데이터 취득 시스템(Data Acquisition System)을 이용해 10초 간격으로 PC에 전자 파일로 저장되었다. 진단시험 데이터 취득 기간 중 운전 조건의 적합성 분석을 위해 주요 운전 변수에 대해서는 시험 진행 중 PC 상에서 경향이 모니터링 되었다.

전산실 서버로 저장되는 발전소 모니터링 시스템용 데이터(PMS DATA)는 10초 간격으로 취득되었으며, 고압터빈 Control 밸브 개도는 주 제어실 운전원에 의해 수기로 기록되었다.

5. 계통격리(Cycle Isolation)

터빈 사이클 Heat Balance 상의 발전단 전기출력과 열소비율 진단, 주요 설비별 성능분석을 위해서는 진단시험을 위한 데이터 취득 기간 중 Heat Balance에 명시되어 있지 않은 모든 응축수 배수, 급수가열기 배기, 증기발생기 취출수, 복수기 충수, 보조증기 변환 장치 및 주증기를 비롯한 각종 우회(Bypass) 라인 등이 차단되어야 한다. 이는 성능진단을 위한 발전소 운전 조건을 성능 분석의 기준이 되는 설계기준 Heat Balance와 동일하게 형성하기 위함이다. 따라서 정확한 터빈 사이클 계통격리는 성능진단의 가장 기본이 되는 요건중의 하나이다.

정상운전 조건 및 성능진단 시험 기간 중 차단되는 밸브들은 발전소 정상운전 중 사전 누설 점검을 수행하였으며, 성능진단 시험을 위한 데이터 취득 기간 중에는 사전 점검 결과 정상운전 조건에서 일부 누설이 의심되는 밸브 및 정상운전 조건에서 개방되고 시험조건에서 차단되어야 할 밸브 목록을 별도로 작성하여 계통 격리를 수행하였다.

영광 1호기 2차 계통 정밀 열성능 진단을 위한 격리 밸브 목록은 『영광1발전소 운영 절차서(2차계통 정밀열성능 진단시험)』에 수록되어 있다.

6. 성능시험 조건 (Test Conditions)

원자로 감시장치(NIS) 출력 영역(PWR Range) 지시계는 진단시험 전에 교정을 완료하고, 진단시험 기간 중 원자로 출력은 100 %로 안정된 상태를 유지하도록 하였다. 증기터빈의 경우 비교 시험간에 보다 정확한 결과 비교 및 분석을 위해 진단시험은 동일한 고압터빈 Control 밸브 개도 기준으로 수행되어야 하나 원자력 발전소의 운전 특성을 고려하여 100 % 원자로 열출력 기준으로 성능진단 프로그램을 수행하되 개도 변화에 따른 교축 손실량을 분석된 성능지표에 추가로 보정하였다.

발전소 운전 상태가 진단시험 결과에 영향을 미치지 않도록 모든 발전소의 설비들이 정상상태에서 열적 평형상태가 유지되었으며 주요 성능변수는 시험결과에 대해 보정을 최소화 할 수 있도록 가능한 규정된 시험 조건에 가깝게 운전 되었다.

제 4 장 성능진단 결과분석

제 1 절 서론

원자력 발전소 2차 계통(=터빈사이클) 성능진단은 증기터빈 성능시험 기술 기준인 ASME PTC 6.0 CODE를 응용하여 수행 가능하다. ASME PTC 6.0 성능시험은 Full Scale Test와 Alternative Test로 구분된다.

본 성능진단 프로그램은 ASME PTC 6.0 Full Scale Test를 기준으로 특설 계측기를 설치하여 운전 변수를 취득하였으며, 터빈 사이클 성능 분석 과정에서는 Full Scale Test 와 Alternative Test에서 사용되는 기법을 모두 적용하였다.

2차 계통 전체를 시험 경계조건(Test Boundary)으로 하는 성능 분석(정격조건 발전단 전기출력 및 터빈 사이클 열소비율)에는 2004년 수행된 영광 1호기 인수성능시험과 동일하게 성능보정 곡선을 사용하는 Alternative Test 분석 기법을 적용하였으며, 이에 추가하여 시험조건에서의 2차 계통 단위 설비별 성능지표를 Heat Balance 분석을 통해 확보하였다.

확보된 성능지표를 이용하여 정격조건 발전단 전기출력 및 터빈 사이클 열소비율을 터빈 사이클 Heat Balance 시뮬레이션을 통해 재 계산하고 이를 Alternative Test 계산 절차에 따른 성능 분석 결과와 비교함으로써 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성을 검증하였다.

제 2 절 발전단 전기출력 및 터빈사이클 열소비율

영광 1호기 100% 원자로 열출력 성능진단(TR02, TR03)은 표 4.1과 같이 증기발생기 입구에서 측정된 주급수 유량 기준 증기발생기 열출력 평균 100.46 %(2,925.53MWt)에서 진행되었으며 시험 기간 중 측정된 발전단 전기출력은 평균 1,044,407 kW이다. 측정된 시험조건 발전단 전기출력을 100 % 증기발생기 열출력(2,912.00 MWt), 설계 기준 고압터빈 입구 주증기 압력(64.385 kg/cm²) 및 습분 함량(0.36 %), 발전기 역율(0.9) 및 저압터빈 배기압력(38.1 mmHg) 등으로 보정한 정격조건 발전단 전기출력은 1,034,754 kW로 열평형도 TS13013 기준 1,046,275 kW대비 11,521 kW 낮은 것으로 분석되었다.

정격조건 터빈사이클 열소비율은 2,420.17 kcal/kWh로 열평형도 TS13013 기준 2,393.13 kcal/kWh 대비 27.04 kcal/kWh 높은 수준이며 정격조건 터빈사이클 효율은 35.53 %로 열평형도 TS13013 기준 35.93 % 대비 0.40 % 낮은 수준이다.

표 4.1 상의 『2010년 성능진단』 결과는 고압터빈 Control 밸브(CV#4)가 부분 개방으로 인해 교축 손실이 발생하는 상태에서의 성능이 분석된 반면 『설계성능』은 Control 밸브 (CV#4)에서 교축 손실이 발생하지 않는 이상적인 조건 (Valve Best Point)에서의 성능지표이다. 따라서 인수성능 및 정밀 열성능 진단에서 분석된 성능지표를 설계 성능과 직접 비교하기 위해서는 Control 밸브(CV#4)에서 발생하는 교축 손실에 대한 추가적인 보정이 필요하며 결과는 표 4.2와 같다.

CV#4 교축 손실이 보정된 정격조건 발전단 전기출력은 열평형도 TS13013 대비 1,037,347 kW로 8,928 kW 낮은 것으로 분석되었으며, 터빈사이클 열소비율은 2,414.10 kcal/kWh로 열평형도 TS13013 대비 20.97 kcal/kWh 높으며 터빈사이클 효율은 35.62 %로 0.40 % 낮은 수준이다.

2차계통 열성능지표 (CV 4 교축손실 보정 전)	단 위	열평형도 TS30130 ㉑	2010년 성능진단			설계대비 편차 ㉒-㉑
			TR02	TR03	평균㉓	
시험조건 발전단 전기출력	kW	1,046,275	1,044,016	1,044,797	1,044,407	-1,869
시험조건 터빈사이클 열소비율	kcal/kWh	2,393.13	2,408.48	2,408.61	2,408.54	15.41
시험조건 터빈사이클 효율	%	35.93	35.70	35.70	35.70	-0.23
증기발생기 열출력	MWt	2,912.00	2,924.35	2,926.70	2,925.53	13.52
	%	100.00%	100.42%	100.50%	100.46%	0.46%
주증기 압력	kg/cm ² a	64.385	65.646	65.67	65.658	1.273
주증기 습분	%	0.36	0.13	0.13	0.13	-0.23
복수기 진공	mmHg	38.1	25.691	24.836	25.765	-12.335
발전기 역율	-	0.90	0.99	0.99	0.99	0.09
CV# 교축손실	kW	0	2,614	2,620	2,617	2,617
정격조건 발전단 전기출력	kW	1,046,275	1,034,865	1,034,644	1,034,754	-11,521
정격조건 터빈사이클 열소비율	kcal/kWh	2,393.13	2,419.95	2,420.38	2,420.17	27.04
정격조건 터빈사이클 효율	%	35.93	35.54	35.53	35.53	-0.40

표 4.1 영광 1호기 정격조건 기준 2차 계통 성능지표 (CV#4 교축손실 보정 전)

2차계통 열성능지표 (CV 4 교축손실 보정 후)	단 위	열평형도 TS30130 Ⓐ	2010년 성능진단			설계대비 편차 Ⓑ-Ⓐ
			TR02	TR03	평균Ⓑ	
정격조건 발전단 전기출력	kW	1,046,275	1,037,455	1,037,239	1,037,347	-8,928
정격조건 터빈사이클 열소비율	kcal/kWh	2,393.13	2,413.89	2,414.31	2,414.10	20.97
정격조건 터빈사이클 효율	%	35.93	35.63	35.62	35.62	-0.31

표 4.2 영광 1호기 정격조건 기준 2차 계통 성능지표 (CV#4 교축손실 보정 후)

Note : 정격조건 발전단 전기출력 1,046,275 kW는 열평형도 TS30130 상의 발전기 출력 1,043,036 kW에서 여자전력 3,239 kW (설계값)를 더한 발전단 기준 전기출력임

본 정밀 열성능 진단은 영광 1호기가 100 % 원자로 열출력(2,912 MWt)에 도달한 상태에서 최초 수행되어진 성능시험으로 고압터빈 교체 공사 계약 시 Alstom사가 제출한 열평형도 TS30130이 시험 결과에 대한 비교 기준으로 사용되었다.

열평형도 TS30130 대비 발전단 전기출력이 저하에 영향을 미치는 단위설비별 성능지표로는 고압터빈 및 저압터빈 효율, MSR 습분 분리 효율 및 TTD, 주급수 펌프 효율 및 복수기 과냉각도 등이 있으며 추가적으로 계통 증기 배관 압력 손실이 열평형도 대비 증가함에 따라 발전단 전기출력 저하의 주요 원인으로 작용하고 있다.

제 3 절 고압터빈 성능 분석

고압터빈 성능은 원자력 발전소 2차 계통 Heat Balance 분석의 기준이 되는 성능지표이다. 터빈섹션 전체가 습증기 영역에서 운전되는 원자력 발전소용 고압터빈의 효율 산정은 습분 동반을 시험을 통해 고압터빈 출구에서 급수가열기(영광 1호기의 경우 5번 급수가열기)로 추기되는 증기의 습분 함량을 측정하여 엔탈피를 계산하는 방법과 급수가열기 및 MSR Reheater Drain Tank 배수 유량 측정 결과를 이용하여 Mass Flow and Energy Balance 계산을 통해 고압터빈 출구 증기 엔탈피를 간접적으로 계산하는 방법을 통해 가능하다.

영광 1호기의 경우 급수가열기 및 MSR Reheater Drain Tank 배수 유량 측정을 위한 기준 발전소 유량계가 설치되어 있으나 이들 유량계의 과다한 측정 불확도로 인해 Mass Flow and Energy Balance 방법을 적용하기에 부적절한 것으로 분석되었다.

따라서 기술적인 대체 방안으로 고압터빈의 설계 효율 수준(Efficiency Level)에서 Control 밸브 교축 손실에 따른 터빈섹션 효율 저하분을 발전소 열성능 모델링 시뮬

레이션을 통해 보정하여 고압터빈 출구 증기 엔탈피를 산정하였다. 설계 단계에서 적용된 Mollier 선도 상의 증기팽창 선도(Expansion Line)의 기울기($\Delta h/\Delta s$)를 이용하여 증기 엔탈피를 계산하는 방법을 사용하였다.

본 성능진단 프로그램에서 분석된 영광 1호기 고압터빈의 섹션 효율은 80.13 %로 열평형도 TS30130상의 효율인 81.86 % 대비 약 1.73 % 낮게 나타났으며 열성능 모델링 시뮬레이션 결과 발전단 전기출력이 열평형도 대비 약 2,693 kW 감소되는 것으로 분석되었다.

터빈섹션 효율은 고압터빈 Control 밸브 개도 변화에 따른 교축 손실량의 변화로 인해 그 값이 항상 바뀌게 되므로 CV#4 개도 및 주증기 압력 대비 첫 단 압력비 (P_{1st}/P_{MS})가 효율 비교를 위한 기준으로 활용되어야 한다.

본 성능진단 프로그램에서 측정된 Main Stop Valve 입구에서 고압터빈 첫 단까지의 압력비는 0.7660이며 CV#4 개도는 평균 36 %를 유지하였다.

고압터빈 축 출력은 379,660 kW로 열평형도 상의 축 출력 386,154 kW 대비 약 6,494 kW 높은 수준이며, 고압터빈 출력 분담율은 35.92 %로 열평형도 상의 출력 분담율 36.32 % 대비 0.40 % 낮게 분석되었다.

100 % 원자로 열출력 성능진단(TR02, TR03)에서 분석된 고압터빈 성능지표는 표 4.3과 같다.

고압터빈 성능지표	단위	100% RTO			
		열평형도 TS30130 ①	2010년 성능진단 ②	편차 ③-①	전기출력 변화량
$\eta_{BOWL \text{ to HP ELEP}}$ (증기유로 효율)	%	83.524	82.808	0.716	-2,693 kW
$\eta_{MS \text{ to HP Exhaust}}$ (터빈섹션 효율)	%	81.864	80.126	-1.730	
HP Turbine Shaft Power	kW	386,154	379,661	-6,494	-
Pressure Ratio (P_{1st}/P_{MS})	-	n/a	0.7660	-	
Pressure Ratio ($PHPEXH/P_{1st}$)	-	n/a	0.2109	-	
% Load Distribution	%	36.32	35.92	-0.40	-

표 4.3 영광 1호기 고압터빈 성능지표

제 4 절 저압터빈 성능분석

본 성능진단 프로그램에서 분석된 영광 1호기 저압터빈 최종단 회전익 출구 엔탈피 기준 UEEP 효율은 69.04 %로 열평형도 TS30130 상의 효율인 75.03 % 대비 5.99 % 낮게 나타났으나 이는 복수기 진공도에 따라 영향을 받는 변수이므로 저압터빈 성능 지표로는 사용할 수 없다.

저압터빈 성능 수준을 반영하는 성능 지표로는 UEEP 효율이 아니라 증기유로 내부 증기 팽창의 기준점인 BASE_ELEP 효율이 사용되어야 한다.

영광 1호기 저압터빈의 BASE_ELEP 효율은 88.58 %로 저압터빈 제작사인 Westing house의 설계 효율 89.63 % 대비 1.05 % 낮게 나타났으며 열성능 모델링 시뮬레이션 결과 이로 인한 열평형도 대비 발전단 전기출력 감소량은 약 8,824 kW로 분석되었다.

저압터빈 축 출력은 677,013 kW로 열평형도 상의 축 출력 677,013 kW 대비 410 kW 낮은 것으로 분석되었으며, 출력 분담율은 64.08 %로 열평형도 상의 출력 분담율 63.68 % 대비 0.40 %의 편차를 보이고 있다. 한편 저압터빈 축 출력 및 출력 분담율은 증기발생기 열출력 및 복수기 진공도에 따라 변하는 값이므로 열평형도 대비 직접적인 수치 비교는 무의미하다.

100 % 원자로 열출력 성능진단(TR02, TR03) 에서 분석된 저압터빈 성능지표는 표 4.4와 같다.

저압터빈 성능지표	단위	100% RTO			
		열평형도 TS30130 ①	2010년 성능진단 ②	편차 ②-①	전기출력 변화량
η LP Bowl to UEEP at Test Pressure	%	75.029%	68.963%	-6.07%	
η LP Bowl to ELEP at Test Pressure	%	79.624%	77.779%	-1.85%	-
η LP Bowl to ELEP at 38.1mmHg (ELEP 효율)	%	79.624%	77.156%	-2.47%	-
η LP Bowl to BASE_ELEP	%	89.628%	88.581%	-1.05%	-8,824 kW
LP Turbine Shaft Power	kW	677,013	677,423	410	-
% Load Distribution	%	63.68%	64.08%	0.40%	-

표 4.4 영광 1호기 저압터빈 성능지표

제 5 절 MSR 성능 분석

100 % 원자로 열출력 성능진단(TR02, TR03)에서 분석된 영광 1호기 MSR(습분 분리기) A, B의 습분분리 효율은 각각 97.19 %와 97.86 %로 열평형도 TS30130 상의 효율 99.90 % 대비 2.71 % 및 2.04 % 낮은 수준이다.

저압재열기 TTD는 A, B 각각 17.81 °C 및 17.70 °C로 열평형도 상의 TTD 13.89 °C 대비 43.92 °C 및 3.81 °C 높게 분석되었으며 고압재열기 TTD는 A, B 각각 14.35 °C와 14.28 °C로 열평형도 상의 TTD 13.89 °C 대비 0.46 °C 및 0.39 °C 높은 것으로 분석되었다. 발전소 열성능 모델링을 이용한 시뮬레이션 결과 이들 성능지표의 열평형도 대비 성능 저하로 인한 발전단 전기출력 감소량은 약 1,221 kW로 분석되었다.

반면, MSR 입구에서 출구까지의 사이클 증기 압력 강하량은 A와 B 각각 4.18 %와 4.20 %로 열평형도 상의 압력 강하량 6.82 % 대비 2.65 % 및 2.62 % 낮은 것으로 확인되었으며 발전단 전기출력이 열평형도 대비 약 3,444 kW 증가하는 요인으로 작용하고 있다.

100 % 원자로 열출력 성능진단(TR02, TR03)에서 분석된 MSR의 성능지표는 표 4.5와 같다.

MSR 성능지표	단위	100% RTO			전기출력 변화량
		열평형도 TS30130 ①	2010년 성능진단 ②	편차 ③-①	
MSR A					
Moisture Separator Effectiveness	%	99.90	97.19	-2.71	-286 kW
1st Reheater TTD	°C	13.89	17.81	3.92	-352 kW
2nd Reheater TTD	°C	3.89	4.35	0.46	-14 kW
Cycle Steam Pressure Drop	%	6.82	4.18	-2.65	1,723 kW
열평형도 TS30130 대비 MSR A 성능편차에 따른 전기출력 변화량					1,071 kW
MSR B					
Moisture Separator Effectiveness	%	99.90	97.86	-2.04	-213 kW
1st Reheater TTD	°C	13.89	17.70	3.81	-344 kW
2nd Reheater TTD	°C	13.89	14.28	0.39	-12 kW
Cycle Steam Pressure Drop	%	6.82	4.20	-2.62	1,721 kW
열평형도 TS30130 대비 MSR B 성능편차에 따른 전기출력 변화량					1,152 kW

표 4.5 영광 1호기 MSR 성능지표

제 6 절 급수가열기 성능 분석

100 % 원자로 열출력 성능진단(TR02, TR03)에서 분석된 영광 1호기 급수가열기 TTD는 전반적으로 열평형도 TS30130 상의 TTD 대비 양호한 것으로 나타났다.

급수가열기 7B, 2A, 2B, 2C, 1C의 TTD가 열평형도 TS30130 상의 TTD 대비 다소 높게 분석되었으나 이는 온도 측정 불확도 이내에 존재한다. 열성능 모델링 시뮬레이션 결과 급수가열기 TTD는 발전단 전기출력이 열평형도 대비 약 815 kW 증가하는 요인으로 작용하는 것으로 분석되었다.

급수가열기 DCA의 경우 급수가열기 7A, 7B, 4A, 4B, 4C, 3A, 3B, 3C 가 열평형도 대비 높은 상태이며 이로 인한 열평형도 대비 발전단 전기출력 감소는 약 106 kW로 그 영향이 미미한 것으로 나타났다.

100 % 원자로 열출력 성능진단 (TR02, TR03) 에서 측정된 영광 1호기 급수가열기 성능지표 분석 결과는 표 4.6 ~ 표 4.7과 같다.

급수가열기 TTD	단위	100% RTO			
		열평형도 TS30130 ①	2010년 성능진단 ②	편차 ②-①	전기출력 변화량
Feedwater Heater #7 A	℃	2.161	1.851	-0.310	56 kW
Feedwater Heater #7 B	℃	2.161	2.235	0.074	-14 kW
Feedwater Heater #6 A	℃	3.528	2.356	-1.172	123 kW
Feedwater Heater #6 B	℃	3.528	2.346	-1.182	122 kW
Feedwater Heater #5 A	℃	2.950	2.344	-0.606	72 kW
Feedwater Heater #5 B	℃	2.950	2.179	-0.771	91 kW
Feedwater Heater #4 A	℃	2.961	2.127	-0.834	50 kW
Feedwater Heater #4 B	℃	2.961	1.954	-1.007	61 kW
Feedwater Heater #4 C	℃	2.961	1.859	-1.102	66 kW
Feedwater Heater #3 A	℃	2.961	1.743	-1.218	89 kW
Feedwater Heater #3 B	℃	2.961	1.535	-1.426	104 kW
Feedwater Heater #3 C	℃	2.961	2.403	-0.558	40 kW
Feedwater Heater #2 A	℃	2.961	3.189	0.228	-19 kW
Feedwater Heater #2 B	℃	2.961	3.028	0.067	-5 kW
Feedwater Heater #2 C	℃	2.961	3.359	0.397	-32 kW
Feedwater Heater #1 A	℃	3.000	2.769	-0.23	18 kW
Feedwater Heater #1 B	℃	3.000	2.693	-0.307	24 kW
Feedwater Heater #1 C	℃	3.000	3.402	0.402	-31 kW
열평형도 TS30130 대비 급수가열기 TTD 편차에 따른 전기출력 변화량					815 kW

표 4.6 영광 1호기 급수가열기 TTD

급수가열기 DCA	단위	100% RTO			
		열평형도 TS30130 ①	2010년 성능진단 ②	편차 ③-①	전기출력 변화량
Feedwater Heater #7 A	℃	3.240	7.068	3.828	-37 kW
Feedwater Heater #7 B	℃	3.240	5.793	2.553	-24 kW
Feedwater Heater #6 A	℃	7.140	7.125	-0.015	3 kW
Feedwater Heater #6 B	℃	7.140	6.023	-1.117	222 kW
Feedwater Heater #4 A	℃	5.970	7.186	1.216	-4 kW
Feedwater Heater #4 B	℃	5.970	7.362	1.392	-6 kW
Feedwater Heater #4 C	℃	5.970	7.655	1.685	-6 kW
Feedwater Heater #3 A	℃	5.970	8.234	2.264	-21 kW
Feedwater Heater #3 B	℃	5.970	8.415	2.445	-22 kW
Feedwater Heater #3 C	℃	5.970	8.553	2.583	-23 kW
Feedwater Heater #2 A	℃	5.980	5.653	-0.327	5 kW
Feedwater Heater #2 B	℃	5.980	5.311	-0.669	9 kW
Feedwater Heater #2 C	℃	5.980	5.656	-0.324	4 kW
Feedwater Heater #1 A	℃	6.120	5.759	-0.361	3 kW
Feedwater Heater #1 B	℃	6.120	5.901	-0.219	2 kW
Feedwater Heater #1 C	℃	6.120	5.985	-0.135	1 kW
열평형도 TS30130 대비 급수가열기 DCA 편차에 따른 전기출력 변화량					106 kW

표 4.7 영광 1호기 급수가열기 DCA

제 7 절 복수기 성능 분석

100 % 원자로 열출력 성능진단(TR02, TR03)에서 분석된 영광 1호기 복수기 성능지표는 표 4.8과 같다.

시험 조건에서의 TTD, 대수 평균 온도차(Logarithmic Mean Temperature Difference), 열관류율 (Heat Transfer Coefficient), 복수기 과냉각도(Subcooling) 등 모든 복수기 성능 지표가 전반적으로 설계 성능에 미달하는 것으로 분석되었다.

진단시험 기간 중 측정된 복수기 진공도를 ASME PTC 12.2 코드에 따라 설계 조건에서의 진공도로 보정 계산한 결과 또한 평균 52.40 mmHg (복수기 A: 53.00 mmHg, 복수기 B: 51.19 mmHg, 복수기 C: 53.00 mmHg)로 설계 성능 38.10 mmHg 대비 약 14.30 mmHg 낮은 수준이다.

열성능 모델링 시뮬레이션 결과 설계성능 대비 복수기 진공도 감소에 따른 발전단 전기출력 증가량은 약 9,362 kW로 분석되었다.

급수가열기 TTD	단위	100% RTO			
		열평형도 TS30130 Ⓐ	2010년 성능진단 Ⓑ	편차 Ⓑ-Ⓐ	전기출력 변화량
Condenser A					
Pressure	mmHg	38.10	25.95	-12.15	
Temperature	℃	33.16	26.47	-6.68	
Subcooling	℃	0.000	1.99	1.99	
Heat Duty	kcal/hr	5.14E+08	5.30E+08	1.66E+07	
TTD	℃	4.46	9.54	5.08	
Cooling Water Temp Rise	℃	8.22	12.10	3.88	
Condenser LMTD	℃	7.87	14.77	6.90	
Heat Transfer Coefficient	kcal/hr- m ² -℃	2,049.00	1,150.57	-898.42	
Corrected Pressure	mmHg	38.10	53.00	14.90	
Condenser B					
Pressure	mmHg	38.10	24.98	-13.12	
Temperature	℃	33.16	25.83	-7.33	
Subcooling	℃	0.000	1.73	1.73	
Heat Duty	kcal/hr	5.14E+08	5.30E+08	1.66E+07	
TTD	℃	4.46	8.93	4.47	
Cooling Water Temp Rise	℃	8.22	12.05	3.82	
Condenser LMTD	℃	7.87	14.11	6.24	
Heat Transfer Coefficient	kcal/hr- m ² -℃	2,049.00	1,205.05	-843.95	
Corrected Pressure	mmHg	38.10	51.19	13.09	
Condenser C					
Pressure mmHg		24.43	24.86	-13.24	
Temperature	℃	33.16	25.75	-7.40	
Subcooling	℃	0.000	1.83	1.83	
Heat Duty	kcal/hr	5.14E+08	5.30E+08	1.66E+07	
TTD	℃	4.46	9.57	5.12	
Cooling Water Temp Rise	℃	8.22	11.28	3.05	
Condenser LMTD	℃	7.87	14.49	6.62	
Heat Transfer Coefficient	kcal/hr- m ² -℃	2,049.00	1,171.33	-877.67	
Corrected Pressure	mmHg	38.10	53.00	14.90	
열평형도 TS30130 대비 복수기 성능 편차에 따른 전기출력 변화량					9,362 kW

표 4.8 영광 1호기 복수기 성능지표

제 5 장 2차 계통 효율 향상 방안

제 1 절 발전소 효율 향상 방안 도출

1. 급수 가열기 연속 배기 유량 최적화

본 성능진단 프로그램에서는 100 % 원자로 열출력 성능진단(TR02, TR03)에 추가하여 2차 계통 내 밸브 라인업 상태에 따른 발전단 전기출력 영향성 평가를 위해 표 5.1과 같이 참조시험(TR04, TR05, TR06)들을 수행하였다.

	정격 조건 기준 발전단 전기출력	발전단 전기출력 변화량
진단 시험(TR02, TR03) 평균	① 1,034,754 kW	①-④ = 2,995 kW
참조 시험 1 (TR04)	② 1,033,150 kW	①-② = 1,605 kW
참조 시험 2 (TR05)	③ 1,032,104 kW	②-③ = 1,046 kW
참조 시험 3 (TR06)	④ 1,031,759 kW	③-④ = 345 kW

표 5.1 영광 1호기 참조시험별 정격조건 발전단 전기출력 비교

참조시험 수행 결과 영광 1 호기의 경우 표 5.2와 같이 급수가열기 #3 ~ #7 급수가열기 연속배기에 따른 발전단 전기출력 손실량이 1,046 kW로 타 호기 대비 다소 높은 편으로 이를 최적화 작업이 필요할 것으로 보인다(급수가열기#1, #2 연속배기 차단 밸브는 진단시험 기간 중 개방됨).

발전소 열성능 모델링 시뮬레이션 결과 급수가열기 추기 유량의 0.5 %가 복수기로 연속 배기되는 것으로 가정할 경우 계통 격리 조건 대비 발전단 전기출력 감소량은 약 469 kW 로 분석되었다. 한편 설계 변경을 통해 고압급수가열기(#7, #6) 연속배기 라인을 복수기 대신 Heater Drain Tank로 연결할 경우 전기출력 증가량은 169 kW 로 경제성이 떨어지는 것으로 분석되었다.

급수가열기에 장착된 연속 배기라인의 설치 목적은 불응축 가스의 튜브 침착(Air Bounding)에 의한 열교환 성능 저하를 방지하는 것으로 이 경우 급수 가열기 출구 온도 및 배수 온도가 Hunting 하는 현상이 나타난다. 따라서, 이러한 현상이 나타나지 않는 범위 내에서 연속 배기 유량을 최소화하는 것이 가장 효과적인 최적화 방법이다.

영광 1 호기의 경우 별도의 기동용 배기(Start-up Vent) 라인이 없으므로 발전소 기동 시 연속배기 차단 밸브를 완전 개방하고 정상 운전 시 이를 다시 최적화된 개도로 Throttling 하는 방법이 적용되어야 한다.

시험종류	시험 목적	울진 3호기	영광 3호기	울진 5호기	영광 1호기
진단시험 2 ①	2차 계통 열성능 및 단위 기기별 성능 분석	①-④= 3,188 kW	①-④= 4,539 kW	①-④= 2,208 kW	①-④= 2,995 kW
참조시험 1 ②	SGBD 계통이 전기출력에 미치는 영향 분석	①-②= 1,652 kW	①-②= 1,558 kW	①-②= 1,122 kW	①-②= 1,605 kW
참조시험 2 ③	탈기기 및 HTR 연속배기 밸브가 전기출력에 미치는 영향성 분석	②-③= 456 kW	②-③= 2,562 kW	②-③= 410 kW	②-③= 1,046 kW
참조시험 3 ④	2차 계통 내 밸브누설에 따른 전기출력 영향 분석	③-④= 1,080 kW	③-④= 489 kW	③-④= 677 kW	③-④= 345 kW

표 5.2 영광 1호기 참조 시험 조건별 발전단 전기출력

2. 습분분리 재열기(MSR) 잉여 증기유량 최적화

영광 1호기 100 % 원자로 열출력 진단시험 (TR02, TR03) 결과 고압재열기로 공급되는 주증기 유량이 76.84 kg/s로 열평형도 TS30130 상의 고압재열기 가열증기 유량 70.82 kg/s 대비 약 8.5 % 높게 유지되고 있는 것으로 확인되었다.

이러한 수치는 유량측정 불확도를 고려하더라도 과도한 수준임으로 고압재열기 4th Pass 배수 라인에 설치된 조절밸브의 Throttling 을 통해 가열증기 유량을 최적화할 필요가 있는 것으로 보인다.

고압재열기 잉여 증기량을 최적화할 경우, 첫째 고압재열기로 공급되는 주증기(Main Steam)가 감소하여 터빈으로 유입됨에 따른 고압터빈 축 출력 증가, 둘째 주제어밸브(GV) 개도상승으로 인한 GV #4 교축손실 감소 등이 있으며 절차는 다음과 같다.

- ① 100 % 원자로 열출력을 일정하게 유지, 발전소 운전조건을 안정화한다.
- ② 고압재열기 가열증기 유량조절밸브는 완전 개방 상태이다.
- ③ 유량조절밸브를 서서히 잠그기 시작하면서 MSR 출구 온도를 감지하여 기록한다.
- ④ 온도변화가 압력변화에 비해 응답이 매우 늦은 특성을 고려하여 ③ 수행 시에는 미세한 밸브개도 조절 후 약 30 여분 정도 조건을 안정시킨 후 온도를 기록하고, 이를 반복하여 밸브 개도 대비 온도곡선을 그려 임계 밸브 개도점(V1)을 찾은 후 밸브 조절을 중단한다.
- ⑤ 잉여 증기량을 과도하게 감소 시킬 경우 재열기 튜브 내부 과냉각도 증가로 인해 재열기 배수온도가 Oscillation 하고 진동에 의한 튜브손상이 발생할 수 있으므로 밸브개도 조절 과정에서 이를 면밀히 관찰할 필요가 있다.

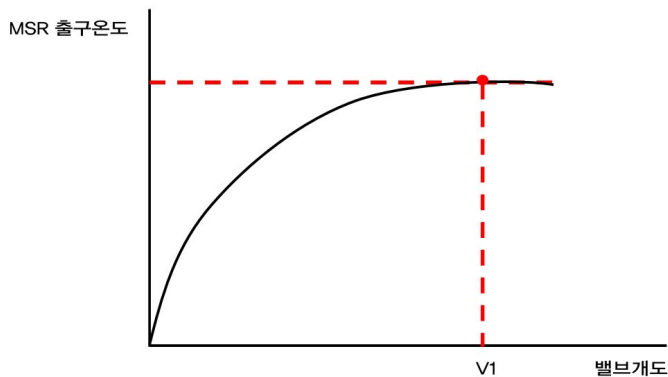


그림 5.1 GV 밸브 개도 대비 온도곡선

3. 복수기 진공도 보정 곡선 수정

PI 시스템에 저장된 발전소 운전데이터를 이용하여 특설계측기 대비 편차가 보정된 복수기 진공도 대비 발전단 전기출력 변화 추이(2311-Q2183)를 분석한 결과 발전소에서 성능관리를 위해 사용해오던 기존 복수기 진공도 보정곡선 (Westinghouse Curve 및 Alstom Curve)와 큰 편차를 보이고 있으며, 반면 본 정밀 열성능진단을 통해 확보된 발전소 열성능 모델링을 이용한 시뮬레이션 결과와 가장 근접한 추이를 보이고 있다.(그림 5.2 참조)

따라서 향후 간이성능시험 결과 분석 등 발전소 성능관리를 위한 복수기 진공도 보정곡선은 발전소 열성능 모델링을 이용하여 작성된 곡선을 이용하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 또한, 성능 분석에 사용되는 복수기 진공도는 특설 계측기 편차 (20.14 %)를 보정한 값이 사용되어야 한다.

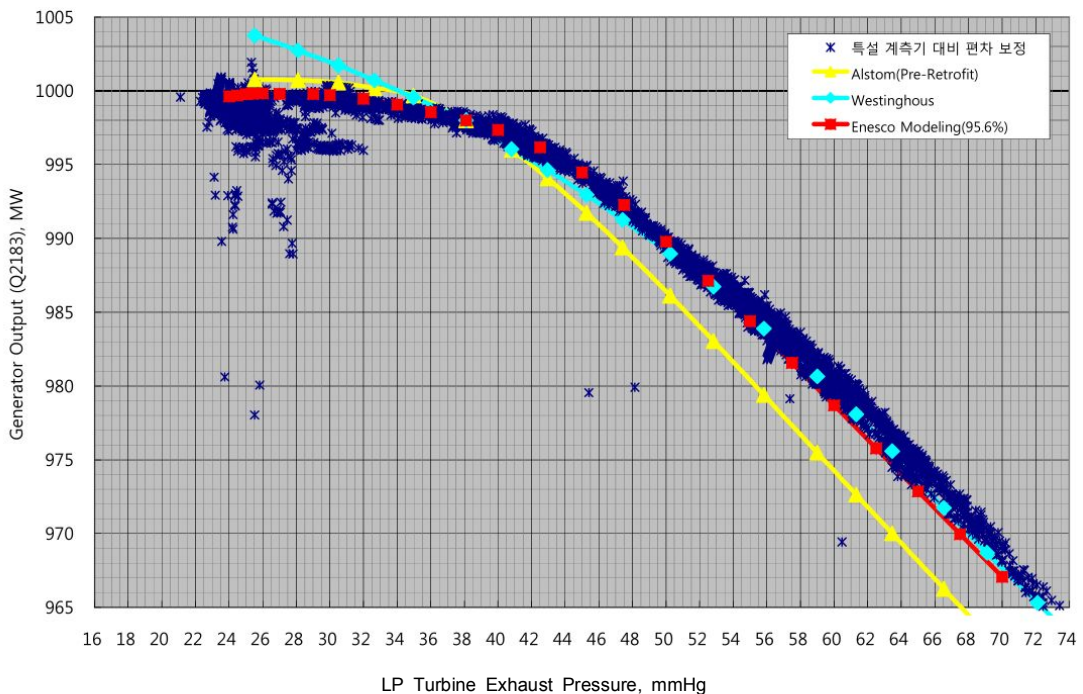


그림 5.2 영광 1호기 복수기 진공도 보정곡선 비교

4. 복수기 진공도 개선

본 보고서 제 4장 『제 7절 복수기 성능 분석』에서 언급된 바와 같이 영광 1호기의 복수기 성능은 설계 대비 상당히 낮은 수준이며, 이는 그림 5.3을 통해서도 쉽게 확인 할 수 있다.

동일한 해수 온도 조건에서 영광 1호기의 복수기 진공압력은 영광원자력 본부 내 타 호기 대비 7 ~ 10 mmHg 정도 높게 형성되고 있으며 이는 하절기 발전소 전기출력 과다 감소에 직접적인 영향을 주고 있다.

그림 5.4에서도 알 수 있듯이 복수기 진공 압력 35 mmHg (해수 온도 16 °C) 이하에서는 복수기 진공 압력이 발전단 전기출력에 미치는 영향이 적으므로 타 호기 대비 복수기 성능 저하에 발전단 전기출력 감소가 약 1 MW 이내 수준이나 복수기 진공 압력 35 mmHg(해수 온도 16 °C) 이상 영역에서는 복수기 진공 압력 증가에 따른 발전단 전기출력 감소량이 급격히 증가하여 최대 약 10 MW의 출력 감소를 초래 하게 된다.

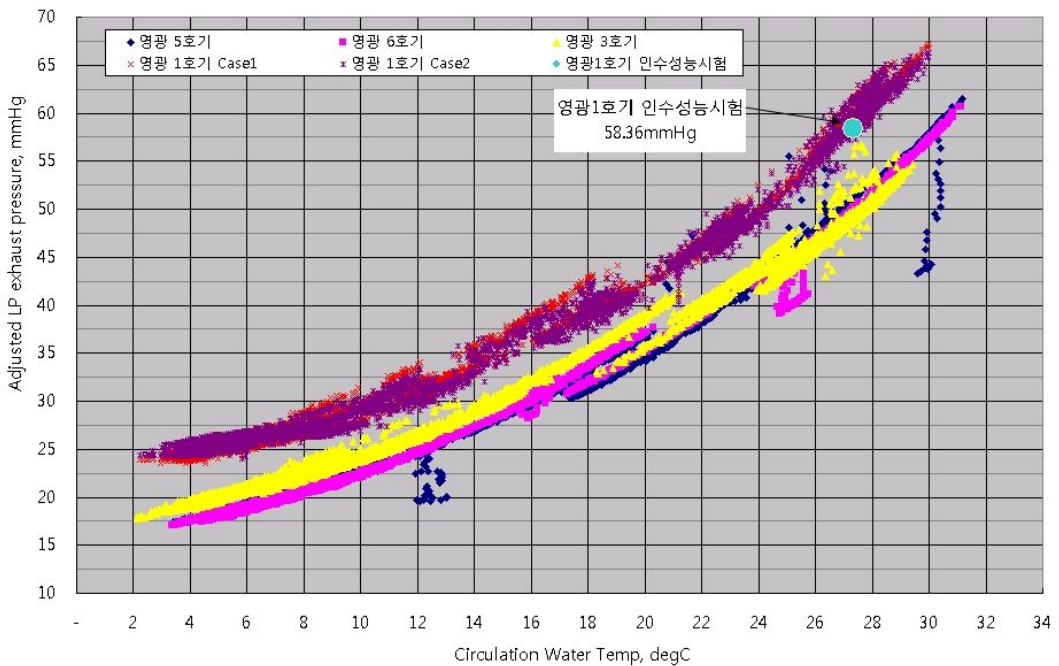


그림 5.3 영광원자력 본부별 해수 온도 대비 복수기 진공 압력 변화 추이

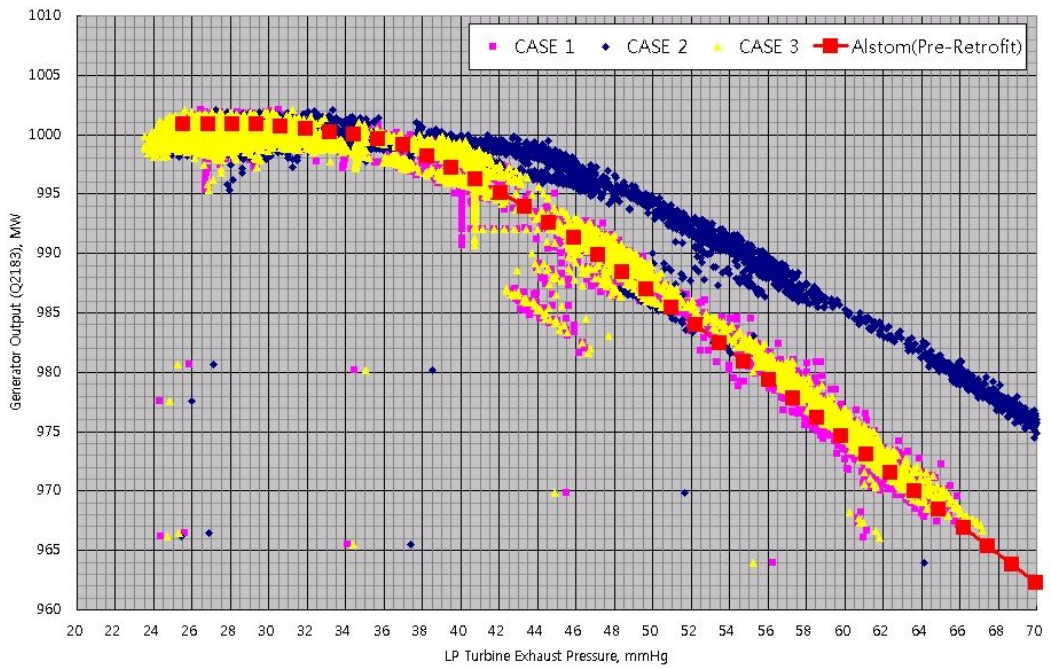


그림 5.4 영광 1호기 복수기 진공압력 대비 발전단 전기출력

5. 증기발생기 1 입구 주급수 온도 측정용 RTD(TE006) 점검

영광 1호기 18주기 운전 이후부터 현 시점까지의 증기발생기 입구 주급수 온도변화 추이 분석 결과 증기발생기 1 입구에 설치된 RTD(TE006)의 온도 측정값이 낮은 방향으로 Drift되고 있는 것을 확인되었다. 이러한 현상은 원자로 열출력을 과다 지시하여 발전단 전기출력 손실을 초래하게 되므로 해당 계측기 점검 혹은 교체가 요구된다.

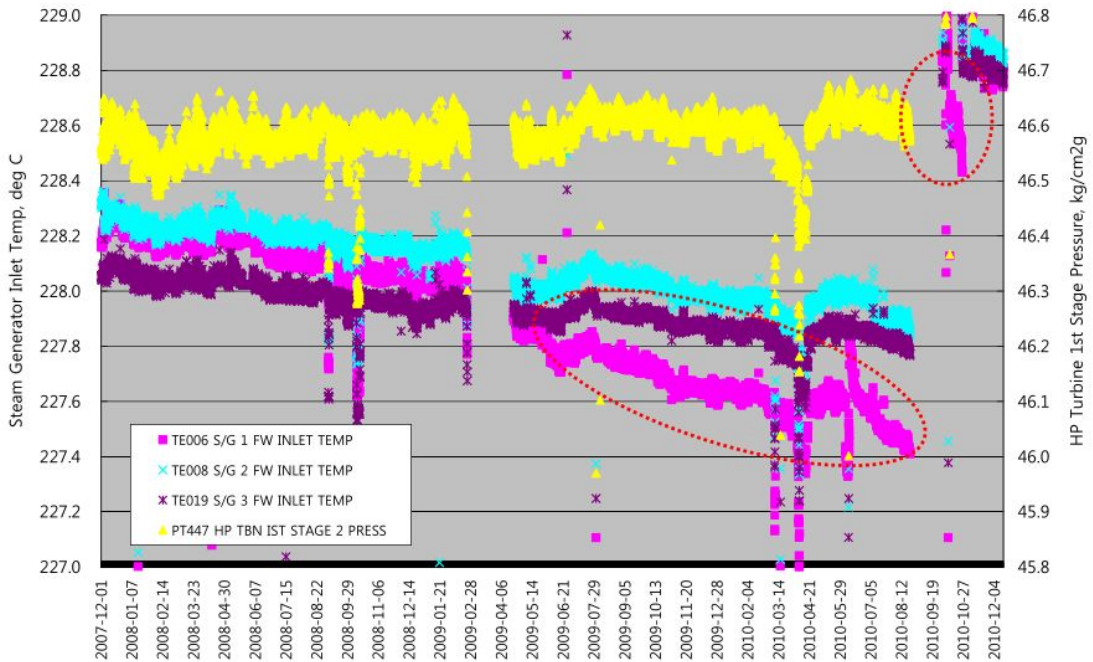


그림 5.5 영광 1호기 증기발생기 입구 주급수 온도 변화 추이

6. 원자로 열출력 계산 프로그램상에서의 주급수 유량 계산 점검

100 % 원자로 열출력 진단시험에서 특설 계측기를 이용해 측정된 증기발생기 입구 주급수 유량이 원자로 열출력 프로그램에서 계산된 유량값과 편차를 보이고 있으며 유량 편차 값을 요인별로 분석한 결과는 다음과 같다.

편차 발생 요인		LOOP1	LOOP2	LOOP3	TOTAL
벤츄리 노즐 차압	TAP1	0.272%	0.436%	0.359%	
	TAP2	0.228%	0.283%	0.257%	
	Avg.	0.250%	0.359%	0.308%	0.306%
유량계수, Cq	TAP1	0.282%	0.272%	0.286%	
	TAP2	0.288%	0.293%	0.285%	
	Avg.	0.285%	0.282%	0.286%	0.284%
주급수 압력 및 온도		0.031%	0.027%	0.018%	0.025%
열팽창계수 Fa		0.021%	0.020%	0.020%	0.020%
유량 편차 발생 요인(TOTAL)		0.587%	0.688%	0.631%	0.636%
열출력 프로그램 대비 유량편차		0.612%	0.712%	0.656%	0.660%

표 5.3 영광 1호기 증기발생기 입구 주급수 유량 비교

이러한 편차의 주요 원인은 벤츄리 노즐에서의 차압 측정값 편차 및 유량계산을 위한 유량계수(Cq) 적용 방법의 차이로 분석된다.

원자로 열출력 프로그램 상에서 유량계산에 사용된 벤츄리 노즐 차압이 특설계측기 측정값 대비 상대적으로 낮음에 따라 최종 계산되어진 유량값의 편차가 발생하였다. 이는 주급수유량계 차압 측정을 위해 설치된 성능진단용 특설계측기와 발전소 기존 계측기의 측정 불확도 차이 (특설 계측기 측정 불확도 ± 0.1 %, 발전소 기존 계측기 측정 불확도 ± 0.5 %)에 따른 것이다.

주급수 유량계산을 위한 유량계수(Cq) 적용 방법에 있어 성능진단용 유량 계산은 실제 운전 레이놀즈 수에서의 유량 계수값 반복을 통해 계산하는 반면, 발전소 제어용 유량계산은 안전성(신호값 응답성 및 계산 과정에서의 오류 가능성)을 고려하여 상수값(제작사 결정값)을 적용하게 되며 이로 인해 최종 계산되어진 유량값의 편차가 발생한다.

100 % 원자로 열출력에서 주급수 유량 편차가 원자로 열출력 계산에 미치는 영향은 0.67 %이다.

제 2 절 발전소 효율 영향기기 운영 방법 개선

영광 1호기 열성능진단 시험 결과 고압 터빈, 급수가열기 등 효율영향기기 성능이 전반적으로 양호한 것으로 나타났다. 그러나 정상운전 중 운전 방법 개선만으로도 효율향상 가능 기기가 일부 도출됨으로써, 해당 기기의 최적화를 위한 운전 조치를 수행하였다.

영광 1호기 열성능 진단 결과에 따라 영광 1,2호기 효율영향기기에 대한 최적화를 수행하였다.

1. 급수가열기 연속 배기 유량 조절

가. 개요

발전소 정상 운전 중 저압 급수가열기(#3, 4) 및 고압급수가열기(#5, 6, 7) 관외측 불응축성 가스 연속 배기 차단밸브는 완전 개방 상태를 유지하고 있어 열성능 진단 결과 설계기준(추기유량의 5 %) 대비 배기 유량이 많아 발전출력 손실량이 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

따라서 급수가열기의 열교환 성능이 저하되지 않는 범위에서 연속 배기 차단밸브를 조절하여 발전출력을 향상시키는 조치를 수행하였다.

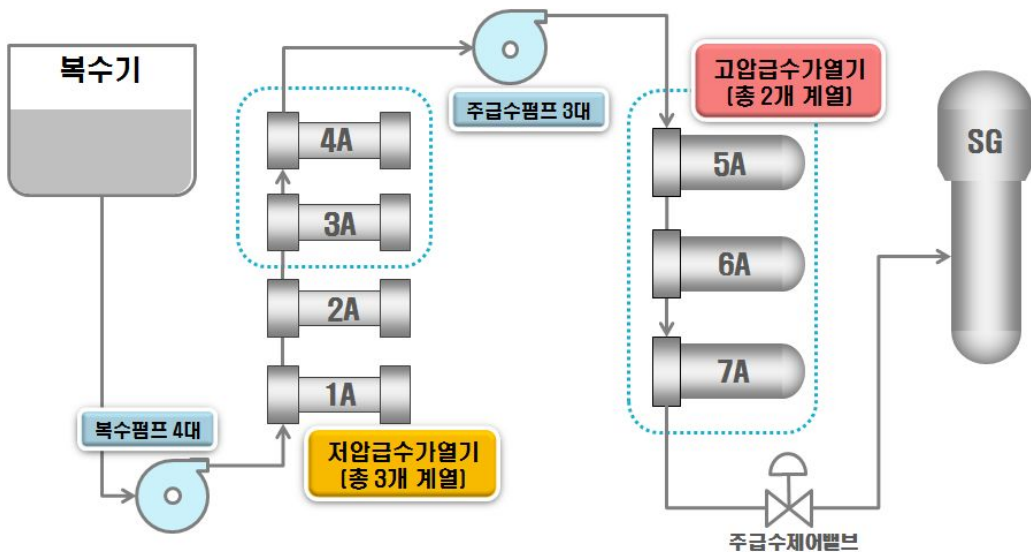


그림 5.6 복수 및 주급수 계통 개략도

나. 배기유량 조절방법

고압/ 저압 급수가열기의 열교환 성능이 저하되지 않는 범위에서 복수기 연속 배기 밸브를 조절 개방한다.

구 분	유량조절 전	유량조절 후	비 고
밸브 개도	Full Open	1/4 ~ 3 Turn Open	AF-V151 등 12개 개도조절

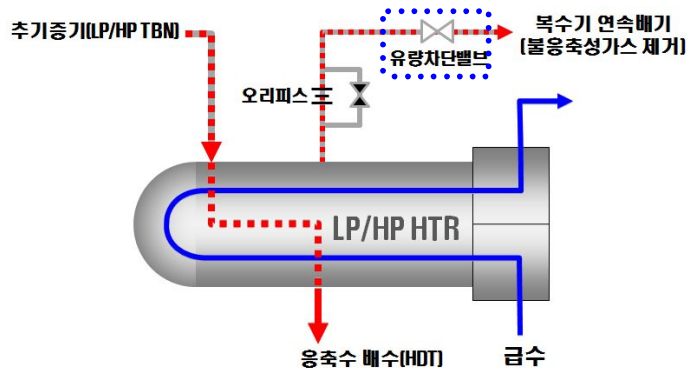


그림 5.7 급수 가열기 연속 배기설비 개략도

다. 효율향상 효과

고압/ 저압 급수가열기 연속 배기밸브 개도 조절 후 발전단 및 송전단 출력이 약 0.8 MW 증가하였다.

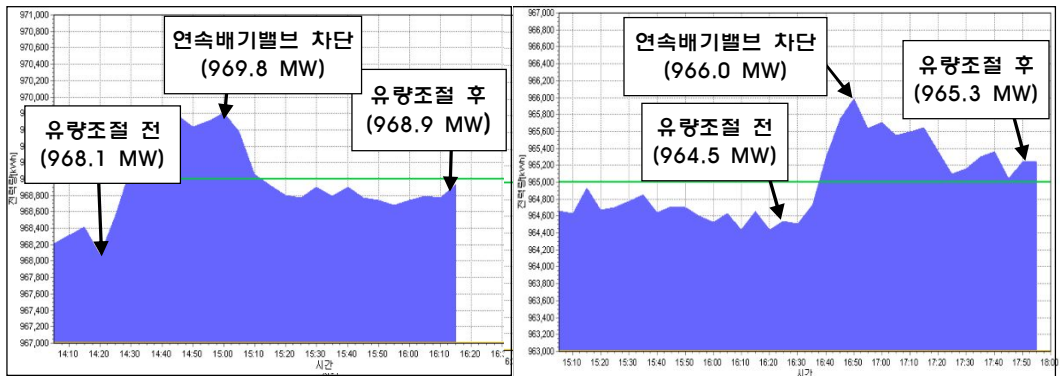


그림 5.8 영광 1, 2호기 송전단 출력변화

라. 운전영향 및 효율 효과

1) 급수가열기의 불응축 가스 축적에 의한 급수가열기 성능저하 현상은 없었다.

※ 성능저하시 증상 : 가열기 출구온도 감소 및 배수온도 증가

2) 효율영향

□ 연속배기 밸브 유량조절 후 발전소 효율이 다소 향상되었으며, 효율관련 기기의 성능변화 등 운전에 미치는 영향은 발생하지 않았다..

□ 연속배기를 통한 열손실량 감소 영향으로 증기발생기 급수온도는 약 0.1 °C 증가하는 효율 향상 효과를 가져왔다.

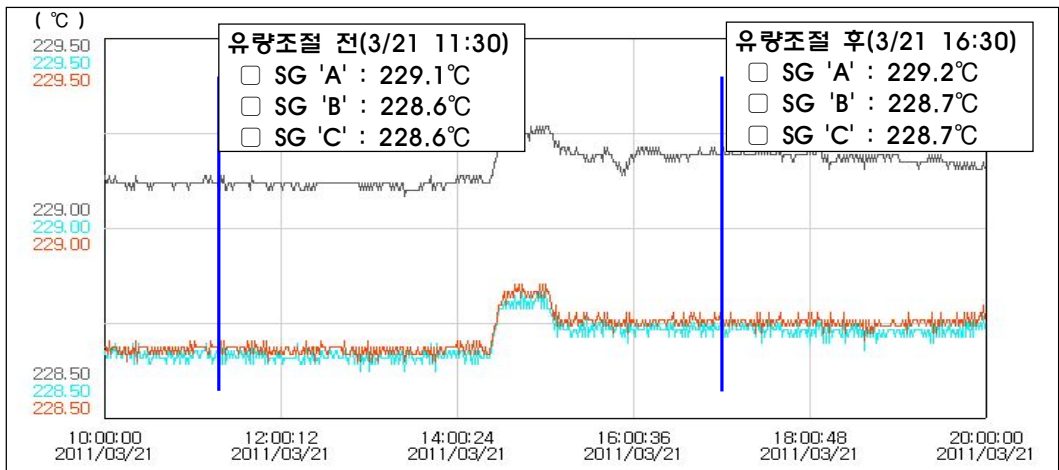


그림 5.10 영광 1호기 증기발생기 급수온도 변화

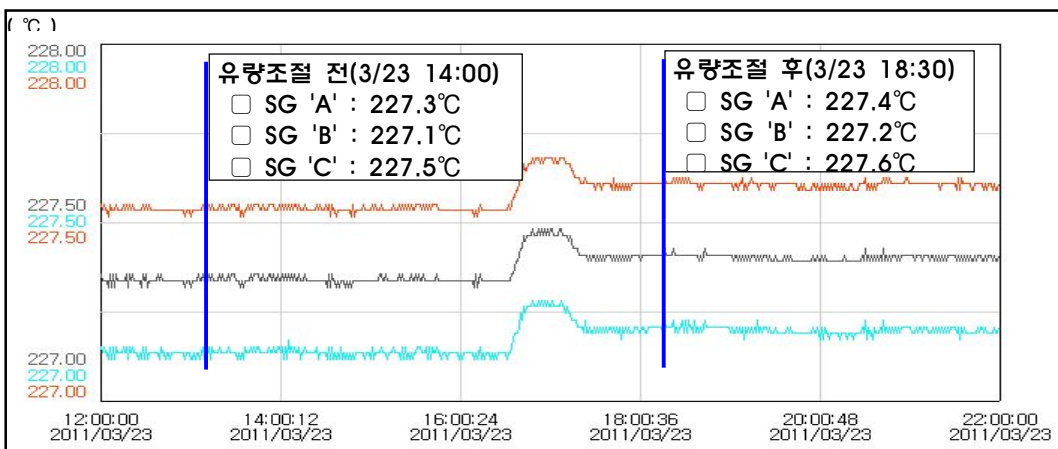


그림 5.10 영광 2호기 증기발생기 급수온도 변화

2. 습분분리재열기(MSR) 가열증기 유량 조절

가. 개요

열성능 진단 결과 MSR 고압재열기로 공급되는 주증기 유량이 설계 대비 높게 공급되는 것으로 분석 되었다.

영광1호기 MSR은 4th Pass Type 열교환 방식으로, 4th Pass 배수관에 설치된 조절 밸브에 의해 가열증기 유량을 최적화 할 수 있다.

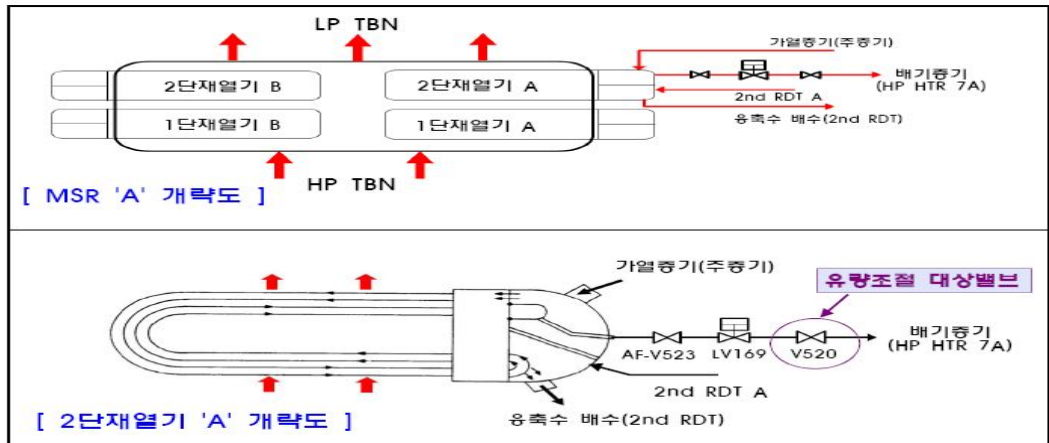


그림 5.11 습분분리기 2단계재열기 배기설비 개략도

나. 대상기기

- 습분분리기(MSR) 2단계재열기 4대

다. 유량조절 방법

- 습분분리기 2단계재열기에서 고압급수 가열기 7A/B로의 배기밸브를 완전 개방 상태에서 조절 개방하여 가열 증기 유량을 설계 유량과 유사하게 조절한다.

구 분		조절 전	조절 후	유량감소	비 고
MSR 'A'	V520 (2단계재열기 'A')	23 Turn	3 Turn	없음	
	V521 (2단계재열기 'B')	23 Turn	2.5 Turn	있음	약 5,000 Kg/hr 감소
MSR 'B'	V530 (2단계재열기 'C')	23 Turn	3 Turn	없음	
	V531 (2단계재열기 'D')	23 Turn	3 Turn	없음	

표 5.4 MSR 2단 재열기 유량 조절 밸브 조절 현황표

라. 운전영향 및 효율 효과

1) 운전영향 분석

- 습분분리기 가열증기 유량 조절밸브를 서서히 닫음에 따라 유량이 감소하고 MSR 출구온도 및 2단계열기 배수온도, MSR 출구 증기 온도가 감소하는 등 습분분리기의 성능저하 현상이 발생하였다.
- 따라서, 습분분리기 가열증기 유량 조절밸브를 조절 전 상태로 복구 하였다.

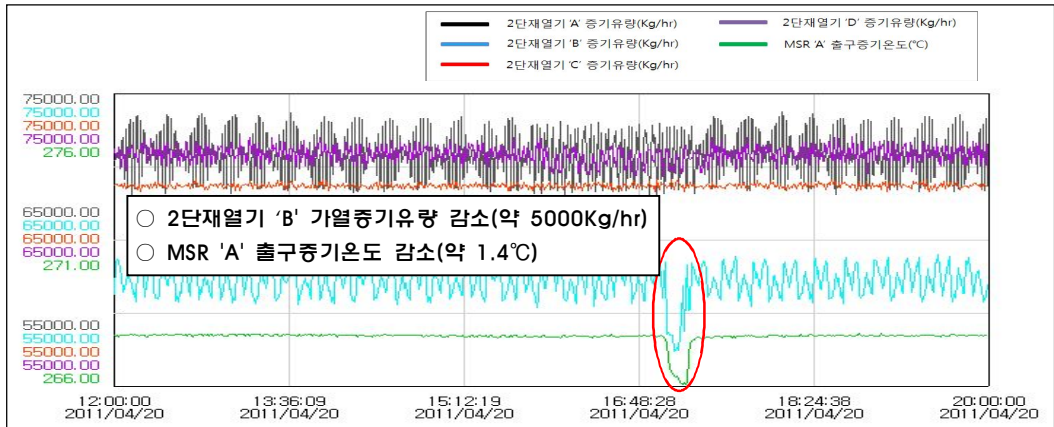


그림 5.12 MSR 2단계열기 증기유량 곡선

2) 효율향상 효과 : 없음

- 습분분리기 가열증기유량 소량 감소시 발전기 출력(송전단)이 약 0.1 MW 감소하였고, MSR 출구증기 온도도 감소하는 증상으로 추측하건데, 현재 상태가 습분분리기 가열증기 유량이 최적상태임을 확인하였다.

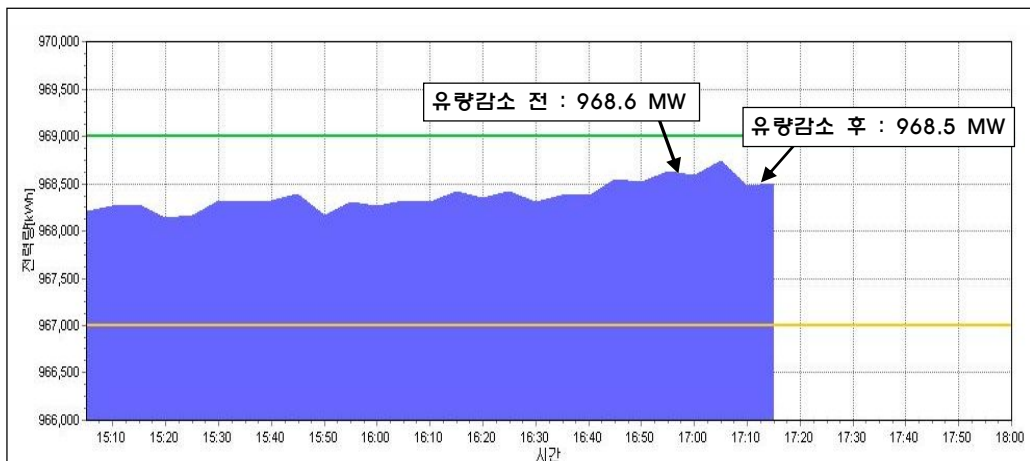


그림 5.13 MSR 가열증기유량과 출력곡선

3. 하절기 복수기 진공도 최적 운영

가. 개요

하절기 기간 중 해수온도 상승으로 인한 복수기 진공 감소 효과로 발전 출력 감소 폭이 타 발전소에 비해 상대적으로 큼에 따라 복수기 진공도 개선을 위해 복수기 전열관 세척계통의 운전 방법을 개선하였다.

복수기 전열관 세척계통은 정상 운전 중 복수기 전열관 세척불을 수집하기 위해 상/하부 스크린을 닫힘 상태를 유지하여 운전하고 있다. 그러나 상/하부 스크린에 해양생물 및 이물질 축적 등으로 순환수 유량이 제한되는 요인이 되었다.

따라서 상/하부 스크린을 상시 닫힘 상태에서 주기적으로 개방함으로써 순환수 유량의 증가로 복수기 진공도 및 발전기 출력등의 향상 효과를 가져왔다.(그림 5.15 참조)

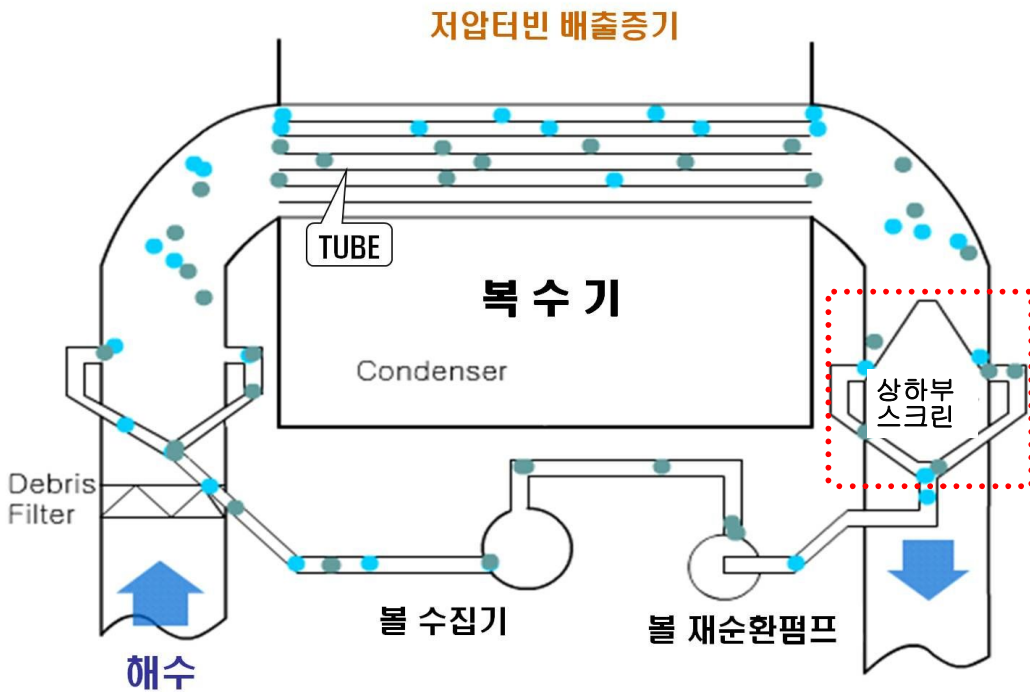


그림 5.14 복수기 전열관 세척계통 개략도

나. 대상기기

□ 24개(상부/하부 스크린 각 12개)

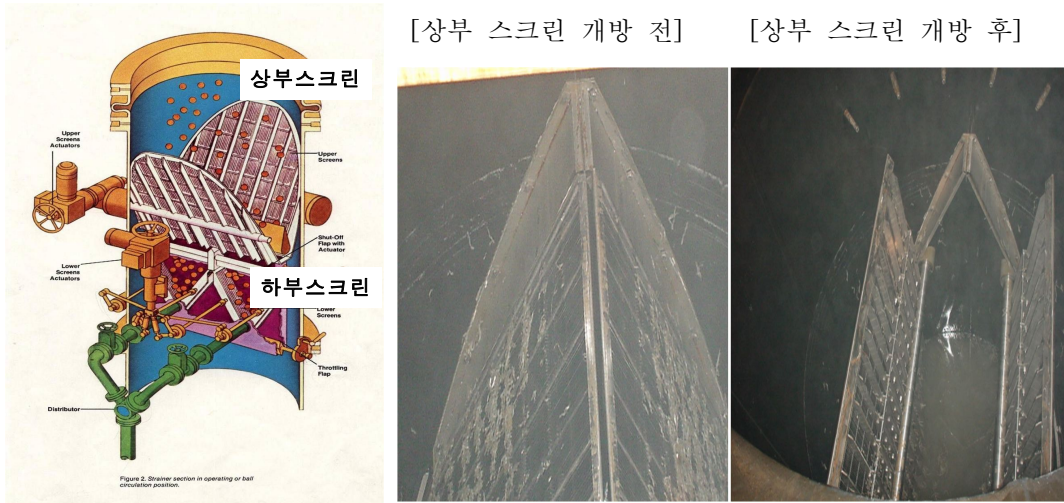


그림 5.15 복수기 전열관 세척계통 스크린 구조

다. 효율향상 효과

□ 발전단 및 송전단 출력이 각각 2 MW(1호기), 0.5 MW(2호기) 증가하였다.

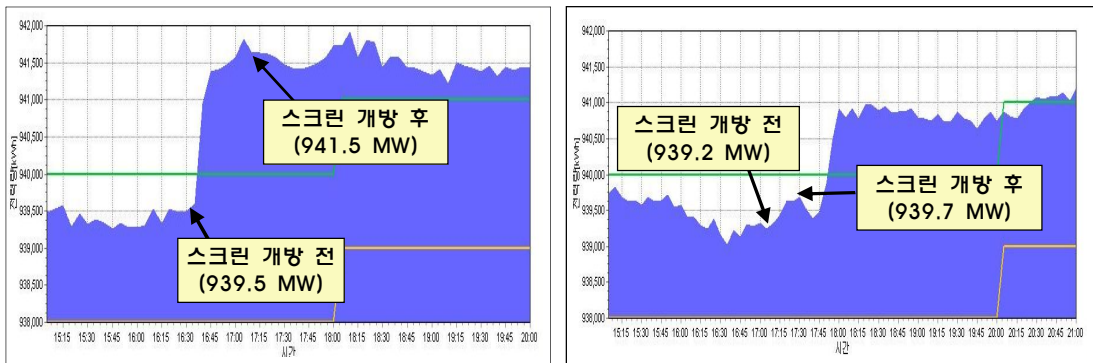


그림 5.16 영광 1,2호기 송전단 출력 변화

라. 운전 영향

- 상하부 스크린 개방 후 전열관 냉각수 유량증가 영향으로 발전소 효율이 다소 향상 되었다.
- 스크린 개방 전/후 운전변수

구 분		단위	상/하부 스크린		비 고	
			개방 전	개방 후		
복수기 진공	#1	mmHgA	60.15	58.42	1.73 mmHgA 향상	
	#2		53.3	52.9	0.4 mmHgA 향상	
복수기 냉각해수온도	#1	℃	입구/출구	28.0/36.27	28.01/36.0	ΔT : 0.28℃ 감소
			ΔT	8.27	7.99	
	#2	입구/출구	27.4/36.32	27.44/36.21	ΔT : 0.15℃ 감소	
		ΔT	8.92	8.77		
SG 급수온도	#1		229.16	229.16	변화 없음	
	#2		227.43	227.43		

표 5.5 복수기 전열관 세척계통 운전 개선에 따른 운전 변수 변화

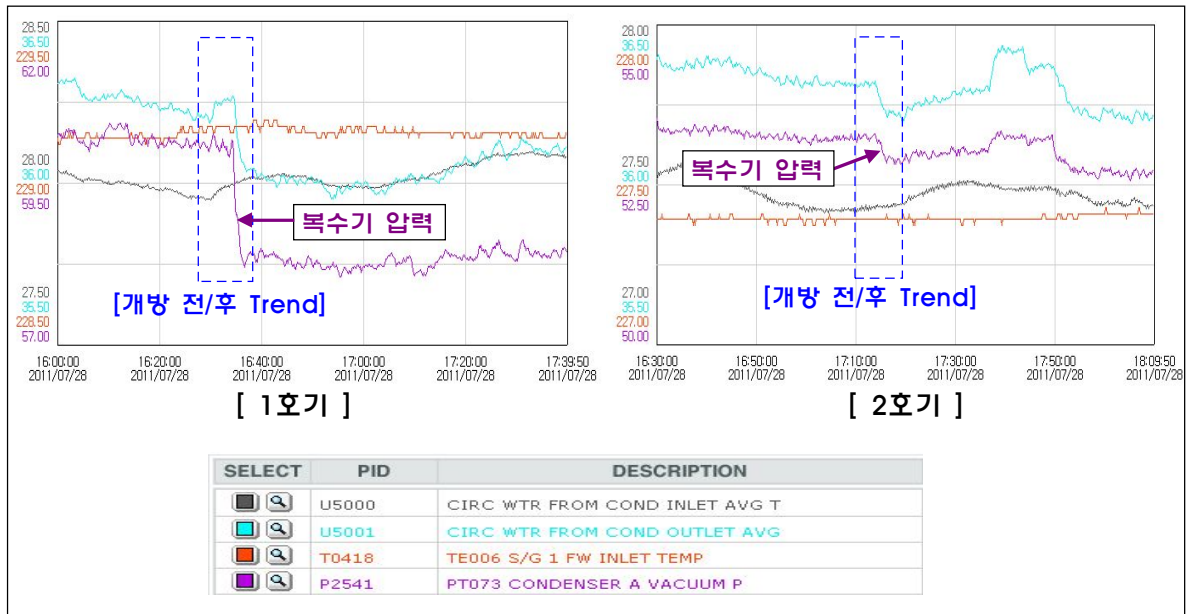


그림 5.17 복수기 전열관 세척계통 운전 개선에 따른 복수기 진공변화

제 6 장 결 론

영광 1호기 2차 계통의 종합적이고 일원화된 성능 관리로 발전 운영 효율성 및 수익성 극대화하기 위해 열성능 시험을 수행하였다.

본 연구에서는 열성능 시험의 결과로, 영광 1,2호기의 2차계통 효율 향상을 위한 여러 방안을 도출하였고 현장에 그 방안을 적용함으로써 발전소 출력을 향상시키고 효율을 개선하였다.

첫 번째로, 습분분리 재열기의 가열증기유량이 설계유량 대비 과잉 공급되는 것으로 진단됨에 따라, 가열증기유량을 감소 조치하였으나 오히려 발전소 출력이 감소하는 증상이 나타나 현재 상태가 최적상태임을 확인하였다.

두 번째로, 발전소 열출력 계산시 사용하는 계측기(주급수 온도 측정 RTD) 및 복수기 진공도 곡선의 실제값과의 편차가 발생하는 문제점에 대해 해당 계측기를 보정함으로써 문제를 해소하였다.

세 번째로, 급수가열기 연속배기 유량의 과다 및 복수기 진공도 저하로 발생하는 열손실은 계통의 운전 방법을 최적화함으로써, 발전 출력이 증가되는 효과를 가져왔다.

○ 급수가열기 연속배기 유량 최적화에 따른 전기출력 상승 효과(1년 기준)

- 1호기 : $0.8 \text{ MW} * 24\text{hr} * 365 = 7,008 \text{ MW}$

- 2호기 : $0.8 \text{ MW} * 24\text{hr} * 365 = 7,008 \text{ MW}$

○ 하절기 기간 동안 복수기 전열관 세정 계통 상/하부 스크린 개방에 따른 전기출력 상승효과(3개월 기준)

- 1호기 : $2.0 \text{ MW} * 2,160 = 4,320 \text{ MW}$, 2호기 : $0.5 \text{ MW} * 2,160 = 1,080 \text{ MW}$

효율에 영향을 미치는 기기의 운전 최적화로 발전출력량은 연간 19,410 MW 증가하는 결과를 가져왔다.

이는 기존의 운전중인 모든 발전소에서도 큰 비용부담 없이 개선할 수 있으므로, 2차 계통의 주요 설비[급수가열기, 복수기, 습분분리재열기, 펌프등]의 성능을 진단하고, 현재 운전 방법의 문제점을 도출하여 최적화 한다면 발전 출력의 증가를 가져올 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 2007 Younggwang Nuclear Unit 1 and 2 Station Manual
- [2] 2012 Younggwang Nuclear Power Plant #1,2 Operation Procedure : Temporary Operation Procedure No 440
- [3] 2012 Younggwang Nuclear Unit 1 and 2 P&ID
- [3] 2차계통 정밀 열성능진단 결과(2011.4)- Enesco
- [4] 2007 High-Pressure Turbine Manual Volume 10(Westinghouse)
- [5] 2007 Low-Pressure Turbine Manual Volume 11(Westinghouse)
- [6] 2007 Moisture Separator Reheaters Manual Volume 24(Westinghouse)
- [7] 2007 Instruction Manual of Feedwater Heaters(BECHTEL)
- [8] ASME PTC 6.0 : Steam Turbines
- [9] ASME PTC 12.1 : Closed Feed Water Heaters
- [10] ASME PTC 12.2 : Steam Surface Condensers
- [11] ASME PTC 12.4 : Moisture Separator reheaters
- [12] ASME PTC 19.1 : Measurements and Test Uncertainty
- [13] ASME PTC 19.2 : Pressure Measurement
- [14] ASME PTC 19.3 : Temperature Measurement
- [15] ASME PTC 19.5 : Flow Measurement

감사의 글

발전소에서 근무한 지 15년이라는 세월이 흘렀습니다. 제 인생의 이삼십대가 훌쩍 지나버린 시간동안 현장에서 몸으로 부대끼며 원자력 학문의 배움의 길이 무궁무진하다는 걸 느끼게 되었습니다. 직장 생활과 배움의 길을 동시에 한다는 것은 쉽지 않을거라는 건, 이미 몸소 체험하였기에 쉽게 도전하기가 어려운건 사실이었습니다.

그러나, 매주 세 시간의 거리를 마다하지 않으시고 사랑과 열정으로 강의를 해 주신 교수님들의 모습에 용기를 얻었고, 마침내 논문을 마치는 감사의 글까지 쓰게 되었습니다.

논문의 시작에서부터 마지막까지 세심한 배려를 해주신 송중순 교수님께 진심으로 감사의 말씀 드립니다. 그리고 제가 석사학위를 무사히 마치도록 배려해 주신 김승평 교수님, 정운관 교수님, 프로그램의 달인 나만균 교수님, 친형 같은 이미지의 이경진 교수님, 잔잔한 미소가 아름다우신 김진원 교수님께 진심으로 감사의 말씀 드립니다.

2년이라는 시간은 제게 앞만 보고 달려와 놓친 것, 잃은 것도 많은 시간이었지만 그만큼 제 인생 전체를 볼 때 가장 큰 발전과 발돋움의 기간이었습니다. 이렇게 변화할 수 있게 도와주신 제 주위에 모든 분들께 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로 옆에서 저의 결정을 믿고 끝까지 지원해준 내 아내, 현정씨와 우리 가정의 행복 전도사들, 큰 딸 민솔이, 듄직한 성진이, 귀염둥이 막내딸 민지에게도 감사의 맘을 모아 부족하지만 대학원 생활의 마지막 결실인 이 논문을 바치고 싶습니다.

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20117083	과 정	석사
성 명	한글 : 김 천 호 한문 : 金 千 浩 영문 : KIM CHUN HO				
주 소	전남 영광군 백수읍 약수리 396				
연락처	E-mail : chh1035@khnp.co.kr				
논문제목	열성능 진단시험을 통한 영광1,2호기 발전소 2차 계통 효율 증대 방안 분석 연구				
	A study on the efficiency improvement of the plant secondary System in NPP #1,2 by thermal performance diagnostics test				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(O) 반대()

2012년 11월

저작자: 김 천 호

조선대학교 총장 귀하