

복합화력 성능감시 정량화 기법

주용진*† · 김시문* · 서석빈* · 김미영* · 마삼선* · 홍진표*

A Performance Monitoring Method for Combined Cycle Power Plants

Yong-Jin Joo*†, Si-Moon Kim*, Seok-Bin Seo*, Mi-Young Kim*, Sam-Sun Ma*, Jin-Pyo Hong*

Key Words : Performance Monitoring(성능감시), Loss Allocation(손실분담), Heat Rate(열소비율), Combined Cycle(복합화력), Simulation(시뮬레이션)

ABSTRACT

This paper outlines how the on-line performance monitoring system can be used to improve the efficiency and maintenance of the equipments. And a method of the heat rate allocation to each equipment was suggested to monitor the performance of combined cycle power plants. This calculates the expected heat rate of current conditions and compares it with actual values. Loss allocation in heat rate is reconciled by calculating the magnitude of the deficiency contributed by major components, such as the gas turbine, heat recovery steam generator, steam turbine and condenser. Expected power output is determined by a detailed model and correction curves of the plant. This simulation models are found to reproduce high accuracy in behavior of the cycle for various operating conditions, both in design and in off-design condition. Errors are lower than 2% in most cases.

Nomenclature

F	: fuel heat input (kJ/h)	EXP	: expected
HR	: heat rate (kcal/kWh)	GT	: gas turbine
kW	: power output (kW)	HRSG	: heat recovery steam generator
η	: efficiency (%)	RC	: Rankine cycle
		ST	: steam turbine
		TOT	: total

Subscripts

ACT	: actual
CC	: combined cycle
Cond	: condenser
CT	: cooling tower

Abbreviations

API	: application programming interface
CGS	: communication gateway server
DCS	: distributed control system
MMI	: man machine interface
OPC	: OLE for process control
RTDB	: real time data base

* 한국전력공사 전력연구원

† 교신저자, E-mail : yongjj@kepri.re.kr

1. 서론

복합발전은 천연가스 등의 연료를 사용하여 1차적으로 가스 터빈 사이클을 이용하여 발전하고, 2차적으로 가스터빈에서 배출되는 배기가스의 열량을 회수하기 위해 배열회수보일러를 통과시켜 증기를 생산한 후 증기터빈 사이클을 이용하여 발전하는 방식이다. 복합발전은 두 차례에 걸쳐 발전하기 때문에 기존 화력보다 열효율이 10% 정도 높다는 점과, 공해가 적고 기동정지 시간이 짧다는 장점이 있다.⁽¹⁾

복합발전은 2008년 6월 30일 기준 약 40,455백만kWh로써, 전 발전원별 설비용량의 20%를 점유할 정도로 국내 발전 설비에서 차지하는 비중이 매우 크며,⁽²⁾ 국내 전력시장도 자유경쟁에 의한 전력거래 체제로 변화됨에 따라 핵심 경쟁요소인 연료비 및 운전비용 절감을 위한 발전소 최적 성능 유지를 위한 노력이 활발히 진행되고 있다. 종래에는 성능진단 전문요원이 설정된 운전 조건에서 정밀 계측기를 설치하여 성능시험을 수행하고, ASME PTC Code (3-6)에 의한 성능계산을 통해서만 성능의 변화를 파악할 수 있었으나, 실시간으로 성능변화를 감지할 수 없어 비효율적인 요소를 포함한 상태에서 운전을 지속하는 일이 빈번히 발생할 수밖에 없었다.

본 논문에서는 온라인으로 방대한 성능변수를 체계적으로 관리하기 위하여 실시간데이터베이스를 사용하는 국내 A-복합화력발전소의 성능감시시스템(7-9)에 열소비율 손실분담 기법을 적용하고, 고찰을 통하여 기법의 타당성을 입증하였다.

2. 열소비율 손실분담 기법

열소비율 손실분담 기법이란 현재 운전조건에서 복합발전시스템의 실제 열소비율과 기대열소비율의 편차, 즉 손실분을 계산하고 이를 가스터빈, 배열회수보일러, 증기터빈, 복수기로 분담시킴으로써 어느 기기가 현재 비효율적으로 운전되는지를 정량적으로 감지할 수 있도록 한다.

2.1 출력, 열소비율, 효율 관계식

열소비율 손실분담 기법을 다양한 구성비에 대하여 적용할 수 있도록, 3×3×1 구성비 즉, 3대 가스터빈과 3대의 배열회수보일러 그리고 1대의 증기터빈으로 구성되어 있는 복합화력 발전 설비를 대상으로 유도하였다. 복합발전시스템에서의 에너지 흐름을 Fig. 1과 같이 도시하여 출력, 열소비율, 효율간의 상관관계를 이해하고 관계식을 유도하였다. 복합발전시스템에 투입되는 열 입력은 연료가 갖는 에너지이며 각 기기별로

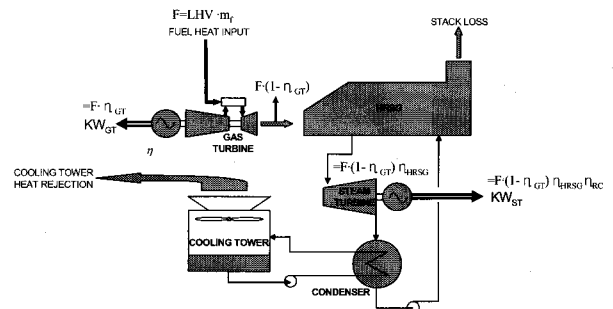


Fig. 1 Energy streams for combined cycle power plant

에너지의 입력과 출력의 상관관계를 표현하였다. 열소비율 분담식을 유도하기 위해 발생하는 총 출력은 3대의 가스터빈 출력과 1대의 증기터빈의 출력의 합으로 식(1)과 같다.

$$kW_{TOT} = kW_{GT,TOT} + kW_{ST} = kW_{GT1} + kW_{GT2} + kW_{GT3} + kW_{ST} \quad (1)$$

그리고 Fig. 1과 같이 식(1)을 가스터빈으로 유입되는 연료 에너지와 각 구성기기의 효율 향으로 대치하면 식(2)과 같다. 여기서 F는 가스터빈에 공급되는 연료의 입열량(kJ/h)을 의미하며, 연료 입열량은 연료의 발열량과 공급연료 유량의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$kW_{TOT} = F_1 \cdot \eta_{GT1} + F_2 \cdot \eta_{GT2} + F_3 \cdot \eta_{GT3} + [F_1(1-\eta_{GT1})\eta_{HRSG1} + F_2(1-\eta_{GT2})\eta_{HRSG2} + F_3(1-\eta_{GT3})\eta_{HRSG3}] \cdot \eta_{RC} \quad (2)$$

전체 복합발전시스템의 열소비율은 투입된 연료에너지와 총 출력의 향으로 식(3)과 같이 표현된다.

$$HR = \frac{F_{TOT}}{kW_{GT,TOT} + kW_{ST}} = \frac{\sum_{i=1}^3 F_i}{\sum_{i=1}^3 F_i \cdot \eta_{GTi} + \eta_{RC} \sum_{i=1}^3 (1-\eta_{GTi}) \cdot F_i \cdot \eta_{HRSGi}} \quad (3)$$

전체 복합발전시스템의 효율은 열소비율의 역수관계에 있고, 전체 복합발전시스템의 열소비율 관련 식(3)을 이용하여 나타내면 식(4)과 같다.

$$\eta_{CC} = \frac{\sum_{i=1}^3 F_i \cdot \eta_{GTi} + \eta_{RC} \sum_{i=1}^3 (1 - \eta_{GTi}) \cdot F_i \cdot \eta_{HRSGi}}{\sum_{i=1}^3 F_i} \quad (4)$$

식(3)과 (4)에서 알 수 있는 바와 같이 전체 발전소 열소비율 및 효율은 구성기기인 가스터빈, 배열회수보일러 및 증기터빈 사이클의 함수임을 알 수 있다. 따라서 이들 해당기기의 성능변화에 의한 전체 발전소 효율 및 열소비율에 미치는 영향을 계산할 수 있다.

2.2 가스터빈 손실

전체 열소비율 손실 중 가스터빈 단위 기기성능이 열소비율에 미치는 영향을 수학적으로 유도하여 이를 성능감시시스템에 적용하고자 한다. 해당되는 가스터빈에서 발생하는 열소비율의 편차는 운전 변수들의 기대치와 실제치의 편차를 분석하여 규명할 수 있다.

전체 열소비율 중 j번째 가스터빈에 의해 발생하는 열소비율 손실분담식을 구하기 위해 복합발전 전체 효율을 표기한 식(4)을 j번째 가스터빈에 대하여 편미분하고 이를 정리하면 식(5)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta_{CC}}{\partial \eta_{GTj}} &= \frac{F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} (1 - \eta_{RC} \cdot \eta_{HRSGj}) \Rightarrow \\ \Delta \eta_{CC} &\approx \frac{F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} (1 - \eta_{RC} \cdot \eta_{HRSGj}) \cdot \Delta \eta_{GTj} \end{aligned} \quad (5)$$

j번째 가스터빈의 성능변화가 전체 복합발전의 효율 및 열소비율에 미치는 영향은 각각 식(6)과 식(7)과 같이 유도할 수 있다.

$$\Delta \eta_{CC} = \eta_{CC,EXP} - \eta_{CC,ACT} = \frac{1}{HR_{EXP}} - \frac{1}{HR_{ACT}} = \frac{HR_{ACT} - HR_{EXP}}{HR_{EXP} \cdot HR_{ACT}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} HR_{ACT} - HR_{EXP} \Big|_{GTj} \\ = HR_{EXP} \cdot HR_{ACT} \frac{F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} (1 - \eta_{RC} \cdot \eta_{HRSGj}) (\eta_{GTj,EXP} - \eta_{GTj,ACT}) \end{aligned} \quad (7)$$

HRACT는 현재 운전조건에서 실제 계측기로부터 측정되는 연료 유입량, 발열량, 출력을 이용하여 계산되는 열소비율이고, HREXP는 기대 열소비율로써 제작사 사양을 기준으로 계

산되거나, 계획예방정비 직후의 기기의 성능이 최상일 경우 현재 발전소 운전조건(부하조건, 대기조건)에서 복합발전시스템의 최소 열소비율이다. 그러므로 HRACT와 HREXP와의 차가 (+) 값이면 이는 해당 가스터빈이 최적으로 운전되지 못함에 의해 발생하는 손실을 의미한다.

2.3 배열회수보일러 손실

각 배열회수보일러의 성능이 전체 복합발전시스템 열소비율에 미치는 영향을 정량화하기 위해 가스터빈에서 유도한 방법과 동일하게 식(8)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta_{CC}}{\partial \eta_{HRSGj}} &= \frac{F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} \cdot \eta_{RC} (1 - \eta_{GTj}) \Rightarrow \\ \Delta \eta_{CC} &\approx \frac{F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} \cdot \eta_{RC} (1 - \eta_{GTj}) \Delta \eta_{HRSGj} \end{aligned} \quad (8)$$

식(6)과 식(8)을 이용하여 배열회수보일러의 열소비율 손실 분담량은 식(9)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} HR_{ACT} - HR_{EXP} \Big|_{HRSGj} \\ = HR_{EXP} \cdot HR_{ACT} \frac{F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} \eta_{RC} (1 - \eta_{GTj}) \\ \cdot (\eta_{HRSGj,EXP} - \eta_{HRSGj,ACT}) \end{aligned} \quad (9)$$

2.4 증기터빈 사이클 손실

증기터빈 사이클(Rankine Cycle)은 Fig. 1에서 같이 증기터빈, 복수기 및 냉각탑으로 구성되어 있다. 따라서 증기터빈 사이클에 의한 열소비율 분담식을 먼저 유도하고 구성기기별 성능변화에 의해 증기터빈 사이클의 열소비율에 미치는 영향을 더 세분화할 필요가 있다. 증기터빈 사이클에 의한 열소비율 분담식은 식(10)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta_{CC}}{\partial \eta_{RC}} &= \frac{\sum_{i=1}^3 (1 - \eta_{GTi}) \cdot \eta_{HRSGi} \cdot F_i}{\sum_{i=1}^3 F_i} \Rightarrow \\ \Delta \eta_{CC} &\approx \frac{\sum_{i=1}^3 (1 - \eta_{GTi}) \cdot \eta_{HRSGi} \cdot F_i}{\sum_{i=1}^3 F_i} \Delta \eta_{RC} \end{aligned} \quad (10)$$

식(6)와 식(10)을 이용하여 증기터빈 사이클의 열소비율 손실분담량은 식(11)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 & HR_{ACT} - HR_{EXP} |_{RC} \\
 &= HR_{EXP} \cdot HR_{ACT} \frac{\sum_{i=1}^3 (1 - \eta_{GTi}) \cdot \eta_{HRSGi} \cdot F_i}{\sum_{i=1}^3 F_i} (\eta_{RC,EXP} - \eta_{RC,ACT})
 \end{aligned} \tag{11}$$

먼저 복수기의 성능변화에 의한 증기터빈 사이클에 미치는 열소비율 영향을 살펴보면, 증기터빈 사이클의 성능, 즉 출력은 복수기의 배압에 의해 크게 영향을 받는다. 그러므로 증기터빈 사이클의 효율 및 열소비율은 복수기에 공급되는 냉각수의 실제온도를 기준으로 해서 복수기의 실제 압력과 실제 온도에서 기대되는 복수기 압력의 차이에 의해 발생된다. 따라서 식(11)의 증기터빈 사이클의 열소비율 분담식으로부터 식(12)과 같이 복수기의 열소비율 분담을 정량화 한다.

$$\begin{aligned}
 & HR_{ACT} - HR_{EXP} |_{Cond} \\
 &= HR_{EXP} \cdot HR_{ACT} \frac{\sum_{i=1}^3 (1 - \eta_{GTi}) \cdot \eta_{HRSGi} \cdot F_i}{\sum_{i=1}^3 F_i} (\eta_{RC,EE} - \eta_{RC,EA})
 \end{aligned} \tag{12}$$

다음으로 냉각탑의 성능이 열소비율에 미치는 영향은 복수기에 공급되는 냉각수의 실제온도와 기대온도의 차이에 의해 발생된다. 냉각탑은 현재 대기온도에 대해 냉각탑의 성능에 따라 복수기로 공급되는 냉각수의 온도에 차이가 발생되고 이는 복수기 압력에 직접적인 영향을 미치기 때문이다.

$$\begin{aligned}
 & HR_{ACT} - HR_{EXP} |_{CT} \\
 &= HR_{EXP} \cdot HR_{ACT} \frac{\sum_{i=1}^3 (1 - \eta_{GTi}) \cdot \eta_{HRSGi} \cdot F_i}{\sum_{i=1}^3 F_i} (\eta_{RC,EP} - \eta_{RC,EE})
 \end{aligned} \tag{13}$$

여기서, $\eta_{RC,EP}$ 는 현재 대기 조건에서 냉각탑으로부터 공급되는 냉각수 온도 기대치 기준으로 예측되는 복수기 압력에서의 증기터빈 사이클 효율이고, $\eta_{RC,EE}$ 는 실제 공급되는 냉각수 온도를 기준으로 기대되는 복수기 압력에서의 증기터빈 사이클 효율을 의미한다.

2.5 증기터빈 손실

증기터빈 사이클에서 증기터빈에 의한 열소비율 분담은 전체 증기터빈 사이클의 열소비율 분담 중에 복수기 및 냉각탑에 기인하는 열소비율 편차를 제함으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & HR_{ACT} - HR_{EXP} |_{ST} \\
 &= (HR_{ACT} - HR_{EXP} |_{RC}) - (HR_{ACT} - HR_{EXP} |_{Cond}) \\
 &\quad - (HR_{ACT} - HR_{EXP} |_{CT})
 \end{aligned} \tag{14}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 대상 복합발전시스템

열소비율 손실분담 기법의 적용대상 발전소는 국내 A-복합 화력발전소로서 설비는 2개의 블록으로 구성되어 있다. 2블록과 3블록은 각기 가스터빈 2기와 증기터빈 1기로 구성되며, ASME 표준상태에서의 발전단 전력생산량은 블록당 약 511 MW이다. 지역난방을 위한 열생산량은 없다. 발전소 분산제어 시스템은 MITSUBISHI (DIASYS-UP) 이다.

A-복합화력발전소 성능감시시스템의 실시간 데이터 흐름은 Fig. 2와 같다. 2블록과 3블록 각기 CGS 시스템이 분산제어시스템과 연결되어 있으며 제어실의 MMI의 역할을 한다. 또한 OPC 서버 국산화 프로젝트를 통해 개발된 OPC 서버가

Table 1 Configuration of A-combined cycle power plant

Item	Block #2	Block #3
Configuration	Two(2) Westinghouse W501F Two(2) HRSG One(1) Westinghouse ST	Two(2) Westinghouse W501F Two(2) HRSG One(1) Westinghouse ST
Power Output	511,310 kW	511,310 kW
Combined Cycle Efficiency	53.08 % (ASME Standard Condition)	53.08 % (ASME Standard Condition)
GT Capacity	160,160 kW (ASME Standard Condition)	160,160 kW (ASME Standard Condition)
ST Capacity	190,990 kW (ASME Standard Condition)	190,990 kW (ASME Standard Condition)
DCS Model	Mitsubishi DIASYS-UP	Mitsubishi DIASYS-UP

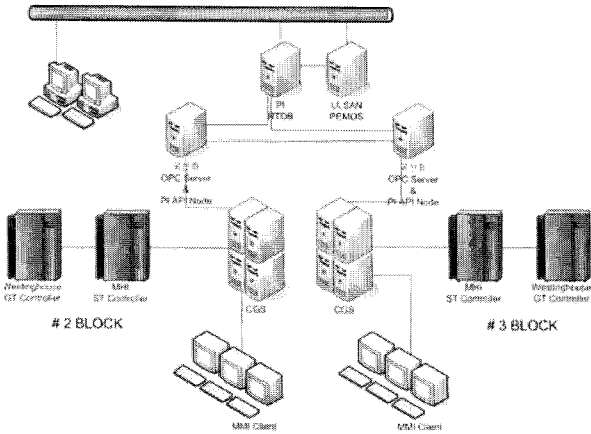


Fig. 2 Performance monitoring system architecture for A-combined cycle power plant

CGS 시스템에 연결되어 PI API 노드를 위한 게이트웨이 역할을 한다. PI API 노드는 국산화 OPC 서버에서 데이터를 수집할 수 있도록 인터페이스 프로그램이 설치되며 DCS의 운전데이터를 PI™ (10)가 설치된 RTDB 서버로 전송한다.

PI API 노드는 RTDB 서버에서 이상이 발생하였을 경우 자동적으로 데이터를 보존하여 문제 상황이 해결된 후에도 데이터의 손실이 없도록 버퍼 역할을 한다.

RTDB 서버는 성능계산을 위해 필요한 데이터를 보관하고 여러 응용프로그램이 이 데이터를 사용할 수 있도록 데이터 저장소 및 플랫폼 역할을 하며, PEMOS 서버는 RTDB 서버로부터 데이터를 수집하고 각 블록의 최적화된 모델에서 성능계산을 수행한다. 또한 운전데이터와 성능계산 결과값은 사용자 편의에 맞추어 성능관리를 최적으로 수행할 수 있도록 응용 프로그램 화면을 제공한다.

3.2 적용 결과 및 고찰

정식화된 열소비율 손실분담 기법을 A-복합화력발전소 성능감시시스템에 적용한 결과는 Fig. 3과 같으며 송전단 기준의 출력과 열소비율에 대하여 각각 실제치와 기대치를 계산하고 이들의 편차를 정량적으로 제시하고 있다. 실제치는 발전소에서 실측된 운전데이터를 이용하여 계산한 성능치를 의미하며, 제작사가 제시하는 각종 설계치 및 보정곡선을 기반으로 상용 열정산 코드인 Virtual Plant™ (11)을 사용하여 기대치를 계산하였다. 당시 송전단 출력의 실제치는 358.99 MW이고 기대치는 412.09 MW로써 53.10 MW 만큼 낮은 수준이었다. 송전단 열소비율은 실제치가 1744.48 kcal/kWh이고 기대치는 1465.79 kcal/kWh로써 기대치보다 278.69 kcal/kWh 만큼

높았다.

이로써 구성기에서 발생하는 비효율적 운전요소에 의해 단일 출력을 생산하는데 보다 많은 연료가 투입되고 있음을 알 수 있었다. 이러한 성능열화의 발생원인을 진단할 수 있도록 각 구성기별로 열소비율 손실량을 계산하여 Fig. 3과 같이 분담시켰다.

3.2.1 가스터빈 열화분석

기기별 열소비율 편차는 Fig. 3과 같이 가스터빈 5호기와 6호기가 각기 34.05 kcal/kWh와 35.11 kcal/kWh의 (+)값을 보이며, 이로써 실제 운전 성능이 기대 성능보다 열화된 상태에서 운전되고 있음을 알 수 있다. 가스터빈 열화의 원인을 진단하기 위해 Fig. 4와 같이 정상상태 운전시간대의 데이터를 1분 단위로 추출하여 평균한 값의 기대 출력과 실제 출력을 비교하였다.

가스터빈 5호기와 6호기의 정격출력은 161,160 kW (ISO 조건)이지만 실제 출력은 5호기가 122,053 kW, 6호기가 121,842 kW 이었으며, 이때 기대 출력은 149,260 kW로써 부분부하 조건에서 운전되고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 동일 시간대의 가스터빈 5호기와 6호기의 효율을 나타낸 그래프이다. 여기서 특이한 점은 가스터빈 5호기와 6호기의 출력은 같지만 평균 0.43% point 효율의 차이로 5호기가 6호기 보다 양호한 것으로 나타났다. 이는 A-복합화력발전소가 당시 급전에서 요청한 정해진 출력으로 운전되고 있음을 의미한다.

가스터빈 효율에 가장 큰 영향을 미치는 압축기의 성능에 대하여 단일 효율과 폴리트로픽 효율로써 Fig. 6과 같이 나타내었다. 가스터빈 5호기의 압축기 단일 효율은 82.80%로써 6호기 보다 평균 0.82% point 양호하였다. 그러나 단일 효율은 운전조건과 입출력 조건에 따라서 변화하므로 압축기의 성능

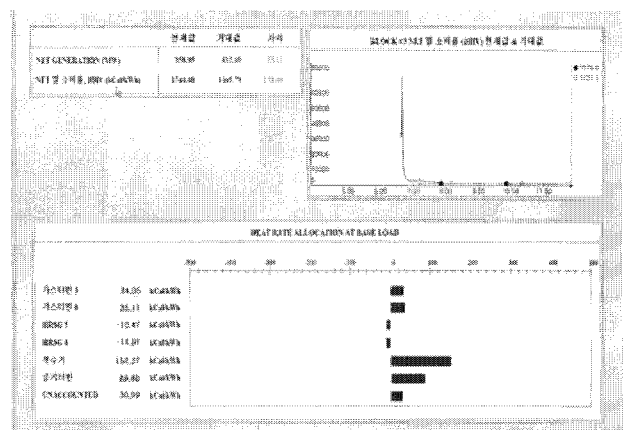


Fig. 3 Screen of heat rate loss allocation

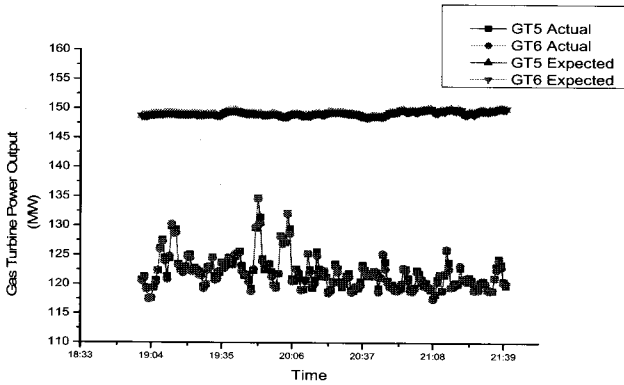


Fig. 4 Comparison of expected and actual GTs power output

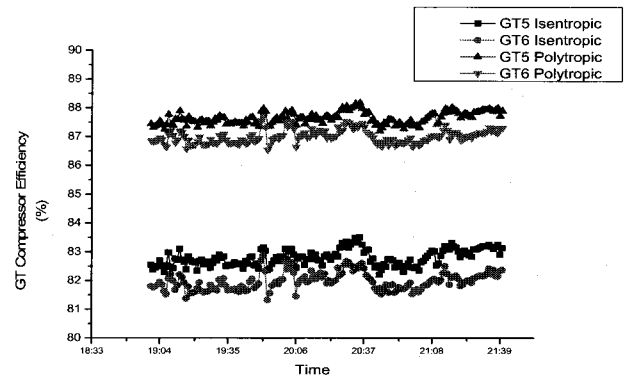


Fig. 6 Comparison of actual GT compressors efficiency

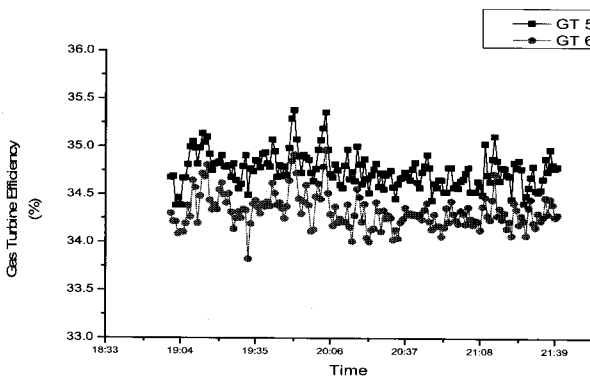


Fig. 5 Comparison of actual GTs efficiency

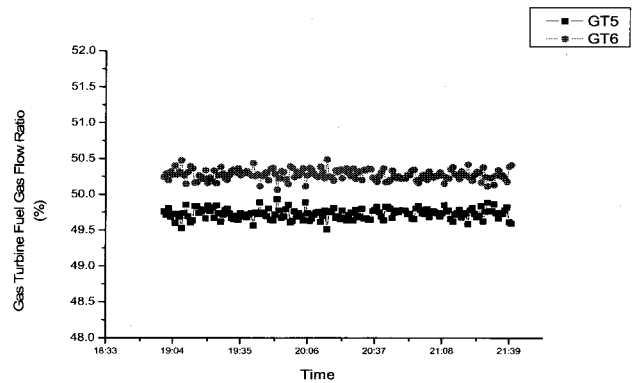


Fig. 7 Comparison of actual GTs fuel flow ratio

평가를 제대로 파악하기 위하여 폴리트로픽 효율을 계산하였다. 가스터빈 5호기의 압축기 폴리트로픽 효율은 87.00%로써 6호기 보다 평균 0.64% point 양호하였다. 그리고 가스터빈 5호기와 6호기의 연소기로 인입되는 연료유량비에 대하여 Fig. 7과 같이 비교하였다. 가스터빈 5호기의 연료량이 6호기보다 적은 양의 연료가 인입되는 것을 알 수 있다. 여기서 가스터빈 5호기의 효율이 6호기보다 명백히 우수하므로 동일 출력을 생산한다면 가스터빈 5호기의 연료량이 6호기 보다 적게 필요함을 규명할 수 있다.

결과적으로 Fig. 4와 같이 종래의 발전시스템에서 이루어져 왔던 단순 출력비교만으로는 열화의 정도를 파악할 수 없으며 본 논문에서 고안된 열소비율 손실분담 기법을 통해서 가스터빈 열화의 정도를 정량적으로 판단할 수 있었다.

3.2.2 증기터빈 사이클 열화분석

기기별 열소비율 편차는 Fig. 3과 같이 복수기와 증기터빈이 각각 152.37 kcal/kWh와 89.60 kcal/kWh의 (+)값을 보이고 있는 것으로 보아 실제 운전성능이 기대 성능보다 크게 열화된 상태에서 운전되고 있음을 알 수 있다. 불명분 열소비율

은 기대 열소비율과 실제 열소비율의 차이를 각 구성기기(가스터빈, 증기터빈, 배열회수보일러, 복수기)로 분담시키고 남은 미확인 열소비율을 불분명(unaccounted) 손실로 정량화 하였다.

본 경우에 증기터빈 사이클(복수기, 증기터빈)에서 상당량의 열소비율 손실이 발생되고 있으며, 이는 전체 열소비율 손실 중 약 87%에 해당하였다. 따라서 발전소 운전요원이나 보수요원은 증기터빈 사이클 성능에 영향을 주는 인자를 점검하여 이를 조치함으로써 전체 발전소의 열화원인을 제거하여야 한다. 증기터빈 사이클 성능에 영향을 주는 인자는 크게 외부적인 영향과 내부적인 영향으로 구분할 수 있으며, 외부적인 영향은 주증기 온도 및 압력, 그리고 복수기 압력이 있으며, 내부적인 영향은 증기터빈 내부의 증기유로와 관련된다.

증기터빈 열소비율 증가 요인을 분석하기 위해 먼저 Fig. 8과 같이 A-복합화력발전소의 정상운전 상태에서의 시간 변화에 따른 증기터빈의 기대 출력과 실제 출력의 변화를 나타내었다. 현재 운전조건에서 증기터빈의 기대 출력은 179.63 MW이나 실제 출력은 140.57 MW로써 성능이 저하된 상태로 운전함을 알 수 있다.

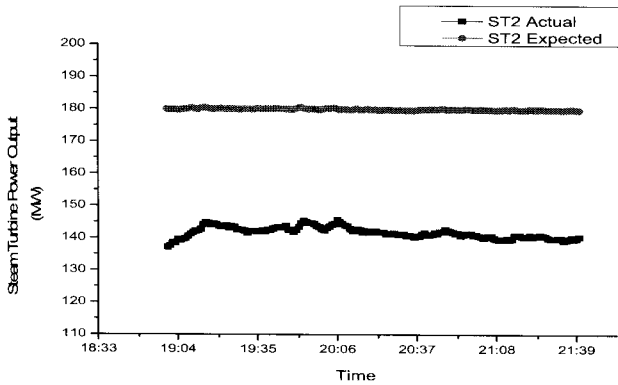


Fig. 8 Comparison of expected and actual steam turbine power

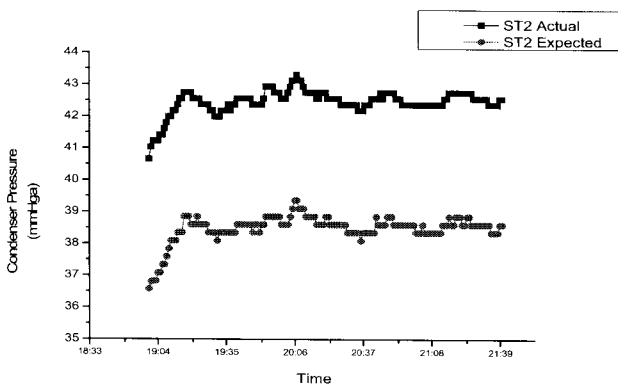


Fig. 9 Comparison of expected and actual condenser pressure

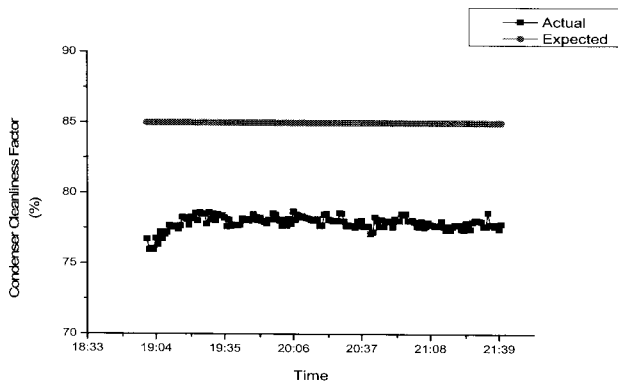


Fig. 10 Comparison of expected and actual condenser cleanliness factor

시간변화에 따른 복수기 압력의 기대치와 실제치의 변화를 나타내면 Fig. 9와 같다. 복수기 성능은 증기터빈 출력에 가장 큰 영향을 미치며, 중요한 파라미터가 복수기 압력이다. 모델에서 계산된 복수기 압력의 기대치는 38.50 mmHg이고 실제치는 42.46 mmHg로써 3.96 mmHg 만큼 높은 압력에서 운

전되고 있었다. 여기서 증기터빈 사이클의 손실은 복수기에 기인하며 이로 인해 증기터빈의 기대 출력과 실제 출력의 차이가 발생함을 알 수 있다. 더 나아가 복수기 압력의 열화원인을 파악하기 위해 관련 파라미터인 청결도(12)를 조사하였다. Fig. 10과 같이 설계치와 실제치의 차이를 비교하고 복수기가 오염된 상태로 운전됨을 알 수 있었다.

결과적으로 증기터빈 사이클의 열소비율 손실의 원인은 복수기 열화에 기인하며 복수기의 청결도가 낮음에 의해 복수기의 실제 압력이 기대 압력보다 높은 상태에서 운전되는 것이 주 원인임을 규명하였다.

4. 결 론

복합발전 성능감시시스템은 운전 중 온라인 방법을 통해 실시간으로 전체 발전소 및 단위설비의 운전성능 감시 및 진단 결과를 제공할 수 있으므로 복합화력발전소의 실시간 성능평가, 성능열화 감시 및 성능향상 방안을 제시한다. 본 논문에서는 성능감시 정량화 기법의 한가지인 열소비율 손실분담 기법을 A-복합화력발전소에 적용하였으며 고찰을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 현재 운전조건에서의 실제 열소비율과 기대 열소비율을 정량적으로 계산하여 손실분을 발전시스템의 주요 구성기기인 가스터빈, 배열회수보일러, 증기터빈, 복수기로 분담시켜 각각의 손실발생 원인을 규명하였다. 본 기법을 통해 종래의 오프라인 방식이나 수동으로 발전소 운전성능을 평가하는 방식에서 온라인 실시간 방식으로 성능열화를 지속적으로 감시할 수 있으므로 종래의 주기적인 정비방식에서 벗어나 최적의 정비시점을 결정할 수 있는 성능관리지표로서 활용할 수 있다.

후 기

본 논문은 지식경제부가 지원하고 있는 신재생에너지 기술 개발사업을 통한 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) 한국전력공사, 1986, “복합발전”.
- (2) 한국전력공사, 2009, “에너지원별 발전량”.
- (3) ASME, 1985, “Performance Test Codes: Gas Turbine Power Plant PTC 22,” American Society of Mechanical Engineers.
- (4) ASME, 1981, “Performance Test Codes: Gas Turbine Heat Recovery Steam Generators PTC 4.4,” American Society of Mechanical Engineers.

- (5) ASME, 1976, "Performance Test Codes: Steam Turbines PTC 6," American Society of Mechanical Engineers.
- (6) ASME, 1996, "Performance Test Codes: PTC 46, Overall Plant Performance," American Society of Mechanical Engineers.
- (7) GE Enter Software LLC, 2000, "EfficiencyMap Product Guide".
- (8) General Physics, 2000, "EtaPRO Performance Monitoring Systems Combined Cycle Operation Optimizer," General Physics Corporation.
- (9) S. M. Kim and Y. J. Joo, 2005, "Implementation of on-line performance monitoring system at Seoincheon and Sinincheon combined cycle power plant," Energy 30, pp. 2383-2401.
- (10) OSI Software, Inc., 2001, "PI system User Guide".
- (11) General Physics Corp, 2004, "Technical brief, GP releases Virtual Plant™ thermodynamic modeling framework," General Physics Corporation.
- (12) R.E. Putman, 2001, "Steam surface condensers: Basic principles, performance monitoring and performance," ASME Press, New York.