

복합화력 온라인 성능감시 구현을 위한 열소비율 분담 기법

주용진 · 김시문

한전전력연구원 발전연구실

E-mail : Yongjj@kepri.re.kr

A Technique of the Combined Cycle Heat Rate Allocation for the On-Line Performance Monitoring System

Yong-Jin Joo and Si-Moon Kim

Korea Electric Power Research Institute

요 약

본 논문에서는 복합화력 발전시스템을 대상으로 한 온라인 성능감시시스템에 적용될 수 있는 열소비율 손실 분담기법을 고안하였다. 이 기법은 현재 운전조건에 대한 기대 열소비율을 계산하여 이를 실제 열소비율과 비교하고 이들의 편차, 즉 손실분을 발전시스템 구성기기(가스터빈, 배열회수보일러, 증기터빈, 복수기)로 분담시킴으로써 손실이 어디에서 얼마만큼 발생하는 지를 정량적으로 감지하여 조치할 수 있는 성능관리지표로서 활용된다.

Abstract — A technique of the heat rate allocation was devised to monitor the performance of Combined Cycle Power Plant. 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 (HRSG), steam turbine and condenser. Expected power output is determined by a detailed model and correction curves of the plant.

1. 서 론

복합화력발전은 발전효율이 높고 환경오염물질 배출이 적어 2003년 6월 기준 약 13,618 MW로서 전 발전설비의 25%를 점유할 정도로 국내 발전설비에서 차지하는 비중이 증대되고 있으며, 국내 전력시장도 자유경쟁에 의한 전력거래 체제로 변화됨에 따라 핵심 경쟁요소인 연료비 및 운전비용절감을 위한 발전소 최적 성능유지에 많은 관심이 집중되고 있다. 이를 위해 발전설비의 최적 운전성능 유지를 위한 노력이 활발히 진행되고 있다.

과거에는 발전소 성능 변화를 파악하기 위해서는 전통적인 방법에 의해 성능시험을 수행하고 ASME PTC Code^{[1][3]}에 의한 성능계산을 통해서만 성능의 변화를 인지할 수 있었다. 이와 같이 실시간으로 성능변화를 감지할 수 없어 성능열화가 발생한 상태에서 운전을 지속

하거나 비효율적인 요소를 포함한 상태에서 운전을 지속하는 일이 빈번히 발생할 수 밖에 없었다. 선진 외국에서는 이미 80년대 초반부터 실시간으로 발전소 운전실측 데이터를 취득하여 발전소의 운전성능평가는 물론 설비의 이상유무 상태를 온라인으로 상시 감시하여 최적조건으로 운전되지 못하는 요인을 조기에 발견하여 해소함으로써 최적의 운전상태를 유지할 수 있는 실시간 발전소 성능감시에 대한 관심이 부각되었으며, 이를 구현하기 위한 종합적인 기술들이 개발되어 왔다^{[4][7]}. 발전소 종합성능에 지대한 영향을 미치는 주요 운전성능 변수 감시에 의한 성능관리 기술에서부터 발전소 성능 문제에 대한 해결책을 제시해주는 전문가 시스템에 이르기까지 점차 지능적인 기술로 진보되고 있다^[8]. 이와 같은 유사 시스템이 최근 상용화되어 여러 회사에서 경쟁적으로 해외 발전소에 설치되고 있으며, 적용된 발전소는 전 세계적으로 수백 개소에 달하고 있다. 특히 미

국에서 성능향상 및 최적화 기술개발의 노력이 활발하여 성능감시 및 최적인전 분야의 기술을 주도하고 있다. 국내에서는 지금까지 실시간 최적 운전성능관리 기술에 대한 관심이 저조하여 선진 외국 기술수준의 기술개발 실적이 전무한 상태이며, 일부 신규 발전소의 주 제어 전산설비에 현재 운전치를 수차나 추이로 표시할 수 있는 정도의 기능을 보유하고 있으나, 이것만으로는 발전소 운전 성능 양호여부를 객관적으로 판단하기에는 어려운 실정이다.

본 논문에서는 복합화력발전소의 성능감시시스템에 적용할 수 있는 열소비율 분담기법을 정식화하였으며, 본 기법을 이용하여 현재 운전조건에서의 실제 열소비율과 기대 열소비율을 정량적으로 계산하여 손실분을 발전시스템 구성기기(가스터빈, 배열회수보일러, 증기터빈, 복수기, 냉각탑)로 분담시킴으로써 비효율적으로 운전되는 기기나 성능열화가 많은 기기를 규명하여 조치함으로써 최적인전성능을 유지할 수 있다.

2. 온라인 성능감시시스템 계층 구조

2-1. 시스템 개요

온라인 성능감시시스템은 실시간으로 방대한 성능변수를 효과적이고 체계적으로 관리하기 위하여 성능정보관리시스템(Performance Information System)을 사용하여 발전소 운전 및 성능데이터를 효과적으로 저장하고 추적할 수 있는 기능을 제공한다. 또한, 발전소 실제 성능계산에 필수적인 유효한 성능변수치를 계산하기 위하여 실제 발전소의 각 설비 및 전체 발전소에 대한 질량 및 에너지 밸런스 식을 구성하고 실측 데이터를 근간으로 밸런스식을 만족하는 유효치를 구하여 성능계산 수행에 사용함으로써 보다 정확한 운전변수 및 성능 분석치를 획득함과 동시에 계측기의 오류여부를 판별하여 오류가 있는 계측기의 교정 필요여부를 파악할 수 있다. 객관적인 발전 운전성능을 파악하기 위해 발전소의 실제성능과 기대성능을 실시간으로 제공할 뿐 아니라 장

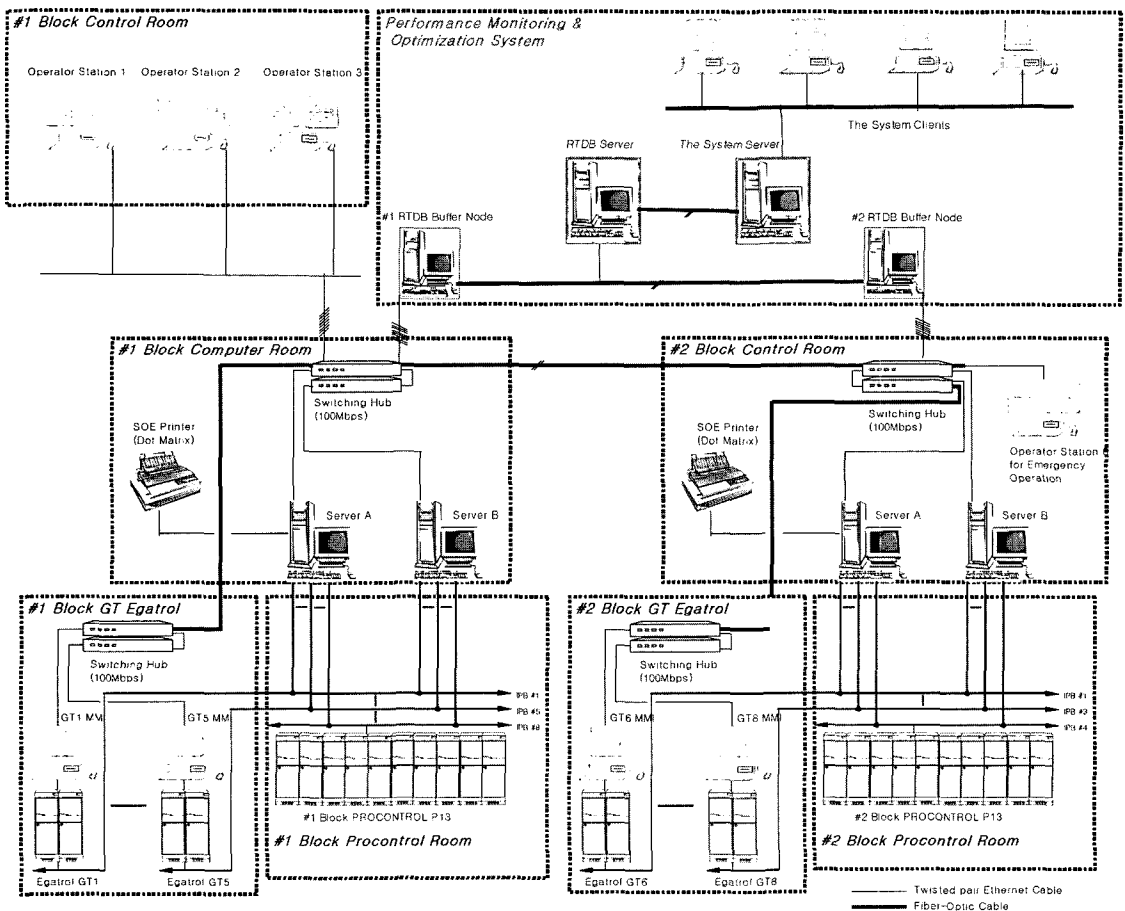


Fig. 1. Configuration of the on-line performance monitoring system for B-CCPP.

기간에 걸친 발전소 성능열화를 파악할 수 있는 정격화산성능변수라고 하는 보조성능지표를 제공할 수 있도록 한다. 보조성능지표의 계산을 위해 기기 공급자가 제공하는 보정곡선, 개발된 상관식 및 기존의 성능분석엔진을 이용하여 성능계산 모델을 구성하며, 개발된 모델을 이용하여 현재 운전조건에서의 정확한 실제성능, 기대성능, 정격화산성능을 계산함으로써 기기의 성능열화 및 전체 발전소의 성능열화를 객관적이고 신속하게 파악할 수 있다.

2-2. 시스템 하드웨어 구성

온라인 성능감시시스템과 B-복합화력발전 분산제어시스템(Distributed Control System; DCS)과의 연계, 그리고 성능감시 시스템이 탑재된 서버 및 버퍼노드 PC의 하드웨어 구성을 Fig. 1에 나타내었다.

본 시스템의 대상발전소인 B-복합화력의 분산제어시스템 구성은 그림에서 보는 바와 같이 각 블록별로 각각 2대의 OPC(OLE for Process Control) 서버를 가지고 있으며, 이 OPC 서버와 성능감시시스템 버퍼노드 PC가 연결되어 실시간으로 OPC 서버를 통한 현장 실측 데이터를 취득하는 구성이다. 성능감시 시스템 서버와 발전소 분산제어시스템 사이에 버퍼노드를 설치함으로써

서버의 이용불능이나 보수시 자동으로 실측 데이터의 버퍼링을 수행하도록 하여 운전 데이터의 손실을 최소화할 수 있도록 구성하였다.

2-3. 시스템 소프트웨어 계층 구조

복합화력 온라인 성능감시시스템은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 크게 5개의 계층¹⁹⁾으로 구성되어 있고, 각 계층은 독립적인 기능을 수행하거나 서로 유기적으로 연계되어 순차적 기능을 수행한다.

구성계층은 발전소 분산제어시스템(1), 데이터 취득 및 저장계층(2), 온라인 프로세서 제어관리계층(3), 성능분석 및 진단모듈계층(4), 그리고 다양한 성능정보 결과를 제공하는 그래픽 사용자 인터페이스(GUI) 계층(5)으로 구성된다. 전체 계산 흐름은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 온라인 성능감시의 대상이 되는 복합화력 주요 구성설비의 현재 실측값을 제어하는 발전소 분산제어시스템으로부터 온라인 실시간으로 성능감시 및 진단에 필요한 실측값을 취득한다. 온라인 플랫폼역할을 담당하는 데이터 취득 및 저장계층은 발전소 분산제어시스템으로부터 실시간으로 취득된 실측 데이터를 저장하거나 각종 성능감시관련 모듈의 성능분석 및 계산에 필요한 데이터를 제공하는 기능을 수행한다. 또한, 방대한 발전소 성능테

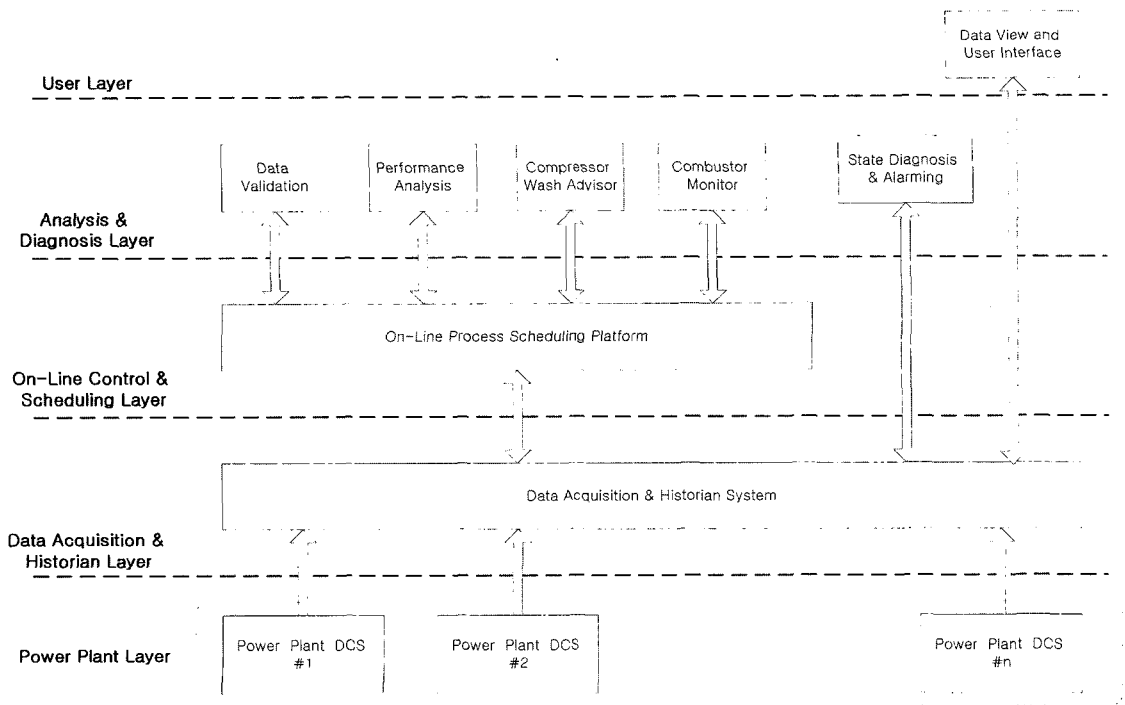


Fig. 2. The system layer overview.

이터를 효과적으로 저장하고 추적할 수 있는 기능을 제공하고, 과거 운전 데이터를 불러볼 수 있어 현재 운전 데이터와 비교함으로써 성능열화 등을 파악할 수 있는 실시간 데이터 관리기능을 수행한다.

다음으로 온라인 프로세서 제어관리 계층에서는 유효 데이터를 생성하기 위한 열정산모델이나 성능분석에 필요한 모델을 불러오며, 각종 성능분석 및 진단관련 모듈로부터 요구되는 데이터 및 데이터형식, 프로세서관리 및 연결된 프로세서 우선순위관리 등의 기능을 담당한다.

성능감시 시스템에서 가장 중요한 역할을 수행하는 성능분석 및 진단 모듈은 성능감시에 필요한 각종 성능계산 및 진단 전문가모듈 등이 위치하며 실측데이터를 기준으로 각종 성능분석결과를 제공한다. 이러한 일련의 모든 분석모듈의 결과들은 데이터 통신채널을 통하여 다시 데이터 취득/저장모듈로 보내지고 저장됨으로서 자동으로 발전소 성능정보의 구축이 이루어지며, 향후 과거 운전 데이터의 열람이나 성능보고서 작성시에도 편리하게 성능정보를 추출하여 사용할 수 있도록 한다.

다양한 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 통해 각종 그래프나 프로세스 다이어그램으로 성능상태 화면 및 성능보고서를 제공함으로써 발전소 성능정보에 대한 이해를 돕고 사용자 편의성이 우수한 시스템을 구현한다.

3. 열소비율 손실분담 기법의 정식화

전체 발전소를 구성하는 주요 구성기기의 비효율적인 요소에 의해 추가적으로 발생하는 운전비용의 증가, 즉 연료비의 증가는 발전소 운전성능의 판단지표로 사용되는 열소비율을 통해 확인할 수 있다. 열소비율은 단위 전력을 생산하기 위해 투입되는 연료에너지의 비로서 효율의 반대개념을 갖는다. 주어진 운전조건에서 모든 구성기기가 최적의 성능에서 운전될 경우 열소비율은 최소가 되며 그때의 열소비율을 기대 열소비율(expected heat rate)이라 할 수 있다. 그러나 모든 기기가 항상 최적의 성능으로 운전될 수 없으며 비효율적 운전요소 및 성능열화에 의해 동일 출력을 생산하기 위해서는 추가적인 연료의 투입이 요구된다. 이와 같이 현재의 운전 상태 및 기기상태가 반영된 열소비율을 실제열소비율(actual heat rate)이라 정의할 수 있다.

실제값(ACT)은 발전소에서 실측된 운전데이터를 이용하여 구한 성능치를 의미하며, 기대값(EXP)은 발전플랜트 전용 시뮬레이션 코드인 Virtual Plant™¹¹⁰를 사용하여 각종 설계치 및 기기의 보정곡선을 기반으로 구성된 모델에서 현재 운전조건(부하, 대기온도, 대기압, 상대습도 등)을 기준으로 계산된 값을 의미한다.

열소비율 분담기법이란 전체 발전소에 대한 실제 열소비율과 기대열소비율의 편차를 구하고 이를 다시 단위 구성기기별로 할당함으로써 어느 기기가 현재 비효율적으로 운전되는지 규명하고 열소비율을 편차가 큰 기기에 대해 보다 정밀한 검사를 통해 비효율적인 요소를 제거하여 최적의 성능으로 발전소를 운영할 수 있도록 하기 위함이다.

3-1. 출력, 열소비율, 효율 관계식

열소비율 손실분담 기법을 유도하기 위한 대상설비의 예로 3×3×1 구성되어 있는 복합화력발전소, 즉 3대의 가스터빈(GT)과 3대의 배열회수보일러(HRSG) 그리고 1대의 증기터빈(ST)으로 구성되어 있는 설비를 고려하였다. 복합화력 발전시스템에서의 에너지 흐름을 Fig. 3과 같이 도시하여 출력, 열소비율, 효율간의 상관관계를 이해하고 관계식을 유도할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시스템에 투입되는 열입력은 연료가 갖는 에너지이며 각 기기별로 에너지의 입출력을 나타낼 수 있다. 열소비율 분담식을 유도하기 위해 고려한 시스템에서 발생하는 총출력은 3대의 가스터빈 출력과 1대의 증기터빈의 출력의 합으로 식(1)과 표현할 수 있다.

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

그리고 Fig. 3에 도시한 바와 같이 식(1)은 가스터빈으로 유입되는 연료에너지와 각 구성기기의 효율로서 표현하면 식(1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다. 여기서 F는 가스터빈에 공급되는 연료에 의한 입열량(kJ/h)을 의미하며, 연료 입열량은 연료의 발열량과 공급연료유량의 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 복합화력 시스템의 열소비율은 투입된 연료에너지와 총 출력의 향으로 다음 같이 표현할 수 있다.

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

전체 복합발전시스템의 효율은 열소비율의 역수관계에 있고, 전체 복합시스템의 열소비율 식(3)을 이용하여 나

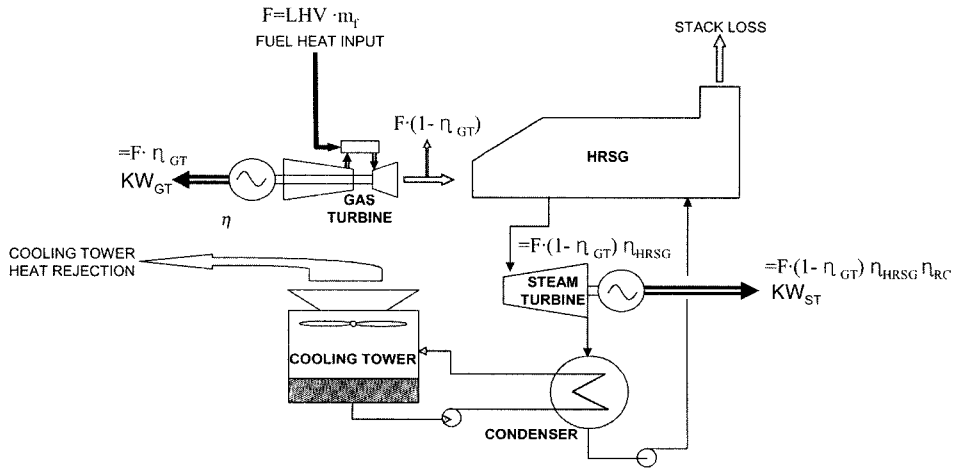


Fig. 3. Conceptual diagram of the energy stream for combined cycle power plant.

타내면 다음과 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(HRSG) 및 증기터빈사이클의 함수임을 알 수 있다. 따라서 이들 해당기기의 성능변화에 의한 전체 발전소 효율 및 열소비율에 미치는 영향을 유도할 수 있다.

3-2. 가스터빈에서의 열소비율 손실분담

전체 열소비율 손실중 가스터빈 단위 기기성능이 열소비율에 미치는 영향을 수학적으로 유도하여 이를 성능감시시스템에 적용하고자 한다. 가스터빈은 크게 압축기, 연소기 및 터빈으로 구성되나 앞서 언급한 바와 같이 전체 발전소 열소비율의 편차가 발전소 주요 구성기기별로 어떻게 발생하는지를 규명하는 것이 본 논문의 주된 관심이라 할 수 있어 일단 주요 구성기기별로 발생하는 열소비율의 편차를 규명하고 해당 기기에서 발생하는 열소비율의 편차는 해당 기기의 운전 변수들이 기대치와 현재치의 편차를 세부적으로 분석하여 규명될 수 있다.

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

$$\frac{\partial \eta_{CC}}{\partial \eta_{GTj}} = \frac{F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} (1 - \eta_{RC} \cdot \eta_{HRSGj})$$

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

j번째 가스터빈의 성능변화가 전체 복합화력의 효율 및 열소비율에 미치는 영향은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \eta_{CC} = \eta_{CC,EXP} - \eta_{CC,ACT}$$

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

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

HR_{ACT} 는 현재 운전조건에서 실제 계측기로부터 계측되는 연료유입량, 발열량, 출력을 이용하여 계산되는 열소비율이고, HR_{EXP} 는 기대 열소비율로서 기기성능이 제작사 사양을 기준으로 계산하거나 계획예방정비 직후의 기기의 성능이 최상일 경우 현재 발전소 운전조건(부하 조건, 대기조건)에서 발전시스템이 발휘할 수 있는 최소 열소비율이다. 그러므로 HR_{ACT} 와 HR_{EXP} 와의 차가 (+) 값이면 이는 해당 가스터빈이 최적으로 운전되지 못함에 의해 발생하는 손실을 의미한다.

3.3. HRSG에서의 열소비율 손실분담

각 HRSG의 성능이 전체 발전시스템 열소비율에 미

치는 영향을 정량화하기 위해 가스터빈에서 유도한 방법과 유사하게 유도하면 식(8)과 같다.

$$\frac{\partial \eta_{CC}}{\partial \eta_{HRSGj}} = \frac{F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} \cdot \eta_{RC}(1 - \eta_{GTj})$$

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

위의 식(8)과 식(6)을 이용하여 다시 쓰면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$HR_{ACT} - HR_{EXP|HRSGj} = HR_{EXP}$$

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

3-4. 증기터빈 사이클에서의 열소비를 손실분담

증기터빈사이클(Rankine Cycle)에서 발생하는 열소비의 손실은 앞서 유도한 방식과 유사하게 유도될 수 있다. 그러나 증기터빈사이클은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 증기터빈, 복수기 및 냉각탑으로 구성되어 있다. 따라서 증기터빈사이클에 의한 열소비를 분담식을 먼저 유도하고 구성기기별 성능변화에 의해 증기터빈 사이클의 열소비에 미치는 영향을 더 세분화할 필요가 있다. 증기터빈사이클에 의한 열소비를 분담식은 다음과 같이 유도될 수 있다.

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

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

위의 식(10)과 식(6)을 이용하여 다시 쓰면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$HR_{ACT} - HR_{EXP|RC} = HR_{EXP}$$

$$\cdot HR_{ACT} \frac{\sum_{i=1}^3 (1 - \eta_{GTi}) \cdot \eta_{HRSGi} \cdot F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} (\eta_{RC,EXP} - \eta_{RC,ACT}) \quad (11)$$

먼저 복수기의 성능변화에 의한 증기터빈사이클에 미치는 열소비를 영향을 살펴보면, 증기터빈사이클의 성능, 즉 출력은 복수기의 배압에 의해 크게 영향을 받는다. 그러므로 증기터빈사이클의 효율 및 열소비는 복수기에 공급되는 냉각수의 실제온도를 기준으로 해서 복수기의 실제 배압과 실제온도에서 기대되는 복수기의 배압의 차이에 의해 발생된다. 따라서 위의 증기터빈사이클의 열소비를 분담식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$HR_{ACT} - HR_{EXP|Cond} = HR_{EXP}$$

$$\cdot HR_{ACT} \frac{\sum_{i=1}^3 (1 - \eta_{GTi}) \cdot \eta_{HRSGi} \cdot F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} (\eta_{RC,EE} - \eta_{RC,EA}) \quad (12)$$

다음으로 냉각탑(cooling tower)의 성능이 열소비에 미치는 영향은 복수기에 공급되는 냉각수의 실제온도와 기대온도의 차이에 의해 발생된다. 다시 말해, 냉각탑은 현재 대기온도에 대해 냉각탑의 성능에 따라 복수기로 공급되는 냉각수의 온도에 차이가 발생되고 이는 복수기의 배압에 직접적인 영향을 미치기 때문이다.

$$HR_{ACT} - HR_{EXP|CT} = HR_{EXP}$$

$$\cdot HR_{ACT} \frac{\sum_{i=1}^3 (1 - \eta_{GTi}) \cdot \eta_{HRSGi} \cdot F_j}{\sum_{i=1}^3 F_i} (\eta_{RC,EP} - \eta_{RC,EE}) \quad (13)$$

여기서, $\eta_{RC,EP}$ 는 현재 대기조건하에서 냉각탑으로부터 공급되는 냉각수온도 기대치를 기준으로 기대되는 복수기 배압에서의 증기터빈사이클 효율을 의미하고, $\eta_{RC,EE}$ 는 실제 공급되는 냉각수 온도를 기준으로 기대되는 복수기 배압에서의 증기터빈사이클 효율을 각각 의미한다.

3-5. 증기터빈에서의 열소비를 손실분담(HR loss ST)

증기터빈사이클에서 증기터빈에 의한 열소비를 분담은 전체 증기터빈사이클의 열소비를 분담중에 복수기 및 냉각탑에 기인하는 열소비를 편차를 제함으로써 구할 수 있다.

$$HR_{ACT} - HR_{EXP|ST} = (HR_{ACT} - HR_{EXP|RC})$$

$$- (HR_{ACT} - HR_{EXP|Cond}) - (HR_{ACT} - HR_{EXP|CT}) \quad (13)$$

3-6. 열소비를 손실분담 기법 적용결과

본 논문에서 정식화한 열소비를 분담기법을 복합화력 성능감시 시스템에 적용하여 나온 결과를 Fig. 4에 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 출력과 열소비에 대하여 각각 실제치와 기대치를 구하고 편차를 구

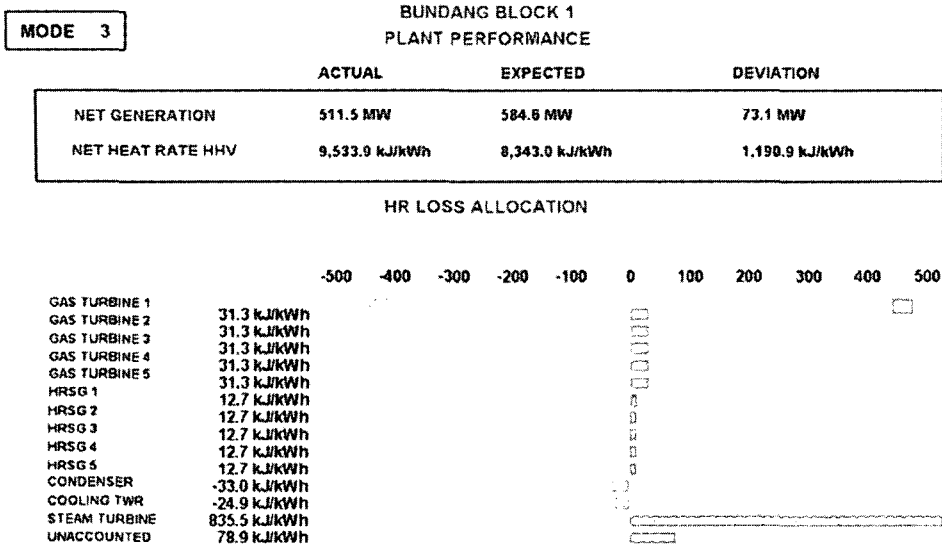


Fig. 4. Typical screen of heat rate loss allocation.

한다. 주어진 현재의 운전조건에서 전체 발전소 열소비율이 실제치가 기대치보다 1,190.9 kJ/kWh 만큼 높게 나타나고 있다. 이는 구성기기에서 발생하는 비효율적 운전요소에 의해 동일 출력을 생산하기 위해 더 많은 연료가 투입되었다는 것을 의미한다. 또한, 전체 열소비율 편차가 각 구성기기별로 얼마만큼 발생하는지 화면 하단에 제시되어 제공되고 있다.

기기별 열소비율 편차는 복수기와 냉각탑을 제외하고는 (+)값을 보이고 있는 것으로 보아 실제 운전성능이 기대 성능보다 나쁘게 운전되고 있음을 알 수 있다. 또한, 복수기와 냉각탑은 (-)값을 보이는데 이는 실제성능이 기대성능보다 우수함을 의미하며, 그 이유는 실제의 복수기 진공도가 설계치보다 낮고, 냉각탑으로 인입되는 냉각수가 설계치보다 다소 낮아 성능의 향상을 가져왔기 때문이다. 그리고 불명분(unaccounted) 열소비율은 발전 사이클의 기대 열소비율과 실제 열소비율의 차이를 각 구성기기(가스터빈, 증기터빈, 복수기 등)로 열소비율을 분담시키고 남은 미확인 손실로 분류될 수 있다.

본 경우에 증기터빈에서 835.5 kJ/kWh 만큼의 열소비율 손실이 발생되고 있으며, 이는 전체 열소비율 손실 중 약 70%에 해당한다. 따라서 발전소 운전원이나 보수요원은 증기터빈 성능에 영향을 주는 인자를 점검하여 이를 조치함으로써 전체 발전소의 열소비율을 향상시킬 수 있다. 증기터빈의 성능에 영향을 주는 인자는 매우 다양하다. 크게 외부적인 영향과 내부적인 영향으로 구분할 수 있으며, 외부적인 영향은 주증기 온도 및 압력, 복수기 배압이 있고 내부적인 영향은 증기터빈 내

부의 증기유로와 주로 관련되어 다양한 형태로 나타난다. 예를 들어 각종 밸브나 배관에서의 증기 누설이나 터빈 노즐 및 블레이드에서의 증기에너지를 기계적 에너지로의 변환에 관련된 손실을 들 수 있다. 터빈 노즐 및 블레이드에서의 부식과 침식에 의해 증기유로의 변형에서 기인할 수도 있으며 노즐과 블레이드에서의 증기의 우회(bypass)에 의해 터빈에서 일로 변환되지 못하는 요인에서 주로 발생된다. 이와 같이 열소비율 손실이 큰 기기에 대해 비효율적 요인을 유발할 수 있는 운전변수별로 면밀히 조사하고 분석해야 최종 성능저하의 원인을 파악할 수 있다.

이와 같이 복합적인 원인에 의해 발생될 수 있는 어떠한 주요 운전변수의 성능저하를 보다 효율적으로 진단하기 위해 성능감시 시스템의 기능중 진단모듈이라는 기능을 제공하고 있다. 진단모듈은 주요 운전변수의 성능변화가 어떠한 운전변수의 변화에 의해 야기될 수 있는지에 대한 진단트리(diagnostic tree)구조로 만들어 제공되고 있으며, 이러한 진단트리의 구축은 해당 발전소 별로 구성설비나 운전특성이 다르므로 해당 발전소에 맞게 맞춤형으로 구축되어야한다. 다시 말해 수년간에 걸친 실제 해당발전소의 운전 및 보수경험을 바탕으로 구축되어야 하므로 지속적인 지식기반(knowledge base)을 요구한다고 할 수 있다.

4. 결 론

복합화력용 온라인 성능감시 시스템은 운전 중 온라

인 방법을 통해 실시간으로 전체 발전소 및 단위설비의 운전성능 감시 및 진단 결과를 제공할 수 있어 복합화력 발전설비의 실시간 성능평가, 성능열화 감시 및 성능향상 방안을 제시할 수 있다. 종래의 오프라인 방식이나 수동으로 발전소 운전성능을 평가하는 방식에서 온라인 실시간 방식으로 전환함에 따라 성능열화를 지속적으로 감시할 수 있어 설비 결함을 조기에 발견하여 조치함으로써 설비의 성능열화를 최소화할 수 있고, 체계적이고 신속한 설비 성능평가가 가능하여 설비의 건전성 확보는 물론 설비운전 효율을 최적으로 유지시킬 수 있다.

발전소 운영의 최종목표인 열소비를 최소화지를 위하여 성능감시 시스템에 적용될 수 있는 열소비를 분담기법을 복합화력 설비를 대상으로 정립하였다. 열소비를 분담기법은 발전소 전체 열소비에 대한 기대치와 실제치와의 차이를 계산하고 나아가 이들의 열소비를 편차를 발전소 시스템의 주요 구성기기 즉, 가스터빈, 배열회수보일러, 증기터빈, 복수기, 냉각탑으로 분담시킴으로써 손실발생을 구성기기별로 할당할 수 있어 성능열화 발생시 종래의 시행착오 방법에 의한 진단에서 벗어나 선진 정비구현에 기여할 수 있다. 향후 구성기기별 열소비를 편차에 대한 최종 원인분석을 위해 앞서 언급한 진단모듈의 지속적인 보완이 필요할 것으로 사료된다.

사용기호

kW : power output [kW]
 F : fuel heat input [kJ/h]
 HR : heat rate [kJ/kWh]
 η : efficiency
 $\eta_{RC, EP}$: Rankine cycle expected efficiency at expected condenser pressure for predicted cooling water cold water temperature
 $\eta_{RC, EE}$: Rankine cycle expected efficiency at expected condenser pressure for actual cooling water cold water temperature
 $\eta_{RC, EA}$: Rankine cycle expected efficiency at actual condenser pressure for actual cooling water cold water temperature
 $\eta_{RC, EXP}$: Rankine cycle efficiency expected
 $\eta_{RC, ACT}$: Rankine cycle efficiency actual

하첨자

GT : gas turbine

HRSG: heat recovery steam generator

RC : Rankine cycle

TOT : total

ACT : actual

EXP : expected

1 : unit 1 component

2 : unit 2 component

3 : unit 3 component

참고문헌

1. ASME, Performance Test Codes: Gas Turbine Power Plant PTC22, American Society of Mechanical Engineers (1985).
2. ASME, Performance Test Codes: Gas Turbine Heat Recovery Steam Generators PTC4.4, American Society of Mechanical Engineers (1981).
3. ASME, Performance Test Codes: Steam Turbines PTC6, American Society of Mechanical Engineers (1976).
4. GE Enter Software LLC, Heat Balance Simulation Software for Performance Monitoring & Optimization of Combined Cycle & Cogeneration Power Plant. GE Power System Company (2000).
5. Greg C. Alder, PMAX Performance Maximization On-Line Thermal Performance Monitoring (for Combined Cycle and Gas Turbine Application). ScienTech, Inc. (2000).
6. ABB, OPTIMAX Product Guide. Asea Brown Boveri (2000).
7. McHale, Thermal Economic Monitoring and Performance Optimizer (TEMPO) System. Mchale and Associates Inc. (2001).
8. General Physics, EtaPRO Performance Monitoring Systems Combined Cycle Operation Optimizer. General Physics Corporation (2000).
9. Kim, S.M.: "The Development of On-line Performance Monitoring System For S-Combined Cycle Power Plant", Proceedings of the KAMES, 2558 (2002).
10. General Physics, Virtual Plant. General Physics Corporation (2003).