

복합화력 실시간 성능감시 시스템에 열소비율 분담 기법 적용

김시문 · 주용진
한전전력연구원

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

Kim Si Moon · Joo Yong Jin
Korea Electric Power Research Institute

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 성능 유지에 많은 관심이 집중되고 있다. 이를 도모하기 위해 발전설비의 최적 운전성능 유지를 위한 노력이 활발히 진행되고 있다.

선진 외국에서는 이미 80년대 초반부터 실시간 발전소 성능감시에 대한 관심이 부각되었으며, 이를 구현하기 위한 종합적인 기술들이 개발되어 왔다. 발전소 종합성능에 지대한 영향을 미치는 주요 운전성능변수 감시에 의한 성능관리 기술에서부터 발전소 성능문제에 대한 해결책을 제시해주는 전문가 시스템에 이르기까지 점차 지능적인 기술로 진보되고 있다. 이와 같은 유사 시스템이 최근 상용화되어 여러 회사에서 경쟁적으로 해외 발전소에 설치되고 있으며, 적용된 발전소는 전 세계적으로 수백 개소에 달하고 있다. 특히 미국에서 성능향상 및 최적화 기술개발의 노력이 활발하여 성능감시 및 최적운전 분야의 기술을 주도하고 있다. 국내에서는 지금까지 실시간 최적 운전성능관리 기술에 대한 관심이 저조하여 선진 외국 기술수준의 기술개발 실적이 전무한 상태이다. 일부 신규 발전소의 주체어 전산설비에 현재 운전치를 수치나 추이로 표시할 수 있는 정도의 기능을 보유하고 있으나, 이것만으로는 발전소 운전성능 양호여부를 객관적으로 판단하기에는 어려운 실정이다.

온라인 성능감시 시스템은 실시간으로 발전소 운전 실측 데이터를 취득하여 현재 운전조건에서 전체 발전소 및 각 구성기기의 성능계산을 수행하고 이 계산결과에 근거하여 성능열화를 규명하게 된다. 본 논문에서는 복합화력발전소의 성능감시시스템 개발에 있어 가장 중요하고 선행되어야 하는 성능관리지표로서 열소비율 분담 기법을 고안하였다. 이 기법은 현재 운전조건에 대한 기대 열소비율을 계산하여 이를 실제 열소비율과 비교하고 이들의 편차, 즉 손실분을 발전시스템 구성기기(가스터빈, 배열회수보일러, 증기터빈, 복수기, 냉각탑)로 분담시킴으로써 손실이 어디에서 얼마만큼 발생하는지를 정량적으로 감지하여 조치할 수 있는 지표로서 활용된다.

2. 열소비율 손실분담 기법의 정식화

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 경우, 기대 열소비율과 실제 열소비율의 차이, 즉 열소비율 손실을 구성기기로 분담시켜 손실이 어디에서 얼마만큼 발생하는지를 감지함으로써 손실발생 원인의 규명자료로 사용하고자 한다.

2-1. 출력, 열소비율, 효율 관계식 유도

복합화력 발전시스템에서의 에너지 흐름을 Fig. 1과 같이 도시하여 출력, 열소비율, 효율 간의 상관관계를 이해하고 관계식을 유도하는데 이용하고자 한다.

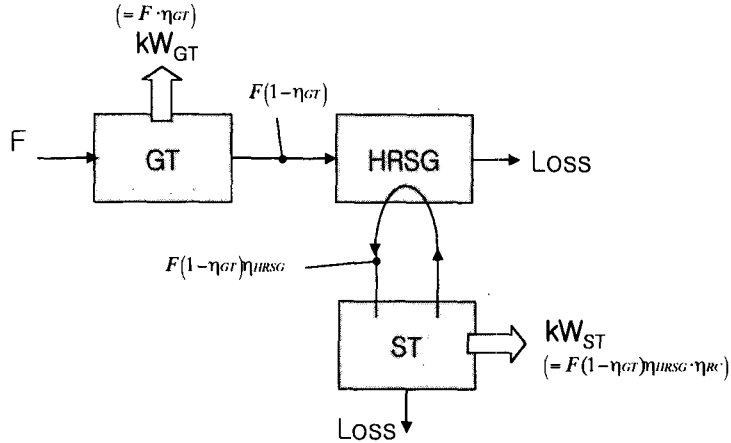


Fig. 1 Conceptual Diagram of the Energy Stream for Combined Cycle Power Plant

총출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

그리고 이를 가스터빈으로 유입되는 연료에너지와 각 구성기기의 효율로서 표현하면 다음과 같다. 여기서 F 는 가스터빈에 공급되는 연료에 의한 입열량[kJ/h]을 의미하며, 연료입열량은 연료의 발열량과 공급연료유량의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\square W_{TOT} = \frac{F_1 \eta_{GT1} + F_2 \eta_{GT2} + F_3 \eta_{GT} + [F_1(1-\eta_{GT1})\eta_{HRSG1} + F_2(1-\eta_{GT2})\eta_{HRSG2} + F_3(1-\eta_{GT3})\eta_{HRSG3}]\square \eta_{ST}}{3600} \quad (2)$$

열소비율은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} HR &= \frac{F_{TOT}}{\square W_{GT,TOT} + \square W_{ST}} \\ &= \frac{3600(F_1 + F_2 + F_3)}{F_1 \eta_{GT1} + F_2 \eta_{GT2} + F_3 \eta_{GT} + [F_1(1-\eta_{GT1})\eta_{HRSG1} + F_2(1-\eta_{GT2})\eta_{HRSG2} + F_3(1-\eta_{GT3})\eta_{HRSG3}]\square \eta_{ST}} \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서 3대의 가스터빈에 각각 유입되는 연료의 입열량 비를 x , y , z 라 하면, 식(3)은 식(4)과 같은 형태로 표시할 수 있다.

$$HR = \frac{3600(\square + \square + \square)}{(\square \eta_{GT1} + \square \eta_{GT2} + \square \eta_{GT}) + [\square(1-\eta_{GT1})\eta_{HRSG1} + \square(1-\eta_{GT2})\eta_{HRSG2} + \square(1-\eta_{GT3})\eta_{HRSG3}]\square \eta_{ST}} \quad (4)$$

전체 복합발전시스템의 효율은 열소비율의 역수관계에 있고, 전체 복합시스템의 열소비율 식을 이용하여 정리하며 식(5)과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_{00} = \frac{3600}{HR} = \frac{\eta_{GT1} + \eta_{GT2} + \eta_{GT3} + [\eta(1 - \eta_{GT1})\eta_{HRSG1} + \eta(1 - \eta_{GT2})\eta_{HRSG2} + \eta(1 - \eta_{GT3})\eta_{HRSG3}]\eta_{RC}}{\eta + \eta + \eta} \quad (5)$$

복합화력 시스템중 증기터빈 사이클에 대한 랭킨 사이클 효율은 복합화력 효율식인 식(6)으로부터 식(7)과 같이 유도될 수 있다.

$$\eta_{00} = \eta_{GT} + \eta_{HRSG}\eta_{RC} - \eta_{GT}\eta_{HRSG}\eta_{RC} \quad (6)$$

$$\eta_{RC} = \frac{(\eta + \eta + \eta)\eta_{00} - (\eta_{GT1} + \eta_{GT2} + \eta_{GT3})}{\eta(1 - \eta_{GT1})\eta_{HRSG1} + \eta(1 - \eta_{GT2})\eta_{HRSG2} + \eta(1 - \eta_{GT3})\eta_{HRSG3}} \quad (7)$$

2-2. 가스터빈에서의 열소비율 손실분담 (HR loss GT)

전체 열소비율 손실을 가스터빈 단위 기기성능이 열소비율에 미치는 영향을 수학적으로 유도하여 이를 성능감시시스템에 적용하고자 한다. 전체 열소비율 중 가스터빈 1호기에 의해 발생하는 열소비율 손실분담을 구하기 위해 복합화력 전체 효율을 표기한 식(5)을 가스터빈 1호기에 대하여 편미분하고 이를 정리하면 식(8)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \eta_{00}}{\partial \eta_{GT1}} = \frac{\eta - \eta_{HRSG1}\eta_{RC}}{\eta + \eta + \eta} \Rightarrow \Delta\eta_{00} = \frac{\eta(1 - \eta_{HRSG1}\eta_{RC})}{\eta + \eta + \eta} \Delta\eta_{GT1}$$

$$\Delta\eta_{00} = \eta_{ACT} - \eta_{EXP} = \frac{3600}{HR_{ACT}} - \frac{3600}{HR_{EXP}} = \frac{3600(HR_{EXP} - HR_{ACT})}{HR_{ACT}\eta + HR_{EXP}}$$

$$HR_{ACT} - HR_{EXP} = -\frac{\Delta\eta_{00} HR_{ACT}\eta + HR_{EXP}}{3600}$$

$$HR_{ACT} - HR_{EXP}|_{GT1} = -\frac{\eta(1 - \eta_{HRSG1}\eta_{RC})\Delta\eta_{GT1}\eta + HR_{ACT}\eta + HR_{EXP}}{(\eta + \eta + \eta)\eta + 3600}$$

$$= \frac{\eta(1 - \eta_{HRSG1}\eta_{RC})(\eta_{GT1,EXP} - \eta_{GT1,ACT})HR_{ACT}\eta + HR_{EXP}}{3600(\eta + \eta + \eta)} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \Delta\eta_{GT1} = \eta_{GT1,ACT} - \eta_{GT1,EXP}$$

$$\eta + \eta + \eta =$$

HR_{ACT}는 실제 계측기에서 계측되는 연료유입량, 발열량, 출력을 이용하여 계산되는 실제 열소비율이고, HR_{EXP}는 기대 열소비율로서 기기성능이 제작사 사양을 만족한다고 가정할 경우 현재 발전소 운전조건에서 발전시스템이 발휘할 수 있는 최소 열소비율이다. 그러므로 HR_{ACT}와 HR_{EXP}와의 차가 (+) 값이면 이는 해당 호기가 최적으로 운전되지 못함에 의해 발생하는 손실을 의미한다. 나머지 가스터빈 2, 3호기의 성능에 기인한 열소비율 분담도 같은 방법으로 유도할 수 있다.

2-3. HRSG에서의 열소비율 손실분담 (HR loss HRSG)

각 HRSG의 성능이 전체 발전시스템 열소비율에 미치는 영향을 정량화하기 위해 가스터빈에서 유도한 방법과 유사하게 유도하면 식(9)과 같다.

$$\begin{aligned}
HR_{ACT} - HR_{EXP}|_{HRSC} &= - \frac{\Delta\eta_{00} HR_{ACT} \square HR_{EXP}}{3600} \\
&= \frac{\square (1 - \eta_{GT1}) \eta_{RC} (\eta_{HRSG1, EXP} - \eta_{HRSG1, ACT}) HR_{ACT} \square HR_{EXP}}{3600 (\square + \square + \square)} \quad (9)
\end{aligned}$$

2-4 복수기에서의 열소비율 손실분담 (HR loss Cond)

복수기는 랭킨사이클을 구성하는 주요 구성기기 중 하나로서, 이의 성능은 복수기 배압에 의해 크게 영향을 받는다. 그러므로 복수기 성능이 열소비율에 미치는 영향을 수식화하는 것은 즉 배압이 열소비율에 미치는 영향과 같은 의미를 가진다. 다음 식(10)과 같이 실제 열소비율과 기대 열소비율의 차를 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\frac{\square \eta_{00}}{\square \eta_{RC}} &= \frac{\square (1 - \eta_{GT1}) \eta_{HRSG1} + \square (1 - \eta_{GT2}) \eta_{HRSG2} + \square (1 - \eta_{GT3}) \eta_{HRSG3}}{\square + \square + \square} \\
&\rightarrow \Delta\eta_{00} \square \frac{[\square (1 - \eta_{GT1}) \eta_{HRSG1} + \square (1 - \eta_{GT2}) \eta_{HRSG2} + \square (1 - \eta_{GT3}) \eta_{HRSG3}] \Delta\eta_{RC}}{\square + \square + \square} \\
HR_{ACT} - HP_{EXP}|_{COND} &= - \frac{\Delta\eta_{00} HR_{ACT} \square HR_{EXP}}{3600} \\
&= [\square (1 - \eta_{GT1}) \eta_{HRSG1} + \square (1 - \eta_{GT2}) \eta_{HRSG2} + \square (1 - \eta_{GT3}) \eta_{HRSG3}] (\eta_{RC, \square} - \eta_{RC, 00}) HR_{ACT} \square HR_{EXP} \quad (10)
\end{aligned}$$

2-5 증기터빈에서의 열소비율 손실분담 (HR loss ST)

랭킨사이클로의 열소비율 분담은 증기터빈, 복수기로의 분담을 의미한다. 복수기로 유입되는 순환수 실제 온도를 기준으로 해서 복수기 실제 배압에 대한 기대 배압에 따른 전체 열소비율의 %변화를 압축기 압력 보정곡선을 이용하여 계산할 수 있다. 랭킨사이클 열소비율 1% 변화에 대한 복합화력 열비소비율 %를 계산한다.

$$HR \text{ loss ST} = HR \text{ loss RC} - HR \text{ loss Cond} \quad (11)$$

즉 증기터빈에서의 열소비율 손실분담을 구하기 위해서는 먼저 HR loss RC 즉, 랭킨사이클 성능이 열소비율에 미치는 영향을 우선 유도하고 앞서 유도한 식(10)을 제함으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
HR_{ACT} - HR_{EXP}|_{RC} &= - \frac{\Delta\eta_{00} HR_{ACT} \square HR_{EXP}}{3600} \\
&= [\square (1 - \eta_{GT1}) \eta_{HRSG1} + \square (1 - \eta_{GT2}) \eta_{HRSG2} + \square (1 - \eta_{GT3}) \eta_{HRSG3}] (\eta_{RC0} - \eta_{RC0}) HR_{ACT} \square HR_{EXP} \quad (12)
\end{aligned}$$

그러므로 HR loss ST =

$$\begin{aligned}
&[\square (1 - \eta_{GT1}) \eta_{HRSG1} + \square (1 - \eta_{GT2}) \eta_{HRSG2} + \square (1 - \eta_{GT3}) \eta_{HRSG3}] (\eta_{RC0} - \eta_{RC0}) HR_{ACT} \square HR_{EXP} \\
&- [\square (1 - \eta_{GT1}) \eta_{HRSG1} + \square (1 - \eta_{GT2}) \eta_{HRSG2} + \square (1 - \eta_{GT3}) \eta_{HRSG3}] (\eta_{RC, \square} - \eta_{RC, 00}) HR_{ACT} \square HR_{EXP} \quad (13)
\end{aligned}$$

2-6 열소비율 손실분담 기법 활용사례

B-복합화력은 본 보고서에서 고안한 열소비율 분담기법을 이용하여 Fig. 2와 같이 화면을 구성하고 실시간으로 열소비율 손실 발생분을 감지하고 이를 세분화하여 분석함으로써 종래의 주기적인 유지보수에서 벗어나 설비의 성능열화 정도에 따른 유지보수 주기를 결정할 수 있어 정비주기의 장기화가 가능하여 정기보수를 위한 발전소 정지 기간의 단축으로 발전설비의 이용을 제고는 물론 유지보수 비용을 절감할 수 있다.

Fig. 2를 상세 분석해 보면, 출력과 열소비율에 대하여 각각 실제치와 기대치를 구하고 이

들의 차이를 구한다. 여기서 열소비율에 대해서, 실제치가 기대치 즉 목표치보다 1,190.9 kJ/kWh 만큼 높으므로 이는 곧 손실을 의미한다. 이 열소비율 손실이 어떤 구성기에서 얼마만큼 유발되는지를 규명하고 이 기기를 집중관리하면 열효율과 경제성을 증대시켜 발전 비용을 절감할 수 있다. 여기서 가장 큰 열소비율 손실을 유발시키는 기기는 증기터빈이며 835.5 kJ/kWh의 열소비율 손실이 발생함을 알 수 있다.

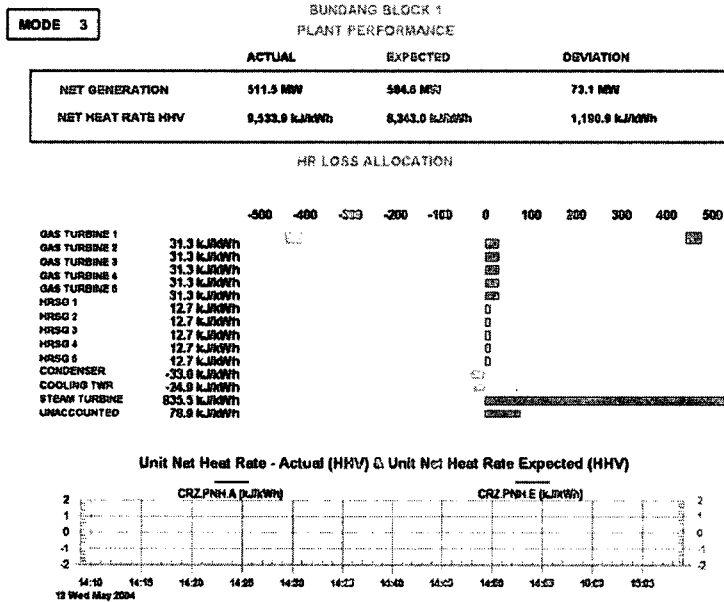


Fig. 2 Screen of the Heat Rate Loss Allocation

3. 결 론

복합화력용 온라인 성능감시 시스템은 운전 중 온라인 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 온라인 성능감시의 최종목표인 열소비율 최소유지를 위하여 열소비율 분담기법을 성능감시 설치 대상 복합화력 설비를 대상으로 정립하여 적용하였다. 열소비율은 발전소 운전 효율 및 운전비용을 정량적으로 평가할 수 있는 중요한 지표이다. 먼저 발전소 전체 열소비율에 대한 기대치와 실제치와의 차이를 계산하고 더 나아가 이들의 열소비율 편차를 발전소 시스템의 주요 구성기기 즉, 가스터빈, 배열회수보일러, 증기터빈, 복수기로 분담시킴으로써 손실이 어디에서 얼마만큼 발생하는지를 정량적으로 감지하여 조치할 수 있는 중요한 성능관리지표로서 활용될 수 있을 것이다.

사용기호

kW : power output [kW]

F : fuel heat input [kJ/h]
 HR : heat rate [kJ/kWh]
 x : fuel gas flow ratio for GT1 ($=\frac{F_1}{F_{tot}}$)
 y : fuel gas flow ratio for GT2 ($=\frac{F_2}{F_{tot}}$)
 z : fuel gas flow ratio for GT3 ($=\frac{F_3}{F_{tot}}$)
 CF_a : correction factor at actual backpressure
 (steam turbine curve for backpressure correction)
 CF_e : correction factor at expected backpressure
 η : thermal efficiency
 η_{RC,r} : Rankine cycle efficiency expected at backpressure reference (heat balances)
 η_{RC,e} : Rankine cycle efficiency expected at backpressure expected [η_{RC,r} · (1+CF_e/100)]
 η_{RC,ea} : Rankine cycle efficiency expected at backpressure actual [η_{RC,r} · (1+CF_a/100)]

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

4. 참고문헌

- [1] P.R. DesJardins, "Improved Power Plant Performance through On-Line Heat Rate Monitoring", GP Corporation Performance Engineering Services. (2000)
- [2] Rodney G, Mark M, Dan D., "Model-Based Performance Monitoring & Optimization", RRG Power Gen (1998)
- [3] GE Enter Software, LLC, "Heat Balance Simulation Software for Performance Monitoring & Optimization of Combined Cycle & Cogeneration Power Plants" (2000)
- [4] GE Enter Software, LLC, "Standard Technical Scope to Supply EfficiencyMap Performance Monitoring & Optimization System for Gas Turbine-Based Generating Plants" (2000)
- [5] Palmer, C. A. and Pechtl, P. A., "GateCycle Performance Analysis of the LM2500 Gas Turbine Utilizing Low Heating Value Fuels, ASME COGEN-TURBO, IGTI-Vol.8. (1993)
- [6] Palmer, C. A. and Erbes, M. R., "Simulation Methods used to Analyze the Performance of the GE PG6541B Gas Turbine Utilizing Low Heating Value Fuels", ASME COGEN-TURBO, October 25-27, Portland, Oregon (1994)
- [7] Witzani, M. and P. Pechtl, "Modeling of Cogeneration Power Plants on Time-Dependent Power Demands of the Consumer", ASME Cogen-Turbo, Vienna, Austria (1995)
- [8] 복합화력 기술자료집, 한국전력공사 발전처 (1995)
- [9] Cohen, H., Rogers, G.F.C., and Saravanamuttoo, H.I.H., "Gas Turbine Theory", Third Edition, Longman Scientific & Technical, Harlow Essex, England, Chapter 8. (1987)