熱交換プロセスのモデルベース性能監視 Based Performance Monitoring of Heat Exchanging Process

学 ○山本 隆弘 (阪府大院)

正 涌井 徹也 (阪府大院)

正 横山 良平 (阪府大院)

Takahiro YAMAMOTO, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka

Tetsuya WAKUI, Ryohei YOKOYAMA, Osaka Prefecture University

1. 緒言

エネルギーの有効利用のため、分散型エネルギーシステムの普及が進んでいるが、人材確保、費用などの問題から大規模集中型システムと同様の運転監視体制を採ることは現実的ではない。各システムで自律的に運転状態や機器性能を監視する必要があると考える。本研究では、分散型エネルギーシステムの自律的な運転監視手法構築の第一段階として、主要構成機器の1つである水蒸気と水との熱交換プロセスを対象に取り上げ、理論モデルに基づくリアルタイム性能監視について検討する。

2. 性能監視手法

対象とする熱交換プロセスにはシェルアンドチューブ式熱交換器を用いる。飽和蒸気が流量調節弁を介してシェル内に流入し、伝熱管内の水により凝縮した後排出される。本研究で構築する性能監視手法の概略図を図1に示す。まず、理論モデルに基づき、入力プロセス値 (PV_{in}^P) から出力プロセス値 (PV_{out}^M)、さらには伝熱性能を表す熱通過率 K_w^M [kW/(m²K)] を推定し、実際の出力プロセス値 (PV_{out}^P) より算出した熱通過率 K_w^P [kW/(m²K)] とリアルタイムで比較する。本来、熱通過率は定常状態に対して適用するものであるが、ここではリアルタイムでの伝熱性能の評価にも用いている。

PV_{in}^P を水蒸気圧力 P_1 [kPa]、水蒸気流量 G_s [kg/h]、水流量 G_c [kg/h]、水入口温度 θ_{c1} [K] とすると、定常状態における出力プロセス値 (PV_{out}^S : シェル内温度 θ_s [K]、水出口温度 θ_{c2} [K]) は、次式の熱収支、伝熱管内の温度分布に関する定常特性式 (SCE) を連立させ、ニュートン-ラフソン法を用いることにより算出できる。

$$G_s \{h''(P_1) - h'(\theta_s)\} = G_c c_p (\theta_{c2} - \theta_{c1}) \quad (1)$$

$$\theta_{c2} = \theta_s - (\theta_s - \theta_{c1}) e^{-\frac{KA}{G_c c_p}} \quad (2)$$

ここで、 A : 伝熱面積 [m²]、 c_p : 水の定圧比熱 [kJ/(kgK)]、 h'' : P_1 における飽和水蒸気の比エンタルピー [kJ/kg]、 h' : シェル内温度における飽和水の比エンタルピー [kJ/kg]、 K : 熱通過率 [kW/(m²K)]。式 (2) における熱通過率は式 (3) で表され、管内、外の熱伝達率は PV_{in}^P と PV_{out}^S より算出する。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{D_i}{2\lambda} \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + \frac{D_i}{\alpha_o D_o}} \quad (3)$$

ここで、 D_i : 伝熱管内径 [m]、 D_o : 伝熱管外径 [m]、 α_i : 管内熱伝達率 [kW/(m²K)]、 α_o : 管外熱伝達率 [kW/(m²K)]、 λ : 伝熱管の熱伝導率 [kW/(mK)]。 PV_{out}^P は PV_{in}^P に対して熱容量、伝熱管内の滞留時間等に起因する遅れを伴う。そこで、式 (1)~式 (3) より算出した PV_{out}^S に動的補償として一次遅れ要素 (FOL: 時定数は伝達関数を導出して周波数特性より算出) を考慮した PV_{out}^M より K_w^M を推定す

る。なお、性能監視に用いる熱通過率は水側の交換熱量より算出する。本研究では、熱交換プロセスの応答速度が緩やかなこと、また、1 s 毎に測定する PV_{in}^P に含まれるノイズの影響を考慮して、 K_w^M と K_w^P の 1 分間単純平均値を比較することで性能監視を行う。また、 K_w^M と K_w^P との差 (絶対値) が 0.15 kW/(m²K) を上回った場合にプロセスの性能が低下したものと判断する。

3. 過度状態における性能監視

まず、定常状態の下で水流量が変化して、熱通過率が低下した場合にプロセスの性能低下を誤検出しないか確認する。さらに、プロセスの異常状態として、ボイラへの供給ラインに設けた脱気装置に不具合が生じ、シェル内に不凝縮性ガスである空気が滞留する場合にも着目する。水流量がステップ状に減少し、その後、シェルへの流入水蒸気に空気が混入した時の K_w^M と K_w^P との差 (絶対値) の時間変化のシミュレーション結果を図2に示す。水流量が減少 (図中の一点鎖線時) により K_w^P が低下するため、 K_w^M と K_w^P との差は過渡的に大きくなるものの、プロセスの応答に応じて小さくなり、3 分後には水流量変化前とほぼ同程度の差に収束する。また、空気混入前には K_w^M と K_w^P の差はほとんど見られないが、空気混入後 (図中の破線時) には K_w^P が低下するために、その差は時間の経過とともに大きくなり、空気混入開始から約 20 分で閾値を越え、その後も大きくなっていくことが分かる。

4. 結言

本研究で構築した性能監視手法により、正常状態でプロセスの運転動作点 (水流量) が変化した場合に性能低下を誤検出することがなく、また、シェル内への空気混入による性能低下を確実に検出できることを明らかにした。

Fig. 1 Outline of performance monitoring

Fig. 2 Numerical result of absolute difference of overall heat transfer coefficients