OS7-06

高湿分空気利用ガスタービン及びプラント加湿装置 過渡応答特性の評価

Dynamics Simulations for An Advanced Humid Air Turbine System and the Humidifier

○正 片桐 幸徳 (日立・電開研) 正 荒木 秀文 (日立・電開研)

正 山岸 雅彦 (日立・電開研) 正 幡宮 重雄 (日立・電開研)

Yukinori KATAGIRI, Power & Industrial Systems R&D Laboratory, Hitachi, Ltd., 7-2-1 Omika-cho Hitachi Ibaraki

Hidefumi ARAKI, Power & Industrial Systems R&D Laboratory, Hitachi, Ltd.

Masahiko YAMAGISHI, Power & Industrial Systems R&D Laboratory, Hitachi, Ltd.

Shigeo HATAMIYA, Power & Industrial Systems R&D Laboratory, Hitachi, Ltd.

The dynamic characteristics of a humidification tower used for the AHAT (Advanced Humid Air Turbine) system were studied. This paper shows the architecture of the humidification tower dynamics model based on simultaneous differential equations considering thermal and material equilibrium of humid-air, feeding water, vessel material, and packing materials.

The paper also compares the calculated values to the experimental values obtained from laboratory-scale experiments. The calculation error margin was 1.9 degrees for air outlet temperature and 5.7% for air outlet absolute humidity.

The dynamical calculation was applied for AHAT demonstration plant. The maximum change rate of absolute humidity at the humidification tower exit for started-up and/or termination was expected to be 8.6%/sec for 30 seconds.

Key Words: Gas Turbine, Humid Air, Saturator, Humidification Tower, Dynamics Simulation

1. 緒言

ガスタービンの燃焼用空気に湿分を添加してタービンの高効率化を図る AHAT (Advanced Humid Air Turbine)⁽¹⁾ システムの研究を進めている。AHAT システムは、1981 年に提案された HAT システム⁽²⁾ 向け圧縮機の中間冷却器を吸気噴霧冷却器に置き換えたもので、ガスタービンの圧力比や燃焼温度の上昇に頼ることなく、システム熱回収の工夫により高い発電効率が得られる点を特徴とする。AHAT 向けガスタービンに関する検討としては、これまでに高湿分対応燃焼器⁽³⁾、高湿空気による翼冷却⁽⁴⁾等を実施している。また、本ガスタービンを用いたシステム全体の検討として、排ガスからの湿分回収方式の検討⁽⁵⁾、加湿装置として増湿塔及び噴霧スプレを適用した場合のシステム性能評価⁽⁶⁾等を実施している。さらに 2004 年からは、これまでの検討結果を踏まえて発電出力 3.6MW の検証用 AHAT システムの開発に着手している。

検証用 AHAT システムでは、圧縮空気の加湿手段として増湿塔を採用する予定である。ただし、増湿塔設置により圧縮機から燃焼器までの機器・配管容積が増大するほか、増湿塔加湿開始・停止時の加湿量の変動がプラント出力に影響することから、動特性シミュレーションによる増湿塔及びシステムの事前評価が必要と考えられる。

増湿塔のシミュレーションに関する研究としては、Genova 大学におけるマイクロガスタービンへの適用評価⁽⁸⁾、Lund 工科大学による増湿塔の動特性モデルの開発及び特性評価が挙げられる⁽⁹⁾。Lund 工科大学のモデルは、同大学で試作した HAT システム (EvGT) の動特性解析を目的に開発した詳細モデルで、空気、水のそれぞれの熱物質収支に加え、蒸発界面上の熱物質収支の動特性も考慮している。ただし、20 秒の動特性計算に 8 時間を要するため、起動停止、負荷運転など基本運用方式の検討に用いるにはモデルの高速化が不可欠である。

本研究では、AHAT システム基本運用方式の確立を目的に、システム起動停止・負荷運用などの解析に適用可能な増湿塔動特性モデルを開発し、本モデルの解析結果を試験装置

の結果と比較した。

2. おもな記号

(記号)

A : 伝熱面積(m^2), D : 流路面積(m^2), G : 質量流量(kg/s), H : エンタルピー(kJ/kg), M : 質量(kg), Q : 熱量(W), T : 温度($^{\circ}C$), V : 体積(m^3), x : 流体中の水分比(湿分率)(kg/kg), α : 熱伝達率($kW/(m^2K)$), ρ : 密度(kg/m^3), τ : 流体滞留時間(s),

(添字)

a : 空気, 飽和蒸気, $m1$: 被加熱部(塔壁), $m2$: 被加熱部(充填物), w : 水, i : 流入側, s : 飽和

3. AHAT システムの概要と課題

3-1 AHAT システムの概要

検証用 AHAT システム(発電出力 3.6MW)の構成を図 1 に示す。

AHAT システムは (1)圧縮機入口での微細液滴噴霧(WAC: Water Atomization Cooling), (2)圧縮空気(以下空気)の増湿とタービン排ガスによる熱の回収, (3)排ガスからの水回収の 3 点を特徴とする。検証用システムでは圧縮機で加圧した空気を増湿塔で加湿し、再生熱交換器でタービン排ガスの熱を回収した後、燃料とともに燃焼器内で燃焼してタービンを駆動する。空気の増湿によ

Fig.1 Schematic of AHAT (Advanced Humid Air Turbine) demonstration plant

り、質量流量の増大と燃焼時の体積膨張によるタービン出力増大の効果が得られる。

増湿塔で加湿に用いられる給水は、空気冷却器及び給水加熱器（エコマイザ）で昇温した熱水である。WAC 及び増湿塔で加湿された湿分は、水回収装置においてそのほとんどを回収する。回収された水は増湿塔下部へと還流し、給水として再利用する。

3-2 増湿塔の概要及び運用時の課題

検証用 AHAT システムで使用する増湿塔の概要を図 2 に示す。

増湿塔は、空気と給水との気液接触により空気を加湿する装置である。塔内部には充填物を装荷し、塔上方から充填物に向けて給水を散布する。給水は充填物の表面上に水膜を形成しつつ流下し、水膜と空気との気液接触により空気を加湿する。

増湿塔における空気加湿性能は、塔高、塔径、充填物の形式のほか、空気及び給水の入口条件（温度・流量・空気絶対湿度）、塔内の圧力等によっても変動する。湿分の変動はプラント運転時、特に増湿塔への給水の散布開始・停止時に顕著であると考えられる。燃焼器やガスタービンへの影響、あるいは発電出力などシステム全体への影響が評価可能な動特性モデルの開発が必要である。

4. 増湿塔動特性モデルの開発

4-1 増湿塔モデルの構成

増湿塔動特性モデルは、AHAT 性能解析向けに開発した詳細モデル⁽⁷⁾を動特性解析向けに拡張する。増湿塔内部の熱及び物質収支の概略を図 3 に示す。動特性モデルは塔内の充填物を高さ方向に複数分割し、各部分の流体のエンタルピー・流量・質分率・被加熱部の温度を連立微分方程式で解く。分割したモデルをここではセクションと呼ぶ。

本モデルでは、流体を空気（添字 a）と給水（添字 w）の二流体とし、湿り空気に含まれる水分を湿分率 x で表す。各セクションにおける流体の熱物質収支は(1)～(3)式で与えられる。

$$V_a \rho_a \frac{dH_a}{dt} = G_{ai} H_{ai} - G_a H_a + Q_{ev} - Q_{am1} - Q_{am2} \quad \text{.....(1)}$$

$$M_a \frac{dx_a}{dt} = G_{ai} x_{ai} - G_a x_a + G_{ev} \quad \text{.....(2)}$$

Fig.2 The humidification tower for the AHAT

$$M_w \frac{dH_w}{dt} = G_{wi} H_{wi} - G_w H_w - Q_{ev} - Q_{wm2} \quad \text{.....(3)}$$

セクション出口における各流体の流量は、セクション内での流体の滞留時間を考慮しそれぞれ(4)(5)式で求める（s はラプラス演算子）。

$$G_a = (G_{ai} + G_{ev}) \exp(-\tau_a s) \quad \text{.....(4)}$$

$$G_w = (G_{wi} - G_{ev}) \exp(-\tau_w s) \quad \text{.....(5)}$$

充填物表面上に形成される水膜の蒸発界面から空気への熱移動量 Q_{ev} 、物質移動量 G_{ev} は、各流体間の温度差 ΔT 、湿分率温度差 Δx 、気相熱伝達容量係数 $hGa [W/(m^2 K)]$ 、気相物質移動容量係数 $kGa [kg/(m^2 s \Delta x)]$ 、セル体積 V_{cell} 及び調整パラメータ γ から次式で求める。

$$G_{ev} = k_{Ga} (x_{ws} - x_a) V_{cell} \gamma \quad \text{.....(6)}$$

$$Q_{ev} = h_{Ga} (T_w - T_a) V_{cell} \gamma + H_{ws} G_{ev} \quad \text{.....(7)}$$

気相物質移動容量係数 kGa は充填物性能解析ツールである WINSORP を用いて充填物の特性を算出した⁽¹⁰⁾。また、気相熱伝達容量係数 hGa は Chilton-Colburn のアナロジーにより、非凝縮ガスの熱容量 $C_H [kJ/(kg K)]$ 及び Lewis の式を用いて次式から求めた⁽¹¹⁾。

$$h_{Ga} = C_H k_{Ga} \quad \text{.....(8)}$$

本モデルでは水膜の蒸発界面の湿分率 x_w が常に飽和湿り空気であると仮定し、蒸発プロセスを静特性で模擬することにより計算刻み時間の増加と、計算コスト削減によるモデル高速化を図った。調整パラメータ γ は充填物表面上における水膜の形成状態を仮定するパラメータで、下記数値を取るものと仮定する。

- (1) $\gamma = 1$: 充填物表面上に水膜が完全に形成されている。
- (2) $0 < \gamma < 1$: 充填物表面上に部分的に水膜が形成されない部分が存在する。この部分では空気と充填物の熱交換がなされる。
- (3) $\gamma = 0$: 充填物表面は完全に乾燥しており、空気と充填物との間で熱交換がなされる。

Fig.3 Heat and mass transfer model for the humidification tower

被加熱部は塔壁(添字 $m1$)と充填物(添字 $m2$)の2箇所とし、空気あるいは給水との熱移動量から被加熱部温度 T_{m1} , T_{m2} を求める。なお、塔壁からは大気温度に応じて熱ロス Q_{loss} を与える。

$$M_{m1}Cp_{m1}\frac{dT_{m1}}{dt} = Q_{am1} - Q_{loss} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$M_{m2}Cp_{m2}\frac{dT_{m2}}{dt} = Q_{am2} + Q_{wm2} \quad \dots\dots\dots(10)$$

空気、蒸発界面、塔壁、充填物のそれぞれの熱移動量は、各部温度の平均温度差及び調整パラメータ γ を用いて次式で表される。

$$Q_{am1} = A_{am1}\alpha_{am1}(\bar{T}_a - T_{m1}) \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$Q_{am2} = (1-\gamma)A_{am2}\alpha_{am2}(\bar{T}_a - T_{m2}) \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$Q_{wm2} = \gamma A_{am2}\alpha_{wm2}(\bar{T}_w - T_{m2}) \quad \dots\dots\dots(13)$$

4-2 実験装置による検証

本モデルの解析精度を増湿塔試験装置による加湿試験結果と比較する。図4に試験装置の概要を、表1に実験条件を示す。装置材質はステンレス製で、内部に最大高さ1.3mまで充填物を装荷する。充填物の上方からは、ヒータを通して加熱した水を散水器を通してシャワー状に散布する。また、下方からはヒータで加熱した加圧空気を供給する。充填物を通過して塔下端まで落下した水は再びヒータで加熱して循環させる。なお、塔内で蒸発によって失われる水は、給水としてタンクから補給する。

本実験装置による動特性試験結果及び動特性モデルの計算結果の一例を図5.1～5.2に示す。

図5.1より、試験では、入口空気温度を38℃一定とし、ヒータの出力を調整して入口給水温度を40℃から87℃まで変化させた。図5.2に試験結果を示す。入口給水温度の上昇により、出口空気温度もまた無駄時間及び遅れを伴って上昇する。また、出口空気温度の上昇により空気を含みうる水分量も増加するため、増湿塔出口における空気の絶対湿度もまた無駄時間及び遅れを伴って上昇する特性となる。

シミュレーションでは、増湿塔充填物を10分割し、各セクションにおいて給水は充填物表面上を完全に覆って流下する場合($\gamma=1$)と仮定した。図5.1に示す給水温度特性を入力として動特性を計算した結果、計算結果と試験装置の計測結果は図5.2の通り概略で一致した。空気絶対湿度の最大誤差は時刻125秒において定常状態の絶対湿度に対して5.7%、出口空気温度の最大誤差は同じく時刻125秒で1.9℃であった。

5 シミュレーション

前章で開発した動特性モデルを用いて、検証用AHATシステム向け増湿塔の加湿開始・停止時における温度・絶対湿度特性を評価した。増湿塔周辺の空気・配管経路を図6に示す。増湿塔への加湿開始時には弁(A)を開くとともにバイパス弁(B)を閉じて給水を増湿塔に導く。加湿停止時にはバイパス弁(B)を開くとともに弁(A)を閉じて、増湿塔への給水を停止する。

解析条件を表2に示す。増湿塔の空気及び水面積流量は解析条件付近でそれぞれ実験装置の約2倍、塔内圧力は0.72MPa・absを想定した。また、増湿塔入口における空気の

Fig 4 Schematic of apparatus for laboratory tests

Table 1 Conditions of laboratory tests

Item		Value	Unit
Packing	Type	Melapack-250Y	-
	Height	1300	mm
Air	Flow Rate	3.3	kg/m ² /s
	Pressure	0.5	MPa・abs
	Inlet Temperature	38	°C
Water	Flow Rate	4	kg/m ² /s
	Inlet Temperature (Variable)	40~87	°C

Fig.5.1 A sample condition of laboratory test and simulation

Fig.5.2 Results of a laboratory test and a simulation

温度は100℃と仮定した。

なお、加湿開始・停止時には、充填物表面が水膜形成状態と乾燥状態で遷移すると考えられる。本現象を模擬するため、本解析では、調整パラメータ γ を給水流量 G_w を用いて次式

で仮定した。

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \dots (L \geq L_{\min}) \\ G_w / G_{w(L_{\min})} & \dots (L < L_{\min}) \end{cases} \dots (15)$$

$$L = 3600 \times G_w / \rho_w / D \dots (16)$$

$$G_{w(L_{\min})} = L_{\min} \rho_w D / 3600 \dots (17)$$

ここで、 L は給水の面積流量[m³/(m²h)], $L_{\min}$ は充填物データとして公開されている面積流量最小値(=10)である⁽¹⁰⁾。動特性モデルでは、(16)式を用いて給水の面積流量 L を逐次計算し、 L が $L_{\min}$ 未満となった場合の調整パラメータ γ を各セクションの給水流量 G_w に応じて(15)式から求めた。

増湿塔加湿停止時の温度及び絶対湿度特性の一例を図7.1に示す。加湿停止時には、バイパス弁(B)を開くとともに弁(A)を開き、増湿塔への給水を停止する。このとき切替の時間は1秒と仮定する。

計算の結果、増湿塔出口絶対湿度は約30秒で完全に低下し、その変化速度は定常時絶対湿度に対して絶対値最大で-8.6%/sであった。

加湿停止時には、給水から空気への熱移動も停止することから、増湿塔出口空気温度もまた低下する。増湿塔入口空気温度及び入口給水温度もまた変化するが、これは空気冷却器の熱回収量の変化、給水温度の変化等によりシステムの平衡状態が変化したことが原因である。

増湿塔加湿開始時の温度及び絶対湿度特性を図7.2に示す。加湿開始時には弁(A)を開くとともに弁(B)を閉じる。切替の時間は停止と同じく1秒を仮定している。

計算の結果、増湿塔出口絶対湿度は約30秒で静定値の70%まで上昇し、その後は入口空気温度、入口給水温度の上昇に伴って徐々に上昇した。加湿開始時の絶対湿度の変化速度は定常時絶対湿度に対して+5.5%/sであった。

6. 結言

高温分利用ガスタービンシステムの負荷運転、起動停止特性解析向け増湿塔動特性モデルを開発した。

本モデルと試験装置との過渡応答特性を比較した結果、モデルの計算誤差は、絶対湿度誤差で定常状態の加湿量に対して5.7%、出口空気温度で最大1.9℃であった。また、検証用AHATプラントの増湿塔仕様を考慮した評価では、増湿塔起動停止直後の30秒間に増湿塔出口における絶対湿度変化速度が最大となる。加湿停止時には定常時絶対湿度に対して-8.6%/s、加湿開始時には+5.5%/s変化する解析結果が得られた。

謝辞

本研究の一部は、METIより平成16年度エネルギー使用合理化技術開発費補助金(高効率ガスタービン実用化要素技術開発)の支援を受けて実施された。

参考文献

- (1) 幡宮、火力原子力発電, 53, 9 (2002) pp.1031-1038
- (2) 中村、山本、火力原子力発電, 43, 12 (1992) pp. 1587-1592
- (3) 小金沢 ほか 2 名、機講論、Vol. 4 (2002) pp. 187-188
- (4) 樋口 ほか 3 名、IGTC-03 (2003) TS-090
- (5) 沼田 ほか 2 名、第39回伝シ論 (2002) pp. 661-662
- (6) 幡宮 ほか 2 名、ASME GT2004-54031 (2004)

Fig 6 Schematic of start-up and termination method for the humidification tower.

Table 2 Conditions of simulations for the AHAT demonstration plant

Item		Value	Unit
Packing	Type	RSR #2	-
	Height	1000	mm
Air	Flow Rate	6.5	kg/m ² /s
	Pressure	0.72	MPa·abs
	Inlet Temperature	102	°C
Water	Flow Rate (Input Condition)	7.8→0→7.8 (in 1sec.)	kg/m ² /s
	Inlet Temperature (System Calculation Result)	112~122	°C

Fig.7.1 Results of feed-water terminationsimulation.

Fig.7.2 Results of feed water start-up simulation.

- (7) 荒木 ほか 3 名, SPES 2004 (2004) FP1-08
- (8) Cevasco, R.ほか 3 名, ASME GT2004-53315(2004)
- (9) Johnson, K., Lund 工大修論, LTH-IEA-5159 (2002)
- (10) 日鉄化工機株式会社、「ラシヒ社の充填物&インターナリス」(2001)
- (11) 化学工学便覧改訂六版, 丸善(1999)p.759