

明 細 書

発明の名称： 気体燃料計測装置及びガスタービン制御システム

技術分野

[0001] 本発明は、気体燃料計測装置及びガスタービン制御システムに関する。本願は、2011年4月15日に、日本に出願された特願2011-090996号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 近年では、燃料ガスと空気との予混合気を希薄な状態で燃焼させることにより、 NO_x 排出量の削減を実現可能なDLE (Dry Low Emission)燃焼方式を採用したガスタービンが用いられている。このようなDLE燃焼方式（予混合燃焼方式ともいう）のガスタービンは、燃焼器での燃焼振動や失火等の発生を回避するために、極めて高精度な燃料性状の計測及びその計測値に基づく極めて高精度な燃焼制御が要求されている。

[0003] 従来では、燃料性状として、燃料ガスの低位発熱量(LHV: Lower Heating Value)と、燃料ガスの空気に対する比重(SG: Specific Gravity)とをガスクロマトグラフを用いて高精度に計測し、それら計測値から算出したウォッベ指数(WI: Wobbe Index)に基づいて、燃料ガスの流量制御を行っていた（下記特許文献1参照）。なお、ウォッベ指数WIは、低位発熱量LHVを比重SGの平方根で除算することで得られる。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：日本国特開2008-291845号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] よく知られているように、ガスクロマトグラフは、カラムを通して被計測ガスに含まれる各成分を分離した上で各成分の計量を行う。その計測原理上、ガスクロマトグラフを用いた計測には、被計測ガスのサンプリングから計

測値の出力までに5分から10分程度の時間を要するという特徴がある。従って、ガスクロマトグラフから5分ないし10分周期で得られる個々の計測値は、十分に高い精度を有する。しかしながら、被計測ガス、つまり燃料ガスの性状が変動すると、その性状変動に計測値が追従しきれずに時間遅れ（応答遅れ）による誤差が発生する。その結果、高精度な燃焼制御が困難となる。

[0006] 上記したガスクロマトグラフの欠点を補うために、燃料ガス（例えば天然ガス）に含まれる炭化水素のSG-LHV特性がほぼ線形関数で表されることを利用する手法がある。この手法として、密度計を用いて燃料ガスの密度（比重SG）を計測し、その計測値と予め求めておいたSG-LHV特性から低位発熱量LHVを推定する手法が挙げられる。

この手法は、炭化水素の混合比が変動しても、SGとLHVの関係が線形関数上で移動するのみである。このため、比較的性状が安定しているLNGの気化によって得られた天然ガスを用いる場合には、この手法が適用できる。しかしながら、ガス田から直接引き込まれた天然ガスのようにCO₂やN₂等の不活性成分が多く含まれている場合には、SGとLHVの関係が線形関数から外れる。その結果、LHVの推定が困難になる。

[0007] この他の手法として、燃焼式カロリーメータを使用して燃料ガスの一部をサンプリングして燃焼させてカロリー（LHV）を計測する手法も考えられる。しかしながら、この手法を用いた場合、計測装置が複雑となり、コストが増加する。

[0008] 本発明は上述した事情に鑑みてなされたものであり、以下の2点を目的とする。

（1）コストの増加を抑えつつ、高精度な気体燃料性状の計測を実現する。

（2）高精度なガスタービンの燃焼制御を実現する。

課題を解決するための手段

[0009] 本発明の第1の態様によれば、気体燃料の性状を計測する気体燃料計測装置は、前記気体燃料の発熱量、比重及び特定成分濃度を計測し、一定周期で

各計測値を出力するガスクロマトグラフと、前記気体燃料の特定成分濃度を計測し、前記ガスクロマトグラフよりも短い周期で計測値を出力する濃度計と、前記ガスクロマトグラフから得られた前記特定成分濃度の計測値と、同時期に前記濃度計から得られた前記特定成分濃度の計測値とに基づいて、同時期に前記ガスクロマトグラフから得られた前記発熱量及び前記比重の計測値を補正する補正演算装置と、を備える。

[0010] また、本発明の第2の態様によれば、気体燃料の性状を計測する気体燃料計測装置は、前記気体燃料の発熱量及び特定成分濃度を計測し、一定周期で各計測値を出力するガスクロマトグラフと、前記気体燃料の特定成分濃度を計測し、前記ガスクロマトグラフよりも短い周期で計測値を出力する濃度計と、前記気体燃料の比重を計測し、前記ガスクロマトグラフよりも短い周期で計測値を出力する比重計と、前記ガスクロマトグラフから得られた前記特定成分濃度の計測値と、同時期に前記濃度計から得られた前記特定成分濃度の計測値とに基づいて、同時期に前記ガスクロマトグラフから得られた前記発熱量及び前記比重計から得られた前記比重の計測値を補正する補正演算装置と、を備える。

[0011] また、本発明の第3の態様によれば、上記第1または第2の態様において、前記補正演算装置は、前記ガスクロマトグラフから得られた前記特定成分濃度の計測値及び同時期に前記濃度計から得られた前記特定成分濃度の計測値と、予め前記ガスクロマトグラフを用いて求めておいた、前記発熱量と前記特定成分濃度との相関関係及び前記比重と前記特定成分濃度との相関関係とに基づいて、前記発熱量及び前記比重の計測値を補正する。

[0012] また、本発明の第4の態様によれば、上記第3の態様において、前記補正演算装置は、前記発熱量と前記特定成分濃度との相関関係を表す近似関数及び前記比重と前記特定成分濃度との相関関係を表す近似関数に基づいて予め作成された、前記ガスクロマトグラフ及び前記濃度計から得られる前記特定成分濃度を変数とする発熱量補正係数及び比重補正係数の演算式に対して、前記ガスクロマトグラフ及び前記濃度計から得られた前記特定成分濃度の計

測値を代入することで前記発熱量補正系数及び前記比重補正係数を算出する。

[0013] さらに、本発明の第5の態様によれば、ガスタービン制御システムは、ガスタービンと、前記ガスタービンの燃焼器に接続された燃料供給ラインと、前記燃料供給ラインに介挿された燃料流量制御弁と、上記第1～第4のいずれか一つの態様における解決手段を有し、前記燃料供給ラインに流れる気体燃料の性状を計測する気体燃料計測装置と、前記気体燃料計測装置から得られる前記気体燃料の発熱量及び比重の計測値に基づいてウォッベ指数を算出し、前記ウォッベ指数に基づいて前記燃料流量制御弁の開度を制御する制御装置と、を備える。

発明の効果

[0014] 本発明に係る気体燃料計測装置によれば、ガスクロマトグラフから得られた気体燃料の特定成分濃度の計測値と、同時期に濃度計から得られた気体燃料の特定成分濃度の計測値とに基づいて、同時期にガスクロマトグラフから得られた気体燃料の発熱量及び比重の計測値を補正する。このため、時間遅れによる誤差が抑制された高精度な発熱量と比重の計測値を得ることができる。濃度計としては、例えば赤外線分析計のような比較的安価な計器を利用することができる。つまり、本発明に係る気体燃料計測装置によれば、コストの増加を抑えつつ、高精度な気体燃料性状の計測を実現することができる。

[0015] また、本発明に係るガスタービン制御システムによれば、前述の気体燃料計測装置から得られる高精度な発熱量と比重の計測値を基にウォッベ指数を算出し、このウォッベ指数に基づいて燃料流量制御弁の開度を制御する。これにより、高精度なガスタービンの燃焼制御を実現することができる。

図面の簡単な説明

[0016] [図1]第1実施形態に係るガスタービン制御システムのブロック図である。
[図2A]本実施形態における燃料ガス性状の計測原理に関する第1説明図である。

[図2B]本実施形態における燃料ガス性状の計測原理に関する第1説明図である。

[図3A]本実施形態における燃料ガス性状の計測原理に関する第2説明図である。

[図3B]本実施形態における燃料ガス性状の計測原理に関する第2説明図である。

[図4]第2実施形態に係るガスタービン制御システムのブロック図である。

[図5]本実施形態の変形例に関する説明図である。

発明を実施するための形態

[0017] 以下、本発明の一実施形態について、図面を参照しながら説明する。

(第1実施形態)

まず、本発明の第1実施形態について説明する。図1は、第1実施形態に係るガスタービン制御システムAの概略構成を示すブロック図である。図1に示すように、ガスタービン制御システムAは、ガスタービン1、燃料供給ライン2、燃料流量制御弁3、サンプリング装置4、気体燃料計測装置5、及びガスタービン制御装置6から構成されている。なお、図1において、実線矢印は燃料ガスを表し、点線矢印は電気信号を表している。

[0018] ガスタービン1は、例えば、燃料ガスと空気との予混合気を希薄な状態で燃焼させることにより、NOx排出量の削減を実現可能なDLB燃焼方式（予混合燃焼方式）を採用したガスタービンである。燃料供給ライン2は、ガスタービン1の燃焼器（図示省略）に接続された燃料ガス供給用の配管である。天然ガス等の燃料ガスは、燃料供給ライン2を介してガスタービン1の燃焼器へ供給される。なお、図1では図示を省略しているが、ガスタービン1の燃焼器には、圧縮空気を供給するための空気供給ラインも接続されている。

[0019] 燃料流量制御弁3は、燃料供給ライン2に設けられた自動調節弁であり、ガスタービン制御装置6から入力される燃料流量制御信号FCに応じて開度が制御される。つまり、燃料流量制御弁3の開度制御によって、ガスタービ

ン 1 に供給される燃料ガスの流量が制御される。サンプリング装置 4 は、燃料供給ライン 2 における燃料流量制御弁 3 の上流側に設けられており、燃料供給ライン 2 に流れる燃料ガスの一部を分岐させて（サンプリングして）気体燃料計測装置 5 へ導く。

[0020] 気体燃料計測装置 5 は、サンプリング装置 4 を介して燃料供給ライン 2 から導入される燃料ガスの性状を計測する。気体燃料計測装置 5 は、ガスクロマトグラフ 5 a、赤外線分析計 5 b、及び補正演算装置 5 c から構成されている。気体燃料計測装置 5 内に導入された燃料ガスは、ガスクロマトグラフ 5 a と赤外線分析計 5 b とのそれぞれに分配される。

[0021] ガスクロマトグラフ 5 a は、燃料ガスの低位発熱量 LHV 、空気に対する比重 SG 及び二酸化炭素 (CO_2) 濃度を計測し、一定周期で各計測値 LHV_gc 、 SG_gc 、 $CO2_gc$ を補正演算装置 5 c へ出力する。前述のように、ガスクロマトグラフ 5 a は、カラムを通して被計測ガス（燃料ガス）に含まれる各成分を分離した上で各成分の計量を行う。その計測原理上、ガスクロマトグラフ 5 a には、計測値は高精度ではあるが、燃料ガスのサンプリングから計測値の出力までに 5 分から 10 分程度の時間を要するという特徴がある。つまり、ガスクロマトグラフ 5 a は、5 分ないし 10 分周期で各計測値 LHV_gc 、 SG_gc 、 $CO2_gc$ を出力する。

[0022] 赤外線分析計 5 b は、非分散型赤外吸収法 ($ND-IR$ 法) を利用したガス分析計であり、燃料ガスの二酸化炭素 (CO_2) 濃度を計測し、ガスクロマトグラフ 5 a よりも短い周期で計測値 $CO2_ir$ を補正演算装置 5 c へ出力する。赤外線分析計 5 b は、その計測原理上、ガスクロマトグラフ 5 a より精度の点で劣る。しかしながら、赤外線分析計 5 b には、ガスクロマトグラフ 5 a と比較してほぼ連続的とみなせる極めて短い周期（数秒オーダー）で計測値 $CO2_ir$ を出力できるという特徴がある。

[0023] 補正演算装置 5 c は、例えばメモリや CPU (Central Processing Unit) コア、入出力インターフェース等が一体的に組み込まれたマイクロコンピュータである。補正演算装置 5 c は、ガスクロマトグラフ 5 a から得られた CO_2

濃度の計測値 $CO_2_g_c$ と、同時期に赤外線分析計5bから得られた CO_2 濃度の計測値 $CO_2_i_r$ とに基づいて、同時期にガスクロマトグラフ5aから得られた低位発熱量 LHV 及び比重 SG の計測値 LHV_g_c 、 SG_g_c を補正する。また補正演算装置5cは、その補正後の計測値 LHV_c 、 SG_c をガスタービン制御装置6へ出力する。

[0024] ガスタービン制御装置6は、気体燃料計測装置5（補正演算装置5c）から得られる燃料ガスの低位発熱量 LHV 及び比重 SG の計測値 LHV_c 、 SG_c に基づいてウォッベ指数 W を算出する。ガスタービン制御装置6は、算出されたウォッベ指数 W に基づいて燃料流量制御弁3の開度を制御する（燃料ガス流量を制御する）ための燃料流量制御信号 FC を燃料流量制御弁3へ出力する。また、ガスタービン制御装置6は、ガスタービン1の空気供給ラインに介挿された空気流量制御弁（図示省略）の開度を制御する（空気流量を制御する）ための空気流量制御信号 AC を空気流量制御弁に出力する。

[0025] 続いて、上記のように構成されたガスタービン制御システムAの動作について詳細に説明する。つまり、気体燃料計測装置5による燃料ガス性状の計測動作及びガスタービン制御装置6によるガスタービン1の燃焼制御動作（燃料流量制御）について詳細に説明する。

[0026] <燃料ガス性状の計測原理>

始めに、気体燃料計測装置5による燃料ガス性状の計測動作についての理解を容易にするために、本実施形態における燃料ガス性状の計測原理について説明する。

図2Aに示すように、ガスクロマトグラフ5aは、5分ないし10分周期で燃料ガス性状（低位発熱量 LHV 及び比重 SG 等）の計測値 LHV_g_c 、 SG_g_c を出力する。上記したガスクロマトグラフ5aから5分ないし10分周期で得られる個々の計測値は、十分に精度が高い（真値に極めて近い）。しかしながら、燃料ガス性状が短期的に変動すると、その性状変動に計測値が追従しきれずに最大2ステップ分（2周期分）の時間遅れ（応答遅れ）

による誤差が発生する。

[0027] 本願発明者は、ある地域から産出される天然ガスについて、ガスクロマトグラフを用いて計測された一定期間分の性状データを検証した。その結果、天然ガスに含まれる不活性成分の内、特に二酸化炭素（ CO_2 ）の濃度が大きく且つ濃度変動が大きい場合に、ウォッベ指数 $W I$ の算出に必要な低位発熱量 LHV 及び比重 SG が大きく変動することを発見した。

[0028] 本願発明者は、上記一定期間分の天然ガスの性状データを使用して、 CO_2 濃度と低位発熱量 LHV との関係、及び CO_2 濃度と比重 SG との関係を調査した。その結果、図3Aに示すように、 CO_2 濃度と低位発熱量 LHV とが明確な相関関係にあることを発見し、図3Bに示すように、 CO_2 濃度と比重 SG とが低位発熱量 LHV ほどではないが、ある程度の相関関係にあることを発見した。

[0029] 図3Aに示すように、 CO_2 濃度と低位発熱量 LHV との相関関係は、指数関数によって高精度に近似できる（全てのデータが近似関数曲線から $\pm 1\%$ 以内の範囲に収まっている）。これは、 CO_2 濃度と低位発熱量 LHV との相関関係を予め求めておけば、燃料ガスの CO_2 濃度計測値から低位発熱量 LHV を推定可能であることを意味している。以下では、 CO_2 濃度と低位発熱量 LHV との相関関係を表す近似関数（指数関数）を下記（1）式で定義する。なお、下記（1）式において、 A 、 B は定数、 e は自然対数の底である。

[0030] [数1]

$$LHV_{gc} = A \times e^{(B \times CO2_{gc})} \quad \dots(1)$$

[0031] また、図3Bに示すように、 CO_2 濃度と比重 SG との相関関係は、 CO_2 濃度と低位発熱量 LHV との相関関係に比べてやや相関が低く、ほぼ平行な2つのデータ系列が存在するように見える。しかしながら、相関の高い一方のデータ系列は指数関数によって他方のデータ系列と比べて精度良く近似できる。これは、 CO_2 濃度と比重 SG との相関関係を予め求めておけば、燃料ガスの CO_2 濃度計測値から比重 SG を推定可能であることを意味している。

以下では、CO₂濃度と比重SGとの相関関係を表す近似関数（指数関数）を下記（2）式で定義する。なお、下記（2）式において、C、Dは定数、eは自然対数の底である。

[0032] [数2]

$$SG_{gc} = C \times e^{(D \times CO2_{gc})} \quad \dots(2)$$

[0033] 次に、CO₂濃度の計測手法が問題となるが、ガスクロマトグラフ5aから得られるCO₂濃度の計測値CO₂_gcは、他の計測値LHV_gc、SG_gcと同様に最大2ステップ分の時間遅れによる誤差を含んでいる。これに対し、赤外線分析計5bは、ガスクロマトグラフ5aより精度の点で劣る。しかしながら、赤外線分析計5bは、ガスクロマトグラフ5aと比較してほぼ連続的とみなせる極めて短い周期でCO₂濃度の計測値CO₂_irを出力できる。このため、時間遅れによる誤差を無視できる（図2B参照）。

[0034] つまり、ガスクロマトグラフ5aから得られるCO₂濃度の計測値CO₂_gcは、最大2ステップ分過去の値であって現在値ではない。しかしながら、赤外線分析計5bから得られるCO₂濃度の計測値CO₂_irは現在値とみなすことができる。このため、同時期に得られたCO₂_gcとCO₂_irとの差分がなくなるように（言い換えれば、CO₂_gcがCO₂_irに一致するように）補正を行うことにより、時間遅れによる誤差が抑制された高精度な低位発熱量LHVと比重SGの計測値を得ることができる。

[0035] 具体的には、ガスクロマトグラフ5aから得られる低位発熱量LHVの計測値LHV_gcに含まれる時間遅れ誤差を補正するための発熱量補正係数Z_LHV_co2は、同時期にガスクロマトグラフ5a及び赤外線分析計5bから得られるCO₂濃度の計測値CO₂_gc、CO₂_irと上記（1）式とに基づいて導出された下記（3）式によって算出することができる。

[0036] [数3]

$$Z_{LHV_co2} = \frac{A \times e^{(B \times CO2_{ir})}}{A \times e^{(B \times CO2_{gc})}} = e^{[B \times (CO2_{ir} - CO2_{gc})]} \quad \dots(3)$$

[0037] また、ガスクロマトグラフ 5 a から得られる比重 SG の計測値 SG_{gc} に含まれる時間遅れ誤差を補正するための比重補正係数 Z_{SG_{co2}} は、同時期にガスクロマトグラフ 5 a 及び赤外線分析計 5 b から得られる CO₂ 濃度の計測値 CO_{2gc}、CO_{2ir} と上記 (2) 式とに基づいて導出された下記 (4) 式によって算出することができる。

[0038] [数4]

$$Z_{SG_co2} = \frac{C \times e^{(D \times CO2_ir)}}{C \times e^{(D \times CO2_gc)}} = e^{[D \times (CO2_ir - CO2_gc)]} \quad \dots(4)$$

[0039] 従って、最終的に、時間遅れによる誤差を含まない低位発熱量 LHV と比重 SG の計測値 (補正後の計測値 LHV_c、SG_c) は、下記 (5) 式及び (6) 式で表される。

[0040] [数5]

$$LHV_c = LHV_gc \times Z_{LHV_co2} \quad \dots(5)$$

$$SG_c = SG_gc \times Z_{SG_co2} \quad \dots(6)$$

[0041] 上記したように、予めガスクロマトグラフを用いて、燃料ガスの CO₂ 濃度と低位発熱量 LHV との相関関係及び CO₂ 濃度と比重 SG との相関関係を求め、これら相関関係を表す近似関数を基に発熱量補正係数 Z_{LHV_{co2}} と比重補正係数 Z_{SG_{co2}} の演算式を作成しておく。そして、同時期にガスクロマトグラフ 5 a 及び赤外線分析計 5 b から得られた CO₂ 濃度の計測値 CO_{2gc}、CO_{2ir} を上記演算式に代入する。これにより、同時期にガスクロマトグラフ 5 a から得られた低位発熱量 LHV の計測値 LHV_{gc} と比重 SG の計測値 SG_{gc} に含まれる時間遅れ誤差を補正することができる。

[0042] なお、本願発明者の試算では、補正前の計測値 LHV_{gc} と計測値 SG_{gc} とを用いて算出したウォッベ指数 WI (= LHV_{gc} / √ SG_{gc}) は、時間遅れによる 1 % 以上の大きな誤差が発生していた。しかしながら、

補正後の計測値 LHV_c と計測値 SG_c とを用いて算出したウォッベ指数 $WI (= LHV_c / \sqrt{SG_c})$ は、時間遅れによる誤差が 0.6% 以下に抑えられていることが確認された。

[0043] つまり、本実施形態における燃料ガス性状の計測原理によれば、ガスクロマトグラフ 5 a の欠点（高精度ではあるが燃料ガス性状が短期的に変動した場合、時間遅れによる誤差が発生する）を大幅に改善できる。したがって、時間遅れ誤差が抑制された高精度な（現在値に近い）低位発熱量 LHV の計測値 LHV_c と比重 SG の計測値 SG_c を得ることができる。

[0044] <気体燃料計測装置 5 による燃料ガス性状の計測動作>

続いて、上述した燃料ガス性状の計測原理を前提として、本実施形態の気体燃料計測装置 5 による燃料ガス性状の計測動作について説明する。

なお、ガスタービン 1 の運転中（燃料ガスの供給中）において、赤外線分析計 5 b からは、ほぼ連続的に燃料ガスの CO_2 濃度の計測値 $CO2_ir$ が出力されるが（図 2 B 参照）、ガスクロマトグラフ 5 a からは、5 分ないし 10 分周期で燃料ガスの低位発熱量 LHV 、比重 SG 及び CO_2 濃度の計測値 LHV_gc 、 SG_gc 及び $CO2_gc$ が出力され、今回ステップでの計測値が確定するまでは前回ステップの計測値が 5 分ないし 10 分間継続して出力される（図 2 A 及び図 2 B 参照）。

[0045] 気体燃料計測装置 5 の補正演算装置 5 c は、ガスクロマトグラフ 5 a から出力される低位発熱量 LHV 、比重 SG 及び CO_2 濃度の計測値 LHV_gc 、 SG_gc 及び $CO2_gc$ と、赤外線分析計 5 b から出力される CO_2 濃度の計測値 $CO2_ir$ とを一定のサンプリング周期でサンプリングする。このサンプリング周期は、ガスクロマトグラフ 5 a の計測周期（5 分ないし 10 分）より短く、赤外線分析計 5 b の計測周期（数秒オーダー）より十分長く設定されている。

[0046] 従って、補正演算装置 5 c が、サンプリングタイミング毎にガスクロマトグラフ 5 a から取得した（サンプリングした）計測値 LHV_gc 、 SG_gc 及び $CO2_gc$ は、最大 2 ステップ分過去の値であるが、赤外線分析計 5

から取得した計測値 $CO_{2_!}$ は現在値とみなすことができる。

[0047] 補正演算装置 5c は、内部メモリに上記 (3) 式及び (4) 式を予め記憶している。補正演算装置 5c は、上記のように同時期にサンプリングした各計測値の内、 CO_2 濃度の計測値 CO_{2_g} 及び $CO_{2_!}$ を上記 (3) 式及び (4) 式に代入することにより、発熱量補正係数 $Z_{LHV_CO_2}$ 及び比重補正係数 $Z_{SG_CO_2}$ を算出する。

[0048] また、補正演算装置 5c は、内部メモリに上記 (5) 式及び (6) 式を予め記憶している。補正演算装置 5c は、上記 (5) 式に基づいて、同時期にサンプリングした各計測値の内、低位発熱量 LHV の計測値 LHV_g 及び LHV_CO_2 に発熱量補正係数 $Z_{LHV_CO_2}$ を乗算することにより、時間遅れ誤差が補正された計測値 LHV_CO_2 を算出する。また補正演算装置 5c は、上記 (6) 式に基づいて、比重 SG の計測値 SG_g 及び SG_CO_2 に比重補正係数 $Z_{SG_CO_2}$ を乗算することにより、時間遅れ誤差が補正された計測値 SG_CO_2 を算出する。

[0049] 補正演算装置 5c は、上記の処理で得られた、時間遅れ誤差が補正されて現在値 (真値) に極めて近い高精度な低位発熱量 LHV の計測値 LHV_CO_2 及び比重 SG の計測値 SG_CO_2 をガスタービン制御装置 6 へ出力する。このように、補正演算装置 5c からガスタービン制御装置 6 へ一定のサンプリング周期で高精度な低位発熱量 LHV の計測値 LHV_CO_2 及び比重 SG の計測値 SG_CO_2 が出力される。

[0050] <ガスタービン制御装置 6 によるガスタービン 1 の燃焼制御動作>
 続いて、ガスタービン制御装置 6 によるガスタービン 1 の燃焼制御動作 (燃料流量制御) について説明する。
 なお、上記のように、ガスタービン制御装置 6 には、気体燃料計測装置 5 (補正演算装置 5c) から一定周期で高精度な低位発熱量 LHV の計測値 LHV_CO_2 及び比重 SG の計測値 SG_CO_2 が入力される。

[0051] 一般的に、ガスタービン 1 の燃焼器への入熱量 H (MJ/h) は、低位発熱量 LHV (MJ/Nm^3) と燃料流量 Q_f (Nm^3/h) を用いて、下記 (7) 式で表される。

[0052] [数6]

$$H = LHV \times Q_f \quad \dots(7)$$

[0053] また、燃料流量 Q_f は、オリフィス（流量計、燃料流量制御弁 3、燃料ノズルに相当）に対して、下記（8）式で表される。なお、下記（8）式において、 C は流量係数、 A はオリフィス面積（ m^2 ）、 ΔP はオリフィス前後差圧（Pa）、 ρ_f は燃料密度（ kg/m^3 ）、 ρ_{an} は標準状態の空気密度（ kg/Nm^3 ）、 SG は燃料比重（空気 = 1.0）、 T_n は標準状態の温度（K）、 T_f は燃料ガス温度（K）、 P_n は標準状態の圧力（Pa）、 P_f は燃料ガス圧力（Pa）である。

[0054] [数7]

$$Q_f = CA \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_f}} = CA \sqrt{\frac{2\Delta P}{SG \times \rho_{an} \times T_n / T_f \times P_f / P_n}} \quad \dots(8)$$

[0055] 従って、流量係数 C 、オリフィス面積 A 、オリフィス前後差圧 ΔP 、燃料ガス温度 T_f 及び燃料ガス圧力 P_f の計測値が得られており、さらに、下記（9）式からウォッベ指数 W を知ること、ガスタービン 1 の燃焼器への入熱量 H が決定できる。或いは、目標とする入熱量が決まっており、且つ燃料流量制御弁 3 の流量係数、オリフィス面積の開度特性が既知であれば、燃料流量制御弁 3 の開度を決定することができる。

[0056] [数8]

$$H \propto \frac{LHV}{\sqrt{SG}} = Wobbe \text{ Index} \quad \dots(9)$$

[0057] つまり、ガスタービン制御装置 6 は、気体燃料計測装置 5 から一定周期で得られる低位発熱量 LHV の計測値 LHV_c 及び比重 SG の計測値 SG_c を用いて、上記（9）式からウォッベ指数 W を算出する。またガスタービン制御装置 6 は、上記制御原理に基づいてウォッベ指数 W から燃料流量制御弁 3 の開度を決定し、この決定した開度、つまり燃料ガス流量となるよう

に燃料流量制御弁 3 を制御する（燃料流量制御信号 F C を出力する）。なお、この時、ガスタービン制御装置 6 は、ガスタービン 1 の燃焼器へ供給される空気流量が一定となるように不図示の空気流量制御弁を制御する（空気流量制御信号 A C を出力する）。

[0058] 以上説明したように、本実施形態によれば、気体燃料計測装置 5 から時間遅れ誤差が抑制された高精度な低位発熱量 L H V の計測値 L H V_c 及び比重 S G の計測値 S G_c を得ることができる。時間遅れ誤差の補正に使用される赤外線分析計 5 b は、比較的安価な計器である。したがって、本実施形態によれば、コストの増加を抑えつつ、高精度な気体燃料性状の計測を実現することができる。

また、本実施形態によれば、前述の気体燃料計測装置 5 から得られる高精度な低位発熱量 L H V の計測値 L H V_c 及び比重 S G の計測値 S G_c を基にウォッベ指数 W I を算出し、ウォッベ指数 W I に基づいて燃料流量制御弁 3 の開度を制御する（燃料流量を制御する）ので、高精度なガスタービン 1 の燃焼制御を実現することができる。

[0059] （第 2 実施形態）

次に、本発明の第 2 実施形態について説明する。

燃料ガスの C O₂ 濃度が減少すると、通常ならば比重 S G が低下するが、C 2 や C 3 のような他の成分濃度が急増すると、比重 S G が上昇することがある。上記のような燃料ガスの性状変動が発生した場合、補正前の計測値 S G_{g c} よりも補正後の計測値 S G_c の方が誤差が大きくなる可能性がある。第 2 実施形態は、上記のような燃料ガスの性状変動にも対応可能である。

[0060] 図 4 は、第 2 実施形態に係るガスタービン制御システム B の概略構成を示すブロック図である。図 4 に示すように、ガスタービン制御システム B は、比重計 5 d を新たに加えた気体燃料計測装置 5' を備えている点で第 1 実施形態のガスタービン制御システム A と異なっている。

ガスタービン制御システム B において、気体燃料計測装置 5' 以外の他の構成については第 1 実施形態と同様であるので、以下での説明を省略する。

[0061] サンプリソク装置4を介して気体燃料計測装置5'内に導入された燃料ガ

スは、ガスクロマトグラフ5aと赤外線分析計5bと比重計5dとのそれぞれに分配される。比重計5dは、燃料ガスの比重SGを計測し、ガスクロマトグラフ5aよりも短い周期で計測値SG_gを補正演算装置5cへ出力する。

比重計5dは、赤外線分析計5bと同様に、ガスクロマトグラフ5aより精度の点で劣る。しかしながら、比重計5dには、ガスクロマトグラフ5aと比較してほぼ連続的とみなせるような極めて短い周期で計測値SG_gを出力できるという特徴がある。

なお、ガスクロマトグラフ5aからは、燃料ガスの低位発熱量LHV及びCO₂濃度の計測値LHV_g、CO₂濃度の計測値SG_gのみが出力される。

[0062] 補正演算装置5cは、ガスクロマトグラフ5aから出力される低位発熱量LHV及びCO₂濃度の計測値LHV_g及びCO₂濃度の計測値SG_gと、赤外線分析計5bから出力されるCO₂濃度の計測値CO₂!rと、比重計5dから出力される比重SGの計測値SG_gを一定のサンプリソク周期でサンプリソクする。

[0063] 補正演算装置5cが、サンプリソクタイミソク毎にガスクロマトグラフ5aから取得した(サンプリソクした)計測値LHV_g及びCO₂濃度の計測値CO₂!rと比重計5dから取得した計測値SG_gとを現在値とみなすことができる。

[0064] 補正演算装置5cは、第1実施形態と同様に、上記のように同時期にサンプリソクした各計測値の内、CO₂濃度の計測値CO₂!r及びCO₂!rを上記(3)式及び(4)式に代入することにより、発熱量補正係数Z_{LHV}を算出する。

[0065] 補正演算装置5cは、第1実施形態と同様に、上記(5)式に基づいて、同時期にサンプリソクした各計測値の内、低位発熱量LHVの計測値LHV_gに発熱量補正係数Z_{LHV}を乗算することにより、時間遅れ誤

差が補正された計測値 LHV_c を算出する。また補正演算装置 5 c は、上記 (6) 式に基づいて、比重 SG の計測値 $SG_g c$ に比重補正係数 Z_SG_c の 2 を乗算することにより、時間遅れ誤差が補正された計測値 SG_c を算出する。

[0066] 第 2 実施形態において、上記 (6) 式に代入される比重 SG の計測値 $SG_g c$ は、比重計 5 d から得られた時間遅れ誤差の無い現在値に近い値である。このため、通常ならば低下する比重 SG が上昇するような燃料ガスの性状変動が発生した場合でも、補正前の計測値 $SG_g c$ より補正後の計測値 SG_c の方が誤差を低く抑えることができる。

[0067] 以上、本発明の第 1 及び第 2 実施形態について説明したが、本発明はこれら実施形態に限定されず、以下のような変形例が挙げられる。

(1) 上記第 1 及び第 2 実施形態では、ウォッベ指数 $W I$ の算出に必要な発熱量として低位発熱量 LHV を計測する場合を例示した。しかしながら、低位発熱量 LHV に替えて、高位発熱量 HHV (Higher Heating Value) を算出し、高位発熱量 HHV と比重 SG とからウォッベ指数 $W I$ を算出するようにしても良い。

[0068] (2) 上記第 1 及び第 2 実施形態では、燃料ガスの特定成分濃度 (CO_2 濃度) を計測する濃度計として、赤外線分析計 5 d を用いる場合を例示した。しかしながら、連続的とみなせるようなガスクロマトグラフ 5 a より短い周期で計測値を出力可能な濃度計であれば、どのような濃度計を用いても良い。また、燃料ガスの特定成分濃度として必ずしも CO_2 濃度を計測する必要はなく、燃料ガスに含まれる成分の内、低位発熱量 LHV と比重 SG の変動に大きく影響する成分の濃度を計測すれば良い。

[0069] (3) 上記第 1 及び第 2 実施形態では、燃料ガスの CO_2 濃度と低位発熱量 LHV との相関関係及び CO_2 濃度と比重 SG との相関関係を、指数関数によって近似する場合を例示したが、これら相関関係を他の関数によって近似しても良い。また、これら相関関係を表すテーブルデータを用意しておき (補正演算装置 5 c の内部メモリに記憶しておき)、このテーブルデータを近似

関数の替わりに用いても良い。

[0070] (4) 上記第1及び第2実施形態において、赤外線分析計5dのドリフトが想定される場合（真値に対するCO₂濃度の計測値CO₂_i rの誤差が大きい場合）がある。この場合には、図5に示すように、赤外線分析計5dからガスクロマトグラフ5aと同じサンプリングタイミングでサンプリングしたCO₂濃度の計測値CO₂_i rを保持しておき、数サンプリング後に、赤外線分析計5dからサンプリングしたCO₂濃度の計測値CO₂_i rと、保持しておいた計測値CO₂_i rとの差分をZ_LHV_co2及び比重補正係数Z_SG_co2の算出に用いても良い。

[0071] 本発明の態様に係る気体燃料計測装置によれば、時間遅れによる誤差が抑制された高精度な発熱量と比重の計測値を得ることができる。また、濃度計として、例えば赤外線分析計のような比較的安価な計器を利用することができる。すなわち、コストの増加を抑えつつ、高精度な気体燃料性状の計測を実現することができる。

符号の説明

[0072] A、B…ガスタービン制御システム、1…ガスタービン、2…燃料供給ライン、3…燃料流量制御弁、4…サンプリング装置、5、5'…気体燃料計測装置、6…ガスタービン制御装置、5a…ガスクロマトグラフ、5b…赤外線分析計、5c…補正演算装置、5d…比重計

請求の範囲

[請求項1]

気体燃料の性状を計測する気体燃料計測装置であって、
前記気体燃料の発熱量、比重及び特定成分濃度を計測し、一定周期で各計測値を出力するガスクロマトグラフと、
前記気体燃料の特定成分濃度を計測し、前記ガスクロマトグラフよりも短い周期で計測値を出力する濃度計と、
前記ガスクロマトグラフから得られた前記特定成分濃度の計測値と、同時期に前記濃度計から得られた前記特定成分濃度の計測値とに基づいて、同時期に前記ガスクロマトグラフから得られた前記発熱量及び前記比重の計測値を補正する補正演算装置と、
を備える気体燃料計測装置。

[請求項2]

気体燃料の性状を計測する気体燃料計測装置であって、
前記気体燃料の発熱量及び特定成分濃度を計測し、一定周期で各計測値を出力するガスクロマトグラフと、
前記気体燃料の特定成分濃度を計測し、前記ガスクロマトグラフよりも短い周期で計測値を出力する濃度計と、
前記気体燃料の比重を計測し、前記ガスクロマトグラフよりも短い周期で計測値を出力する比重計と、
前記ガスクロマトグラフから得られた前記特定成分濃度の計測値と、同時期に前記濃度計から得られた前記特定成分濃度の計測値とに基づいて、同時期に前記ガスクロマトグラフから得られた前記発熱量及び前記比重計から得られた前記比重の計測値を補正する補正演算装置と、
を備える気体燃料計測装置。

[請求項3]

前記補正演算装置は、前記ガスクロマトグラフから得られた前記特定成分濃度の計測値及び同時期に前記濃度計から得られた前記特定成分濃度の計測値と、予め前記ガスクロマトグラフを用いて求めておいた、前記発熱量と前記特定成分濃度との相関関係及び前記比重と前記

特定成分濃度との相関関係とに基づいて、前記発熱量及び前記比重の計測値を補正する請求項 1 または 2 に記載の気体燃料計測装置。

[請求項4]

前記補正演算装置は、前記発熱量と前記特定成分濃度との相関関係を表す近似関数及び前記比重と前記特定成分濃度との相関関係を表す近似関数に基づいて予め作成された、前記ガスクロマトグラフ及び前記濃度計から得られる前記特定成分濃度を変数とする発熱量補正係数及び比重補正係数の演算式に対して、前記ガスクロマトグラフ及び前記濃度計から得られた前記特定成分濃度の計測値を代入することで前記発熱量補正係数及び前記比重補正係数を算出する請求項 3 に記載の気体燃料計測装置。

[請求項5]

ガスタービンと、
前記ガスタービンの燃焼器に接続された燃料供給ラインと、
前記燃料供給ラインに介挿された燃料流量制御弁と、
前記燃料供給ラインに流れる気体燃料の性状を計測する請求項 1 ～ 4 のいずれか一項に記載の気体燃料計測装置と、
前記気体燃料計測装置から得られる前記気体燃料の発熱量及び比重の計測値に基づいてウォッベ指数を算出し、前記ウォッベ指数に基づいて前記燃料流量制御弁の開度を制御する制御装置と、
を備えるガスタービン制御システム。