

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5393693号  
(P5393693)

(45) 発行日 平成26年1月22日(2014.1.22)

(24) 登録日 平成25年10月25日(2013.10.25)

(51) Int. Cl.	F I	
GO 1 M 15/14 (2006.01)	GO 1 M 15/14	
GO 5 B 23/02 (2006.01)	GO 5 B 23/02	T
FO 2 C 9/00 (2006.01)	FO 2 C 9/00	B
FO 1 D 25/00 (2006.01)	FO 1 D 25/00	V
	FO 1 D 25/00	W

請求項の数 13 (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2010-530378 (P2010-530378)  
 (86) (22) 出願日 平成20年9月19日(2008.9.19)  
 (65) 公表番号 特表2011-501170 (P2011-501170A)  
 (43) 公表日 平成23年1月6日(2011.1.6)  
 (86) 国際出願番号 PCT/EP2008/062538  
 (87) 国際公開番号 W02009/053183  
 (87) 国際公開日 平成21年4月30日(2009.4.30)  
 審査請求日 平成22年12月20日(2010.12.20)  
 (31) 優先権主張番号 07021041.4  
 (32) 優先日 平成19年10月26日(2007.10.26)  
 (33) 優先権主張国 欧州特許庁(EP)

(73) 特許権者 390039413  
 シーメンス アクチエンゲゼルシャフト  
 Siemens Aktiengesellschaft  
 ドイツ連邦共和国 D-80333 ミュンヘン  
 ヴィッテルスバッハープラッツ 2  
 Wittelsbacherplatz  
 2, D-80333 Muenchen, Germany  
 (74) 代理人 100075166  
 弁理士 山口 巖  
 (74) 代理人 100133167  
 弁理士 山本 浩

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ガスタービンの運転を分析するための方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

多数の圧縮機段を有するガスタービン(1)の多段圧縮機(2)の運転を分析するための方法であって、前記ガスタービン(1)の正常運転に基づいて単数または複数のニューラルネットワークが学習され：

- 少なくとも1つの動的圧力信号(V5)が前記ガスタービン(1)の圧縮機(2)の内部または表面の少なくとも1つの圧力センサ(8)によって、また前記ガスタービン(1)の単数または複数の運転パラメータ(V1、V2、V3、V4)が単数または複数の他のセンサ(4、5、6、7)によって、前記ガスタービン(1)の正常運転時に測定され、および/または前記ガスタービン(1)の正常運転時に測定された前記ガスタービン(1)の前記動的圧力信号(V5)および前記単数または複数の運転パラメータ(V1、V2、V3、V4)が読み込まれ；

- 前記動的圧力信号(V5)が周波数分析を施され、これにより前記圧力信号(V5)の周波数スペクトルの単数または複数のパラメータが算定され；

- 前記単数または複数の測定された運転パラメータ(V1、V2、V3、V4)と前記動的圧力信号(V5)の前記周波数スペクトルの前記単数または複数のパラメータとに基づいて単数または複数のニューラルネットワークが学習され、これらのニューラルネットワークは入力変数として前記単数または複数の測定された運転パラメータ(V1、V2、V3、V4)と前記動的圧力信号(V5)の前記周波数スペクトルの前記単数または複数のパラメータとを含み、また出力変数として少なくとも1つの診断特性値を有し、この

診断特性値は前記入力変量に依存して前記ガスタービン(1)の正常運転の存在することの確率を表す方法において、

前記周波数スペクトルのパラメータとして各圧縮機段について特性周波数帯域(F1、F2、F3、F4)が前記ガスタービンの回転数と当該圧縮機段の静翼および動翼の回転数とに基づいて求められ、各特性周波数帯域についてそのなかに含まれた前記動的圧力信号(V5)のエネルギー成分および/または前記特性周波数帯域(F1、F2、F3、F4)内部の周波数線の1つの振幅極大および/または隣接する複数の振幅極大が計算されて前記単数または複数のニューラルネットワークの入力変量として利用される方法。

【請求項2】

前記単数または複数のニューラルネットワークがRBF(動径基底関数)ネットワークである請求項1記載の方法。

10

【請求項3】

前記少なくとも1つの診断特性値が信頼値であり、この信頼値は0~1の範囲内で正規化されており、かつ前記入力変量の各パラメータ組合せが前記ガスタービン(1)の正常運転時に既知のパラメータ組合せであること確率を表す請求項1または2記載の方法。

【請求項4】

さらに、1つの特性周波数帯域(F1、F2、F3、F4)のエネルギー成分と前記特性周波数帯域(F1、F2、F3、F4)の高調波のエネルギー成分との比が前記周波数スペクトルの他のパラメータとして考慮されて前記単数または複数のニューラルネットワークの入力変量として利用される請求項1から3のいずれか1つに記載の方法。

20

【請求項5】

各圧縮機段について1つのニューラルネットワークが学習され、各ニューラルネットワークが入力変量として前記周波数スペクトルの、1つの特性周波数帯域(F1、F2、F3、F4)に付随するパラメータを含み、各ニューラルネットワークが出力変量として診断特性値を有し、この診断特性値は前記入力変量に依存して各圧縮機段の正常運転の存在することの確率を表す請求項1から4のいずれか1つに記載の方法。

【請求項6】

所定の規則に基づいて、各圧縮機段の前記診断特性値から総合診断特性値が算定される請求項5記載の方法。

【請求項7】

30

前記動的圧力信号(V5)について実行される前記周波数分析が高速フーリエ変換を含む請求項1から6のいずれか1つに記載の方法。

【請求項8】

運転パラメータ(V1、V2、V3、V4)として下記のパラメータを含み、下記パラメータの単数または複数測定されまたは読み込まれる請求項1から7のいずれか1つに記載の方法。

- 前記ガスタービン(1)の回転数；
- 前記ガスタービン(1)の負荷；
- 周囲圧力；
- 周囲温度；
- 空気湿度；
- 前記ガスタービン(1)の前記圧縮機(2)の静翼位置

40

【請求項9】

前記測定された運転パラメータ(V1、V2、V3、V4)と前記動的圧力信号(V5)は、さまざまな負荷および/または静翼位置について固定回転数で前記ガスタービン(1)が運転される正常運転に由来する請求項8記載の方法。

【請求項10】

請求項1から9のいずれか1つに記載の方法で学習された単数または複数のニューラルネットワークに基づいてガスタービン(1)を監視するための方法であって、前記ガスタービンの運転時に：

50

- 少なくとも1つの動的圧力信号(V5)が前記ガスタービン(1)の圧縮機(2)の内部または表面の少なくとも1つの圧力センサ(8)によって、また前記ガスタービン(1)の単数または複数の運転パラメータ(V1、V2、V3、V4)が他のセンサ(4、5、6、7)によって、前記ガスタービン(1)の正常運転時に測定され;

- 前記動的圧力信号(V5)が周波数分析され、これにより前記動的圧力信号(V5)の周波数スペクトルの単数または複数のパラメータが算定され;

- 前記単数または複数の測定された運転パラメータ(V1、V2、V3、V4)と前記動的圧力信号(V5)の前記周波数スペクトルの前記単数または複数のパラメータが入力変量として前記単数または複数の学習済のニューラルネットワークに供給され、前記単数または複数のニューラルネットワークの出力変量として少なくとも1つの診断特性値が出力される方法。

10

【請求項11】

単数または複数の前記診断特性値が所定の値の範囲外にあるとき警報信号が出力される請求項10記載の方法。

【請求項12】

請求項1から9のいずれか1つに記載の方法で学習された単数または複数のニューラルネットワークに基づいてガスタービン(1)を監視するための装置であって、

- 前記ガスタービン(1)の運転時に前記ガスタービン(1)の圧縮機(2)の内部または表面で少なくとも1つの動的圧力信号(V5)を測定するための少なくとも1つの圧力センサ(8)と、前記ガスタービン(1)の単数または複数の運転パラメータ(V1、V2、V3、V4)を測定するための単数または複数の他のセンサと、

20

- 前記動的圧力信号(V5)に周波数分析を施すことができ、これにより前記動的圧力信号(V5)の周波数スペクトルの単数または複数のパラメータが算定されるようにする周波数分析装置と、

- 前記単数または複数の測定された運転パラメータ(V1、V2、V3、V4)と前記動的圧力信号(V5)の前記周波数スペクトルの前記単数または複数のパラメータを入力変量として入力可能でありかつ前記少なくとも1つの診断特性値を出力変量として出力することのできる前記単数または複数のニューラルネットワークとを含む装置。

【請求項13】

請求項12記載の装置を含むガスタービン。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ガスタービンの運転を分析するための方法およびガスタービンの運転を監視するための方法に関する。

【背景技術】

【0002】

発電用、産業用および航空エンジン用の最新のガスタービンは大抵の場合多段軸流圧縮機を含む。この多段軸流圧縮機は運転中さまざまな摩耗、汚染およびその他の破損機構に曝されており、これらが圧縮機の機能を損なう。正常状態とは異なるこのような機械状態を適時に検知することは、危険な運転状態も許容外の摩耗も防止するために予防的維持補修措置を開始するための重要な前提条件である。

40

【0003】

最新ガスタービンの診断および監視では摩耗および破損を明確に分類し定量化することが特別重要である。多段軸流圧縮機を備えたガスタービンでは、摩耗特徴もしくは破損特徴がいずれの圧縮段に現れるのか、そして規定された限界値に対してその破損がどの程度強いのかもしくはどの程度進展しているのかを精確に明示できることが特に望ましい。さらに、ガスタービン用診断監視方法は回転している正常運転中に実行可能でなければなら

50

ず、タービンの停止を必要としてはならないであろう。

【0004】

ガスタービン用のさまざまな診断・監視方法が先行技術から知られている。例えば、独  
国特許出願公開第4012278A1号明細書はニューラルネットワークモデルを使った  
蒸気タービン設備用状態診断システムを開示している。モデルを用いてこのシステムは、  
運転状態に依存した振動の発生時に運転状態を表す出力信号を発生するために、これらの  
振動について複数の情報パターンを予め学習することができる。機械的または音響的振動  
の波形、振動または電磁振動がこのため使用され処理される。

さらに、米国特許出願公開第2002/0013664A1号明細書により機械状態に  
基づいて回転部品を監視するための品質もしくは分類機構が公知である。可能な入力変量  
として圧縮機空気の圧力脈動を援用することができる。他の方法が米国特許第70279  
53B2号明細書から知られている。

例えば、観察すべき各圧縮機段用に圧力センサが利用される米国特許第7027953  
B2号明細書の方法等のこれらの方法は、大量のセンサの態様の非常に大きな計装設備を  
必要とし、例えば翼損失等の重大な損傷のみを検出することができる。これらの方法はさ  
らに多段軸流圧縮機を備えたガスタービンにおいて応用する場合これらの損傷を精確に1  
つの圧縮機段に関係付けることができない。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

本発明の課題は、タービンの摩耗および破損の精確な診断を僅かな数のセンサで可能と  
するガスタービンの運転を分析し監視するための方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0006】

この課題は、本願の独立請求項によって解決される。本発明の諸構成は、従属請求項に  
明示されている。

【0007】

本発明方法によれば、前記ガスタービンの正常運転に基づいて単数または複数のニュー  
ラルネットワークが学習される。その際まず、前記タービン圧縮機の内部または表面もし  
くは背後の少なくとも1つの圧力センサによって動的圧力信号が測定される。ここで動的  
圧力信号は、圧力信号の時間的変化が検出されることを意味する。圧力信号を検出するた  
めの好ましいサンプリング周波数はkHz範囲内である。圧縮機内での圧力変化は静翼の  
脇を動翼が通過、すなわち走り抜けることによって発生し、そのことから、圧縮された空  
気内に相応する圧力変動が生じる。この動的圧力信号の他にさらに、他のセンサによって  
前記ガスタービンの単数または複数の運転パラメータが測定される。こうして本発明に係  
る方法はタービンの運転中に実行することができる。場合によっては、前記動的圧力信号  
と前記他の運転パラメータは既に予め検出しておくことができ、引き続き本発明に係る方  
法で使用するために例えばファイルから読み込むことができる。

【0008】

本発明によれば前記動的圧力信号が周波数分析され、これにより前記圧力信号の周波数  
スペクトルの単数または複数のパラメータが算定される。その際に、各圧縮機段について  
静翼と動翼との相互作用によって圧縮機内で周期的に圧力変動が生成され、これらの圧力  
変動が周期的信号をもたらす、この周期的信号は正常運転もしくはそれとは異なる運転状  
態を特定するのに利用することができる、という知見が利用される。

【0009】

最後に、前記単数または複数の測定された運転パラメータと前記圧力信号の前記周波数  
スペクトルの前記単数または複数のパラメータとに基づいて単数または複数のニューラル  
ネットワークが学習され、このニューラルネットワークは前記単数または複数の測定され  
た運転パラメータと前記圧力信号の前記周波数スペクトルの前記単数または複数のパラメ  
ータとを入力変量として含み、また少なくとも1つの診断特性値を出力変量として有し、

10

20

30

40

50

この診断特性値は前記入力変量に依存して前記ガスタービンの正常運転の存在確率を表す。

#### 【0010】

本発明に係る方法は、ニューラルネットワークと組合せて動的圧力信号を分析することによって僅かな数のセンサでガスタービン圧縮機の正常運転を記述できることを特徴としている。その際、本方法は任意のガスタービンに広く応用することができ、検討するガスタービンの運転パラメータと圧力信号を測定することによって、当初にのみ学習すればよい。引き続き監視運転において次にニューラルネットワークでもって、学習した正常運転との違いあるいはそれとの偏差は、監視時に検出された運転パラメータを動的圧力信号も含めて入力変量としてニューラルネットワークに供給することによって、簡単に確認することができる。

10

本発明に係る方法は、多数の圧縮機段を備えたガスタービンの多段圧縮機用に利用され、その場合前記周波数分析によって各圧縮機段について前記周波数スペクトルのパラメータとして特性周波数帯域が算定され、各特性周波数帯域についてそこに含まれた前記圧力信号のエネルギー成分が特に  $rms$  ( $rms = \text{Root Mean Square}$ ) 値として計算される。このエネルギー成分は単数または複数のニューラルネットワーク用の入力変量として使用される。 $rms$  値は先行技術から十分に知られており、個々の周波数に割り当てられた振幅を周波数帯域内の周波数にわたって積分することによって得られる。こうして本発明に係る方法は多段圧縮機用にきわめて良好に適している。というのも、個々の圧縮機段の特性は周波数分析によって動的圧力信号から算定可能な相応する周波数帯域によってごく良好に記述されるからである。こうして、個々の圧縮機段について特別に欠陥を検出できる可能性が提供される。 $rms$  値の代わりに、もしくはそれを補足して、1つの特性周波数帯域の1つの周波数線の振幅最大値または隣接する複数の周波数線の振幅最大値を入力変量として利用することもできる。

20

#### 【0011】

本発明に係る方法において好ましくは、先行技術から十分に知られているいわゆる動径基底関数ネットワーク (RBF ネットワークとも称される) が使用される。同様に、このようなネットワークの改良物を使用することができる。これらのネットワークは隠された層の中に多数の動径基底関数、例えばガウス関数を含み、これらガウス関数のパラメータが学習される。ここに述べる発明では、測定された運転パラメータと動的圧力とのパラメータ組合せが正常運転時に現れる確率は動径基底関数の目標変量としてトレーニングされる。鋼圧延装置内での圧延力の監視に関連した動径基底関数ネットワークの使用が国際公開第 99/48020A2 号パンフレットに述べられている。そこに開示された諸原理は同様にガスタービン圧縮機の本発明に係る分析に転用することができる。

30

#### 【0012】

本発明に係る方法の他の好ましい 1 実施形態において前記少なくとも 1 つの診断特性値は信頼値であり、この信頼値は 0 ~ 1 の範囲内で正規化されており、かつ前記入力変量の各パラメータ組合せがガスタービンの正常運転時に既知のパラメータ組合せである確率を表す。こうして診断特性値の簡単な表現が得られ、1 付近の信頼値は特にガスタービンの正常運転が存在することを示し、信頼値が 0.5 未満であることは圧縮機の運転に欠陥の存在を推測させる異常なパラメータ組合せが現れたことを示す。

40

#### 【0013】

特別好ましい 1 実施形態において本発明に係る方法は多数の圧縮機段を備えたガスタービンの多段圧縮機用に利用され、その場合前記周波数分析によって各圧縮機段について前記周波数スペクトルのパラメータとして特性周波数帯域が算定され、各特性周波数帯域についてそこに含まれた前記圧力信号のエネルギー成分が特に  $rms$  ( $rms = \text{Root Mean Square}$ ) 値として計算される。このエネルギー成分は単数または複数のニューラルネットワーク用の入力変量として使用される。 $rms$  値は先行技術から十分に知られており、個

50

々の周波数に割り当てられた振幅を前記周波数帯域内の周波数にわたって積分することによって得られる。こうして本発明に係る方法は多段圧縮機用にきわめて良好に適している。というのも、個々の圧縮機段の特性は、周波数分析によって動的圧力信号から算定可能な相応する周波数帯域によってごく良好に記述されるからである。こうして、個々の圧縮機段について特別に欠陥を検出できる可能性が提供される。rms値の代わりに、もしくはそれを補足して、1つの特性周波数帯域の1つの周波数線の振幅最大値または隣接する複数の周波数線の複数の振幅最大値を入力変量として利用することもできる。

【0014】

本発明に係る方法の他の1構成において、1つの特性周波数帯域のエネルギー成分と前記特性周波数帯域の高調波のエネルギー成分との比を前記ニューラルネットワークの学習のために前記周波数スペクトルの他のパラメータとして考慮することができる。

10

【0015】

本発明に係る方法を多段圧縮機に応用する場合、好ましくは各圧縮機段について1つのニューラルネットワークが学習され、前記周波数スペクトルの、1つの特性周波数帯域に付属するパラメータが入力変量として各ニューラルネットワークに割り当てられる。つまりこの割当ては各圧縮機段の特性周波数によって得られ、この特性周波数は圧縮機段の翼数とガスタービンの実際回転数とから生じる。各ニューラルネットワークは出力変量として診断特性値を有し、この診断特性値は前記入力変量に依存して各圧縮機段の正常運転の存在することの確率を表す。こうしてガスタービンの監視にニューラルネットワークを使用する場合どの圧縮機段に欠陥が存在するのかを検出することができる。他の1構成において圧縮機段の個々の診断特性値は総合診断特性値へとまとめることができ、このまとめは特定の規則、例えばファジー規則あるいは離散的規則に基づいて行われる。

20

【0016】

本発明に係る方法の好ましい1実施形態において、動的圧力信号の周波数分析のために、僅かな演算時間しか必要としない高速フーリエ変換が利用され、これは前記信号を時間領域から周波数領域に変換する。

【0017】

本発明により動的圧力信号の他に検出される運転パラメータとして考慮に値するのは単数または複数の下記パラメータである：

- ガスタービンの回転数；
- ガスタービンの負荷；
- 周囲圧力；
- 周囲温度；
- 空気湿度；
- ガスタービンの圧縮機の静翼位置。

30

【0018】

相応する運転パラメータと動的圧力信号が算定される適切な正常運転は、好ましくは、この運転中にさまざまな負荷および/または静翼位置について固定回転数でガスタービンが運転されるように行なわれる。

【0019】

ガスタービンの正常運転に基づいてニューラルネットワークが学習される上記方法は特にコンピュータプログラム製品として実現することができる。このコンピュータプログラム製品は、プログラムが計算機で実行されるとき本方法を実施するための、機械読取可能な媒体に記憶されたプログラムコードを含む。

40

【0020】

既に上で述べたように、本発明により学習されたニューラルネットワークは引き続き、正常運転とは異なる運転状態を確認するためにガスタービンを監視するのに利用される。それゆえに本発明は上記方法で学習された単数または複数のネットワークに基づいてガスタービンを監視するための方法も含む。これらの監視方法では実質的に、相応する学習方法における同じ変量が測定される。ニューラルネットワークの学習の代わりに、測定さ

50

れた変量はいまや入力変量として、学習されたネットワークに供給され、結果として得られる相応する診断特性値は正常運転状態がいかなる確率で存在するのかを表す。

【0021】

こうして特にガスタービン運転中の監視方法において下記ステップが実行される：

- 少なくとも1つの動的圧力信号がガスタービンの圧縮機の内部または表面の少なくとも1つの圧力センサによって測定され、さらにガスタービンの単数または複数の運転パラメータが他のセンサによって測定される。

- 前記動的圧力信号が周波数分析を施され、これにより圧力信号の周波数スペクトルの単数または複数のパラメータが算定される。

- 前記単数または複数の測定された運転パラメータと前記圧力信号の周波数スペクトルの単数または複数のパラメータが入力変量として単数または複数の学習されたニューラルネットワークに供給され、この単数または複数のニューラルネットワークの出力変量として少なくとも1つの診断特性値が出力される。

10

【0022】

場合によっては、この監視方法において、単数または複数の前記診断特性値が所定の値の範囲外にあるとき、すなわちガスタービンの正常運転とは異なる状態が高い確率で存在することが診断特性値で表示されるとき、警報信号を出力することができる。

【0023】

本発明は上記監視方法の他にさらに、上記監視方法を実施できるよう形成されたガスタービン監視装置を含む。このような装置は特に下記構成要素を含む：

20

- 前記ガスタービンの運転時に前記ガスタービンの圧縮機の内部または表面で少なくとも1つの動的圧力信号を測定するための少なくとも1つの圧力センサと、前記ガスタービンの単数または複数の運転パラメータを測定するための単数または複数の他のセンサ；

- 前記動的圧力信号に周波数分析を施すことができ、これにより前記圧力信号の周波数スペクトルの単数または複数のパラメータが算定されるようにする周波数分析装置；

- 前記単数または複数の測定された運転パラメータと前記圧力信号の前記周波数スペクトルの前記単数または複数のパラメータを入力変量として入力可能でありかつ前記少なくとも1つの診断特性値を出力変量として出力することのできる前記単数または複数のニューラルネットワーク。

【0024】

30

好ましくはこの監視装置はさらに、ニューラルネットワークの上記学習を正常運転時に実行することのできる手段も含む。

【0025】

本発明はさらに、本発明に係るガスタービン監視装置を含むガスタービンに関する。

【0026】

以下、添付図に基づいて本発明の実施例が詳細に説明される。

【図面の簡単な説明】

【0027】

【図1】本発明の1実施形態によるガスタービン運転監視方法の略図である。

【図2】動的圧力信号の周波数スペクトルの、本発明の1実施形態により算定されたパラメータを明らかとする線図である。

40

【図3】本発明の1実施形態において判定されたガスタービン圧力信号のrms値の、ガスタービンの変化する負荷と静翼位置とに依存した時間的変化を示す線図である。

【発明を実施するための形態】

【0028】

図1は、本発明に係るガスタービン運転監視方法の1実施形態の主要な方法ステップを示すフローチャートである。図1の実施形態において監視されるガスタービン1はその構造がそれ自体知られており、それゆえに簡単に説明されている。このガスタービンは複数の動翼ディスクおよび静翼列を備えた多段軸流圧縮機2を含み、複数の静翼および動翼を備えた多数の圧縮機段が圧縮機内に形成されている。圧縮機内で動翼に対する空気の流れ

50

角度は静翼によって調整され、動翼は空気を圧縮してさらに移送する。軸流圧縮機 2 にタービン 3 内で燃焼室が続き、圧縮機を介して供給される空気によってこれに相応する燃料が燃焼室内で燃焼し、これによりタービンが駆動される。

【 0 0 2 9 】

図 1 に示すタービン内に設けられた多数のセンサがタービンの相応する運転パラメータを検出する。センサ 4 は周囲温度を測定する温度センサであり、相応する測定信号 V 1 を出力する。センサ 5 は周囲の空気圧力を測定する圧力センサであり、相応する測定信号 V 2 を出力する。符号 6 とした湿度センサは空気湿度を測定し、相応する測定信号 V 3 を出力する。さらに設けられているセンサ 7 は圧縮機の入口でそこに設けられている変位可能な静翼の位置を測定する。ガスタービン内での静翼の位置は相応する調整機構を介して変更することができる。静翼位置の測定値は図 1 で符号 V 4 とされている。

10

【 0 0 3 0 】

最後に、圧縮機の出口に設けられている圧力センサ 8 は圧縮機出口で圧力を測定信号 V 5 として動的に測定する。動的とはこの場合、相応するサンプリング周波数で音圧の時間的変化が検出され、圧力の時間的挙動が検出されることを意味する。特に、サンプリング周波数が kHz 範囲以上のとき測定は動的である。その際、測定される圧力信号が発生するのは、運転時に個々の圧縮機段内で圧縮機動翼が静翼を通過し、これにより圧縮空気中に周期的圧力波が生成されることによってである。1 つの圧力波の周期は各圧縮機段内の静翼および動翼の数に依存している。従って、検出される動的圧力信号は圧縮機段が多数なため複数の周期的成分を含む。

20

【 0 0 3 1 】

単一の圧力センサ 8 を使用する代わりに複数の圧力センサを利用することもできる。特に、幾つかのガスタービンにおいて燃焼安定性を監視するためにパーナ領域で利用されるような既存の圧力センサをこの測定に援用することができる。さらに、ガスタービンの出口ディフューザまたは圧縮機空気集合室内に圧力センサを設置することが考えられる。本発明によれば信号 V 5 はまずステップ S 1 において A/D 変換を施され、最後にステップ S 2 においてデジタル信号で FFT 変換 (FFT = 高速フーリエ変換) が実行されて信号の周波数スペクトルが算定される。ステップ S 2 において実行される FFT 変換はガスタービンの回転数と静翼および動翼の数とから生じる周波数にごく精密に調整されているので、個々の周波数は明確に分離して圧縮機段に割り当てることができる。FFT 変換の結果として得られるのは個々の周波数の相応する振幅を有する複数の特性周波数帯域である。

30

【 0 0 3 2 】

このような周波数スペクトルが図 2 の線図に例示的に示してある。この線図はキャンベル線図とも称される。その際、圧力信号内の周波数  $f$  は横座標に沿って、時間  $t$  は縦座標に沿って示してある。個々の周波数の振幅が図 2 に色分けしてあるが、白黒表現のゆえにこの色分けは明らかでない。普通、赤色は高振幅の表示に使用される。例示的に図 2 にマークした領域 B に高振幅がある。図 2 の表現においてタービンの特定の運転変量が時間  $t$  にわたって変化している。特に、圧縮機の負荷と静翼位置が変化している。そのことから最終的に振幅の変化が生じるが、しかしこれらの特性周波数帯域はその時間にわたって維持される。図 2 で特別明らかとなるのが周波数帯域 F 1、F 2、F 3、F 4 である。その際、周波数帯域 F 1 ~ F 4 はガスタービン 1 の軸流圧縮機 2 の 1 つの圧縮機段をそれぞれ表す。すなわち、特定回転数で運転するとき特性周波数を有する 1 つの周波数帯域が各圧縮機段に割り当てられている。

40

【 0 0 3 3 】

図 1 のステップ S 3 ではいまや図 2 に示す周波数帯域の評価が行われ、場合によっては相応するモデルで補正が行われる。ステップ S 3 では各周波数帯域について帯域の周波数にわたる積分によって各周波数帯域内で圧力信号のエネルギー成分が算定され、このエネルギー成分はいわゆる rms 値 (rms = Root Mean Square) として出力される。この rms 値は当該技術の専門家に十分知られた変数である。こうしてステップ S 3 の結果とし

50

て各圧縮機段について特性  $rms$  値が得られる。図 1 では例示的に 4 つの圧縮機段について 4 つの  $rms$  値  $R1 \sim R4$  が示してある。

【0034】

図 3 は相応する線図においてガスタービン圧縮機の圧縮機段にそれぞれ割り当てられた 20 の特性周波数帯域を有するタービン内の  $rms$  値の時間的推移を再度明らかとする。その際、横座標に沿って時間が秒単位で、また縦座標に沿って個々の帯域の相応する  $rms$  値がプロットされている。この線図はやはり色分けされており、各帯域は別の色で表現されているが、しかしそのことは図 3 の白黒表現のゆえに明らかでない。その際、帯域 1 ~ 帯域 20 の個々の周波数帯域は線図の右縁の凡例に示してある。 $rms$  値の他に図 3 の線図はさらに、運転中にタービンで行われる負荷変更および静翼位置変更を含む。そのことは負荷の表示 "Load" と静翼の表示 "IGV" を有する相応する線で凡例に表示されている。相応する推移を判別できるようにするために負荷の時間的変化の線は  $L1$  で、また静翼位置の線は  $L2$  で示してある。その際、負荷もしくは静翼位置の個々の値はパーセント値として線図右縁の縦座標によって示してある。

10

【0035】

図 3 から一方で明らかとなるのは、圧縮機の質量流量の変更によって達成される出力変更時に、質量流量が僅かに変化する場合でも  $rms$  値内に非常に明確な応答が得られることである。他方で、運転状態に依存して複雑なシステム応答が生じ得ることも明らかとなる。その他の運転パラメータのうち図 3 には負荷と静翼位置を示したが、これらの運転パラメータと組合せて  $rms$  値によって、本発明によれば、ガスタービンもしくは圧縮機の異常挙動を推定することができる。

20

【0036】

測定された運転パラメータと  $rms$  値とから好適な仕方で診断特性値を導き出すために本発明によればニューラルネットワークが利用される。本発明のここに述べる実施形態において好ましくは、RBF ネットワークとしても知られた動径基底関数に基づくニューラルモデルが利用される。このようなネットワークの基本構造は先行技術から十分に知られており、それゆえにここで詳しくは説明しない。このようなネットワークは 1 つの入力層と 1 つの出力層とから成り、入力層内の入力変量に基づいて動径基底関数、例えばガウス関数のパラメータを学習し、これにより関数的挙動と入力変量の分布が近似される。ここに述べた実施形態では各圧縮機段について、運転パラメータと圧縮機段の相応する  $rms$  値とを有する相応する RBF ネットワークが学習された。この学習はガスタービンの正常運転時の測定に基づいて実行された。

30

【0037】

個々の RBF ネットワークは 0 ~ 1 の間で正規化された信頼値を出力変量として発生する。この信頼値は 1 セットの入力変量について、すなわち特定時点に存在する運転パラメータと相応する  $rms$  値とのセットについて、正常運転時に  $rms$  値と運転パラメータとのこのような組合せの現れる確率がどの程度高いのかを示す。この信頼値が高ければ高いほど、正常運転が実際に存在する確率は一層高い。それに対して低い信頼値は、ガスタービンの相応する圧縮機内に欠陥運転が高い確率で現れることを意味する。

【0038】

相応に学習したニューラルネットワークは近似的データカプセルとして機能し、図 1 のステップ S4 において測定信号  $V1 \sim V4$  による個々の運転パラメータと  $rms$  値  $R1 \sim R4$  が入力変量として供給される。ステップ S4 は例示的に 3 つのサブステップ S401、S402、S403 に区分されている。ステップ S401 では運転パラメータと  $rms$  値  $R1$ 、 $R2$  が対応する圧縮機段の各ニューラルネットワークに供給される。ステップ S402 では  $rms$  値  $R3$  が、ステップ S403 では  $rms$  値  $R4$  が、対応する圧縮機段のニューラルネットワークに供給される。各ニューラルネットワークについてステップ S4 の結果として得られるのはいまや値範囲 0 ~ 1 の対応する信頼値である。その際例えば 0.5 ~ 1 の信頼値では、正常運転状態が存在するとの判断を導き出すことができよう。それに対して 0.5 未満の信頼値では、欠陥運転が存在すると診断される。この診断特性値

40

50

は最後にステップS5で出力される。ニューラルネットワーク用入力変量として運転パラメータを選択するとき、個々のパラメータが明確な関係にあることは不可欠ではない。むしろ、ニューラルモデルのトレーニングのために十分な運転データが利用可能であるならパラメータ組合せのあらゆる分布は学習することができる。異常状態検知時の選択性を高めるために、システムに決定的に影響する全パラメータをニューラルネットワークの学習時に入力変量として取り入れるのが望ましい。

【0039】

要約するなら、上記方法でもって各圧縮機段の周波数帯域の特性エネルギー値についてRBFネットワークの態様の1つのデータカプセル、場合によっては複数のデータカプセルはさまざまなパラメータ組合せの幅広いスペクトルに亘ってトレーニングされ、このトレーニングされたデータカプセルは引き続き、欠陥運転を検出するためにガスタービンの監視に利用される。ガスタービンの学習時もしくは監視時にパラメータと見做されるのは特に回転数、負荷、前置静翼位置、空気圧力、周囲圧力、空気湿度等である。これらの変量は、特性周波数のエネルギー振幅と並んで、データカプセルの重要な入力変量である。付加的に特性周波数のrms値とその高周波帯域の高調波との比を取り入れることができる。さらに本発明に係る方法の1実施形態において個々のデータカプセルの信頼値はまとめることができる。これにより例えば正常運転の存在に関する総合信頼度を算定することができる。この算定は特に、個々の圧縮機段の挙動および作用に関する既知の関係を表現するファジー規則または離散的規則に基づいて行うことができる。結果として、僅かな数の圧力センサの測定値に基づく本発明に係る方法の前記実施形態でもってガスタービンの軸流圧縮機の個々の圧縮機段の品質および状態を診断することができる。

【0040】

本発明に係る方法でもって一連の利点を得られる。特に、圧縮機全体について圧縮機の状態を僅かな数の圧力センサで、例えば単一の圧力センサで診断することができ、そのことからガスタービン運転監視の総コストが減少する。本発明に係る方法はさらに、ガスタービン用に特別にまずトレーニング運転時にニューラルネットワークが学習され、引き続きこの学習したネットワークに基づいてガスタービンの監視が行われることによって、さまざまなガスタービンに容易に適合することができる。本発明に係る方法でもってさらに運転中にガスタービンの圧縮機全体の迅速かつ高頻度の監視が可能となり、特にガスタービンの稼働時間にわたって長期情報提供も可能となる。最後に、ガスタービンの正常状態に対する緩慢な変化も、長い期間にわたって信頼値を平均化することによって検知することができる。これにより維持補修費を減らすことができる。というのも、維持補修を固定間隔で実行しもしくは純予防的に実行する代わりに、本発明に係る診断によって損傷を早期に検出し、ガスタービンの損傷にとって重要な維持補修を実行できるからである。

【符号の説明】

【0041】

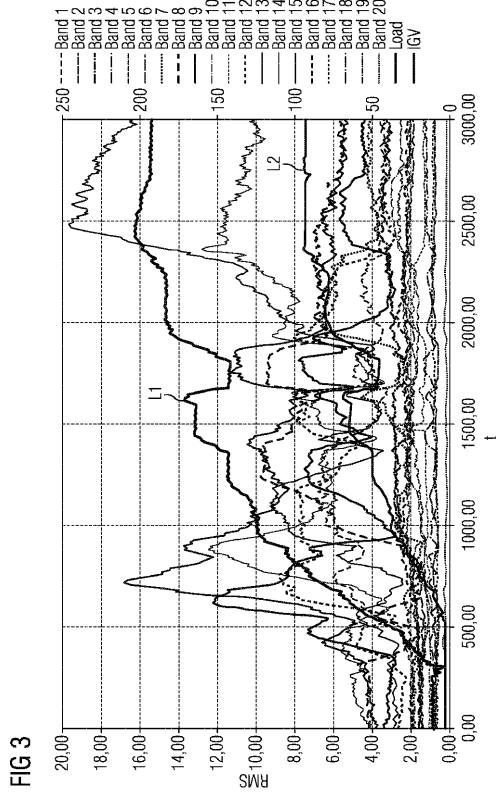
- 1 ガスタービン
- 2 圧縮機
- 4 ~ 8 センサ
- V1 ~ V4 運転パラメータ
- V5 圧力信号

10

20

30

40



【 図 2 】

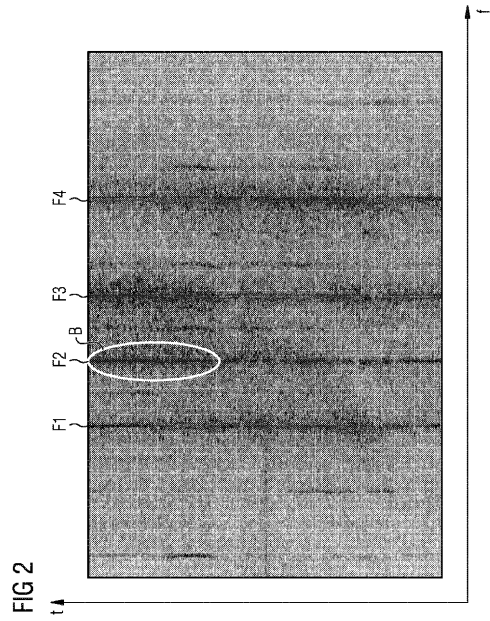


FIG 2

【 図 1 】

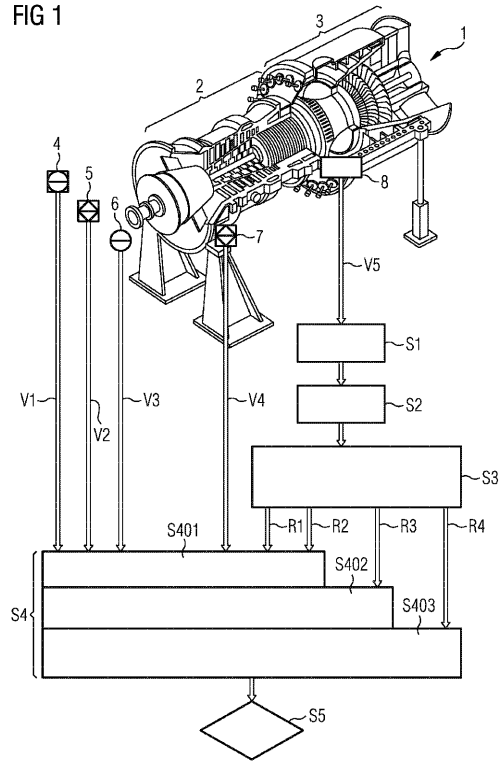
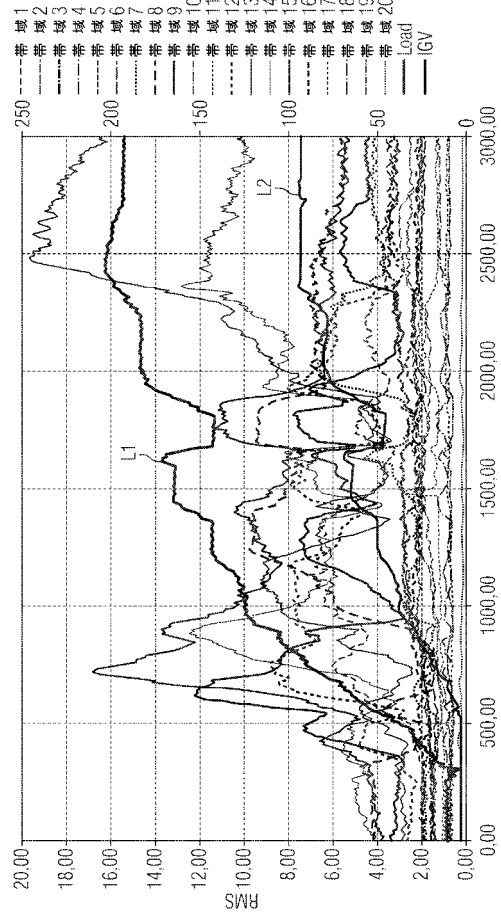


FIG 1

【 図 3 】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 プファイファー、ウヴェ  
ドイツ連邦共和国 1 2 5 5 7 ベルリン ヒルテンガルテン 8
- (72)発明者 シュテルツィング、フォルクマール  
ドイツ連邦共和国 8 5 5 7 9 ノイビベルク ツィレシュトラーセ 3 8

審査官 谷垣 圭二

- (56)参考文献 特開平02 - 272326 (JP, A)  
特表2004 - 501465 (JP, A)  
特開2005 - 155590 (JP, A)  
米国特許出願公開第2005 / 0096873 (US, A1)  
特開2003 - 149043 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
- |         |           |
|---------|-----------|
| G 0 1 M | 1 5 / 1 4 |
| F 0 1 D | 2 5 / 0 0 |
| F 0 2 C | 9 / 0 0   |
| G 0 5 B | 2 3 / 0 2 |