

ガスタービンスピードトロニック制御(電子制御)

Gas Turbine Speedtronic Controls (Electronic Control)

草場 正伸*
Masanobu Kusaba

上田 芳男*
Yashio Ueda

目黒 和利**
Kazutoshi Meguro

Recently the demand for gas turbine is on the rapid increase because of its quick starting characteristics, fully automated operation, low installing cost, and other advantages. In this article, a solid-state gas turbine control system adopted in the Hitachi-G E gas turbines (trade-named "Speedtronic") is introduced.

1. 緒 言

現在一般に市場に出されているガスタービンは大きく分けてジェットエンジンタイプとヘビィデューティタイプとがあり、いずれも近年急速に需要が拡大している。その理由としては急速起動と全自動化が容易であるなどの制御に関する項目に負うところが多い。ここでは最近日立-GEヘビィデューティタイプガスタービンに採用し始められたガスタービン制御装置(スピードトロニック)について述べる。日立製作所では現在1万kWから6万kW級のガスタービンを製作しているが、このすべての形式のガスタービンに本制御システムを採用していく方針である。

ガスタービンの制御装置は基本的には速度、負荷の要求に応じて燃料量を調節する機構であるということができる。しかしこの基本的要求に付随してガスタービン始動から着火、加速、同期、負荷上昇などを時限的に自動的に進行させるシーケンス関係、また高温ガスをエネルギー源に使用していることによる温度高に対する保護装置、高速回転体であることによる過速度あるいは過振動保護装置などの保安装置も制御装置の中に含めて考えなければならない。

スピードトロニックの特長は従来ガスタービン一般に採用されてきた機械油圧式をエレクトロニクス化することにより信頼性、耐久性を向上させるとともに、制御精度を高め、応答性を敏速化するというところにある。また標準化された制御装置を使用することにより船用や蒸気タービンとのコンバインドサイクルのガスタービンの各種応用分野にも容易に適用でき、複雑化したサイクルの運転も簡便な操作で可能になる。

2. スピードトロニックの概要

スピードトロニックの心臓部である制御パネル(図1)はソリッドステート化した多数のプリント板から成り立っている。このパネルによりガスタービンの速度、温度信号を受信するとともに負荷あるいは速度の設定を行ない、ガスタービンの燃料量を決定する電圧信号VCE(Variable Control Electronic)を出す。

スピードトロニック制御はデジタル、ロジック、アナログ、リレーの4種類の要素から成り、これらの要素が相互に関連しながらガスタービンを制御していく。次にこの4種類の制御基本要素について簡単に述べる。

(1) デジタル回路

これはガスタービンの速度、負荷制御部分に採用されており、速度、負荷の設定をデジタル的に行なうようにしてある。速

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所大みか工場

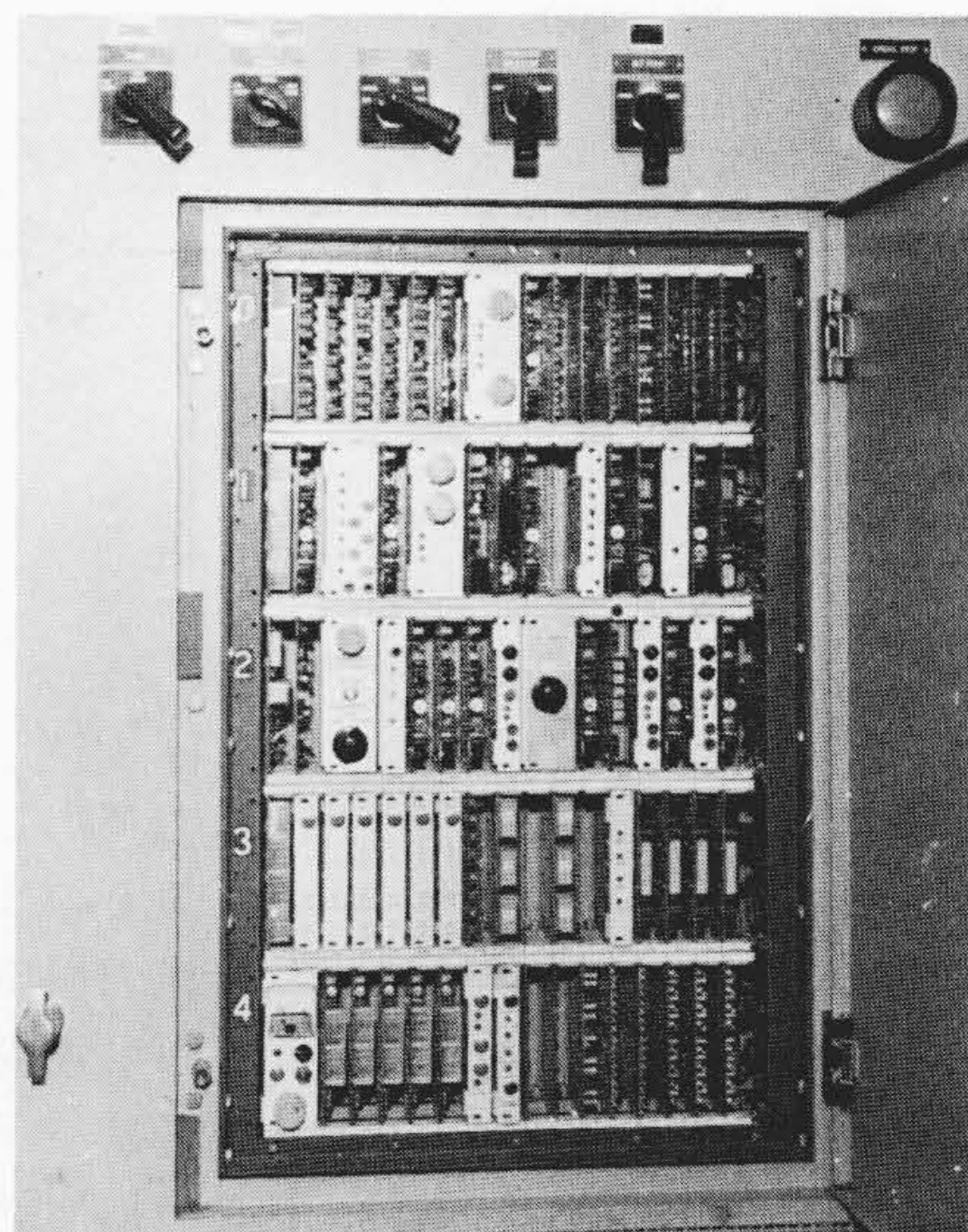


図1 スピードトロニック制御パネル

度の検出は速度に比例するパルスを発生する電磁ピックアップによって行なわれ、これと電気回路から出る速度、負荷の設定デジタル値とが比較され、その差によってガスタービンの速度あるいは負荷を制御する。デジタル制御は2進法計数器によって行なわれ、設定値は2進法表示ランプによって表示される。

(2) ロジック回路

この回路は制御シーケンスの中でも主要な制御回路および保護回路部分に採用され、“AND ゲート”、“OR ゲート”あるいはAD、DA変換器を利用して論理計算が行なわれる。

(3) アナログ回路

ガスタービンの温度、速度、起動制御はアナログ演算器によりそれぞれその制御目的に応じて比例、積分、微分制御を行ない燃料制御信号VCEを出す。

(4) リレー回路

主としてガスタービンの起動、停止を自動進行させるシーケンス関係に使用されている。

3. VCE 制御

VCE電圧は直接燃料量を制御する信号となるものでいかなる場合でもガスタービンに供給される燃料量はこのVCE電圧に比例するようになっている。VCEを制御する系統は3系統から成り立っており、それは起動制御、速度制御、温度制御である。図2はこのVCE制御系統図である。この3系統からは常時その系

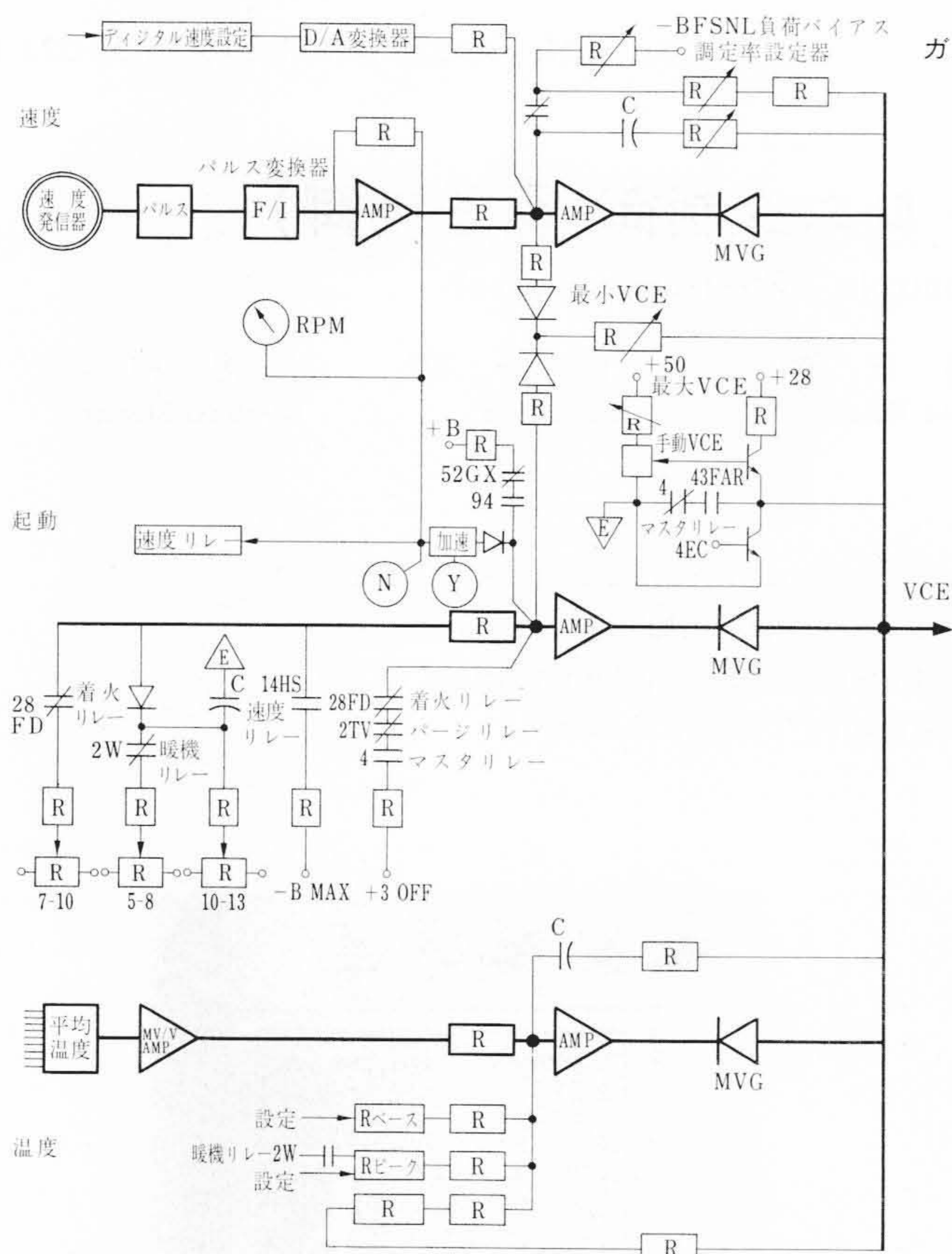


図2 V C E 制 御 系 統

統により要求されるVCE電圧信号を出力として出しているが、実際に燃料を制御するためのVCE信号となるものは3系統の中の最低電圧である。これは最終のVCE信号出力回路の前の最低電圧検出ゲート(Minimun Value Gate)によって達成される。この最低電圧より高い他の2系統からの出力信号はバックアップ信号となる。すなわち燃料制御は、起動、速度、温度制御のいずれか1系統の出力信号によって行なわれており、他の2系統からの出力信号は補助信号として常時待機していることになる。このため1系統に異常を生じてもガスタービン本体は異常運転を行なうことはなく他の系統にバックアップされ安全な運転を続ける。次にこの3系統のVCE制御について述べる。

3.1 起 動 制 御

これはガスタービン起動時の制御を行なうもので着火時、暖機時、加速時のVCE信号を規定し、ガスタービン起動時の熱衝撃が許容限度以下になるようにしている。着火、暖機、加速時のVCEはそれぞれ一定値が与えられており、移行時のステップ状変化に対しては一次遅れを与えることによって変化量を一定値以下に押えている。このほかガスタービンに対する最小の燃料量を確保する最低VCE、いかなる運転状態においても一定値以上の燃料が流れないようにする最高VCEを設定している。着火、暖機、加速などの開始指令はシーケンスリレーから与えられている。

3.2 温 度 制 御

ガスタービンは高温ガスを使用するため、温度制御は保安上重要な役割を果たしている。またガスタービンの定格出力は大気温度によって大きく変化するが、タービン燃焼温度は大気温度には無関係に一定値以下に制御されなければならない。タービン燃焼温度を直接測定することは、温度が高温過ぎること、温度分布が一定でないことなどにより得策ではない。このため排気ガスの温度を測定し、間接的に燃焼温度が制限値を越えないように制御している。測定温度は正確さが必要なため12本の熱電対によって排気ガス温度を検出しその平均値を使用している。この平均値を温度制御回路部分にフィードバックし、あらかじめ与えられている

温度設定値との比較を行ないその偏差によってVCEの値を制御している。温度制御は着火時には温度制限値を低くしておき、ガスタービンの加速段階では温度制限値が一定の割合で上昇するようにしてある。またベース運転時の温度制限値を上げてピーク運転あるいはピークリーズ運転を行なうこともできる。この場合のステップ状変化は一次遅れを与えてやりゆるやかに行なうようにしてある。

3.3 速度(負荷)制御

ガスタービン速度は速度に比例したパルスを送信する電磁ピックアップにより検知される。この信号が速度(負荷)設定値と比較されVCEを制御する。速度信号であるパルスはDA変換器によりアナログ量に変換され速度制御回路に導かれる。速度(負荷)の設定は速度(負荷)の設定スイッチによりDSP(Digital Set Point)のデジタル量を変えることによって行なわれる。このDSPはDA変換器によってアナログ量に変換され速度制御回路に導かれる。DSPは2進法演算器で計算されており、そのけた数は12で、これを10進法に直すと0から4,095までの値を取ることができる。ガスタービンの無負荷速度制御範囲は95%から107%までである。すなわちDSPが0のときは速度設定値は95%で、DSPが4,095のときは速度設定値は107%となることを意味している。ガスタービン起動時には同期を容易にするためDSPが常に100.3%になるように自動設定されており、自動同期に要する時間は秒単位である。同期後DSPは一定割合で増加していく。速度調定率を4%とした場合DSPが104%になった時定格負荷に達するわけであるが、この負荷上昇に要する時間は、急速の場合30秒、平常の場合に4分としてある。速度調定率は出力信号VCEのフィードバック回路に設けてある調定率設定抵抗器によって容易に変更することができ、またこのフィードバック回路をはずすことによって無調定率運転(Isochronous Operation)も可能である。無調定率運転の際は、負荷がどのように変化してもガスタービン速度、すなわち発電機出力サイクルは常に一定に維持される。

また本装置には起動時にガスタービン加速度が一定割合を越えないように制限する回路も含まれており、これにより通常速度上昇率が1%/sを越えた場合にはVCEを抑制するようになっている。この回路は負荷運転中にも生きており急激な負荷減少あるいは負荷しゃ断が生じ、ガスタービン速度が急上昇するような場合にも有効に働く。

4. 燃 料 制 御

ガスタービンの燃料量は前項で述べたVCE信号によって制御される。図3はこのVCE信号からガスタービン燃料ノズルに至るまでの燃料制御系統を示したものである。この図では液体燃料と気体燃料を同時に混焼できる系統を示しているが、単体の燃料を使用する場合にはどちらかの系統を削除して考えればよい。ガスタービンの燃料量は、着火時、無負荷時、全負荷時で大幅に変化しており、燃料流量の広範囲にわたって精度良き制御が必要である。また本部分では電気回路と機械、油圧回路が複雑に交差関連しているため、十分な信頼性のあるものでなければならない。また二重燃料系統においては、燃料切換えの際生ずる負荷変動を極力押えるためつりあいの取れた系統であることも重要である。

4.1 液体燃料系統

液体燃料は、VCE変換器の出力信号LCEによって制御される。VCE変換器は、燃料制御信号VCEを液体燃料信号LCE(Liquid Control Electronic)と気体燃料信号GCE(Gas Control Electronic)に変換する装置である。液体燃料のみを使用するガスタービンではVCE信号とLCE信号とが等しいものとなる。LCE信号はアナログ演算器を経たあと、燃料ポンプに付属している電

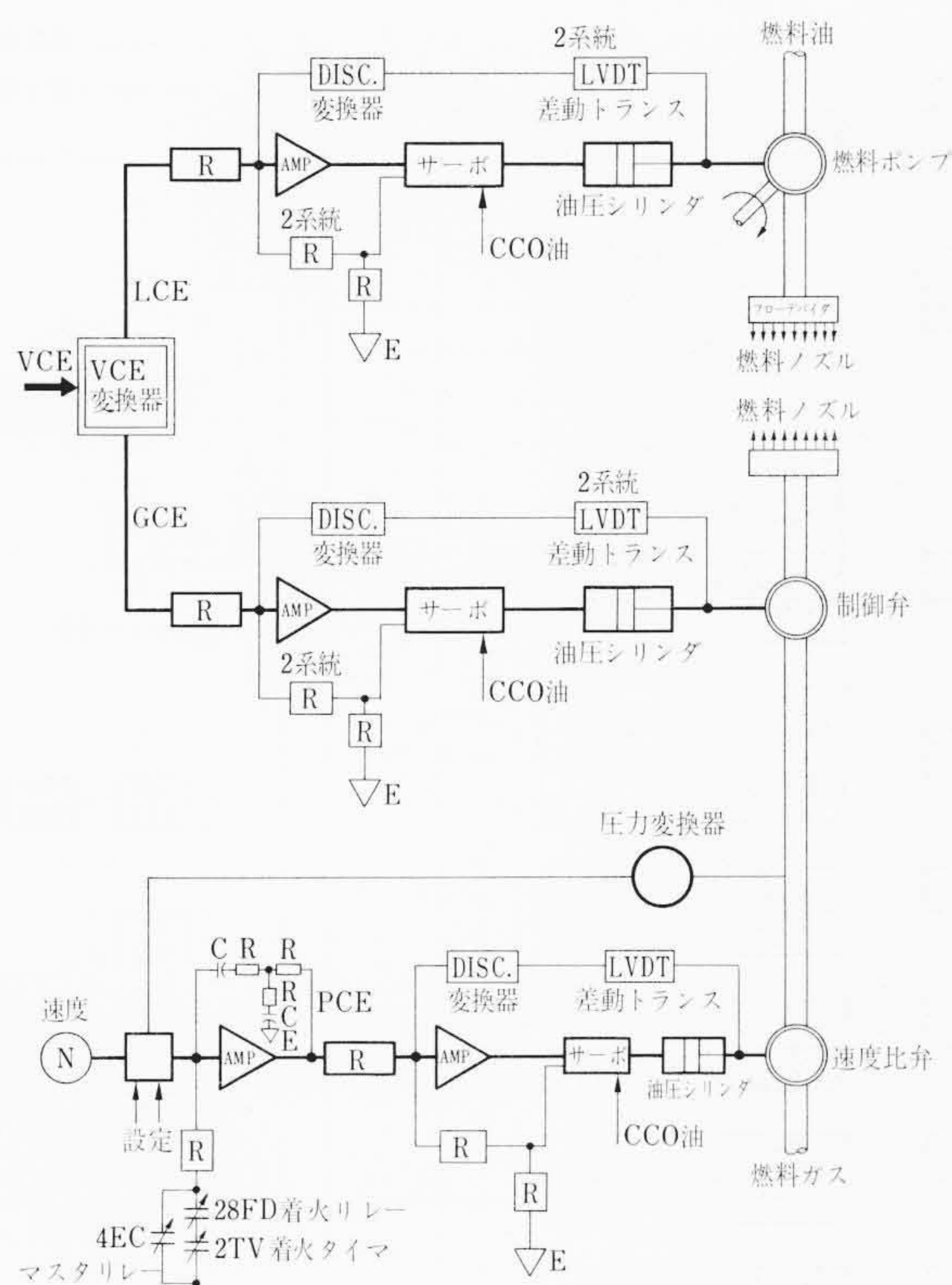


図3 燃料制御系統

油サーボを作動させ、油圧シリンダによって燃料ポンプのストロークを変える。燃料ポンプにはストローク可変容積ポンプが使用されており、燃料量はポンプ内のプランジャストロークに比例し制御される。このストロークを差動トランスLVDT(Linear Voltage Differential Transformer)により検知し、その出力信号をアナログ演算器にフィードバックする。この結果LCE信号とポンプストロークすなわち燃料流量は常に比例関係を保持することができる。燃料ポンプは軸駆動のため燃料量はガスタービン速度にも比例するようになっており、これは起動時の低燃料域での制御精度の向上に役だっている。すなわち着火時の低速域でVCE信号を相当大きく取っても実際の燃料量は微小となり制御精度は高くなる。したがって制御性の良くない微小ストローク位置で燃料ポンプを運転する必要がなくなる。信頼性を向上させるためポンプストロークとサーボ電流のフィードバック系統は二重系統になっている。1系統に接地、断線などの異状が生じてもガスタービンは安全に運転するようになっている。このとき異状はランプ表示により検知するようになっている。電油サーボの油圧源には100 kg/cm²程度の高圧油を用いて応答性を高めている。このように燃料ポンプにより昇圧され、計量された燃料油は、フローデバイダを通り、燃料ノズルから各燃焼器内に噴射される。フローデバイダの役目は、各燃焼器に入る燃料量を等分にし、各燃焼器の温度偏差をなくし、第1段ノズルおよびバケットの温度分布を均一にすることにある。

4.2 気体燃料系統

気体燃料系では、液体燃料系統と同様の電油サーボ系統によってガス制御弁のストロークを変え燃料量を調節している。制御弁の入口圧力が一定であれば気体燃料流量は制御弁のストロークすなわち気体燃料信号GCEに比例する。液体燃料系統では、燃料流量はLCEばかりでなく、ガスタービンの速度にも比例するようになっていたが、気体燃料系統ではこの役割を速度比弁によって行なっている。すなわちガスタービン速度検知器の信号により速度比弁の開度を調節し、ガス制御弁入口圧力がガスタービン速度に比例するように制御している。この結果、気体燃料系統にお

いても液体系統と同じく燃料流量は、燃料制御信号GCEとガスタービン速度に比例することとなり両系統間の制御上の差異はなくなる。気体燃料の場合には使用する燃料ガスによって大幅に発熱量が異なるが、その発熱量の差は速度比弁の設定比率を変えることによって調整される。

4.3 二重燃料系統

ここで述べる二重燃料系統とは気体燃料と液体燃料を同時に燃焼する系統を意味する。さきに述べた図3はこの二重燃料系統を示したもので、この系統により液体燃料、気体燃料の各相互への切換えおよび両者による混合燃焼あるいは気体燃料圧源が低下した場合の液体燃料への自動切換などの運転を行なうことができる。この切換操作は起動途中を除いて無負荷運転状態から全負荷時までの全負荷範囲において行なわれる。特色ある運転方式として、気体燃料圧低の場合の自動切換運転を具体的に述べると次のようになる。まず燃料ガス供給元でなんらかの原因でガス流量が欠乏しその供給圧力が低下すると、その圧力低下をガスタービン側で検知する。その検知信号により軸駆動燃料ポンプのクラッチを結合し、液体燃料の止弁を開く。一方、VCE変換器にはLCE信号を徐々に上げ、逆にGCE信号を下げる操作信号を与えるが、これらの和は常に一定になるように制御されており、そのためガスタービンに入るカロリー熱量は一定に維持される。ただし変換時の最初の30秒間だけは燃料油ラインを燃料油で満たすため必要な微小燃料を流すだけのLCEを与える。GCEが完全にLCEに切り換わると気体燃料側の止弁は自動的に閉じる。以上の動作はすべて自動的に行なわれ、かつこの間の負荷変動はゼロに近い。またこの切換えに要する時間は約1分程度である。図4は変換時におけるVCE、LCE、GCEの時間に対する変化程度を示すものである。

図5は上述した運転により燃料切換時の負荷変動がどの程度になるかを示すものである。この図から最大の負荷変動は5%程度であることがわかる。

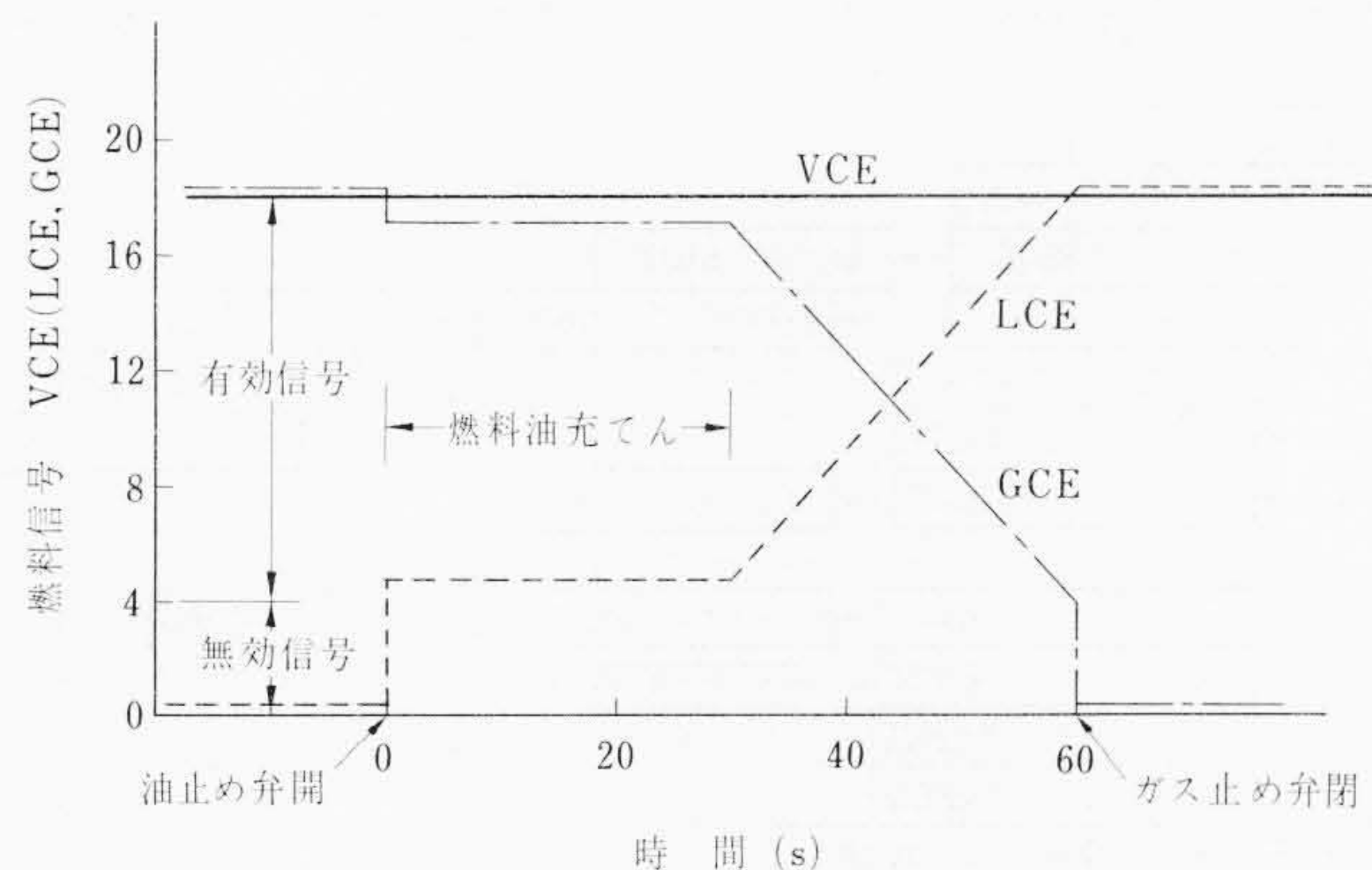


図4 燃料変換特性 (気体燃料→液体燃料)

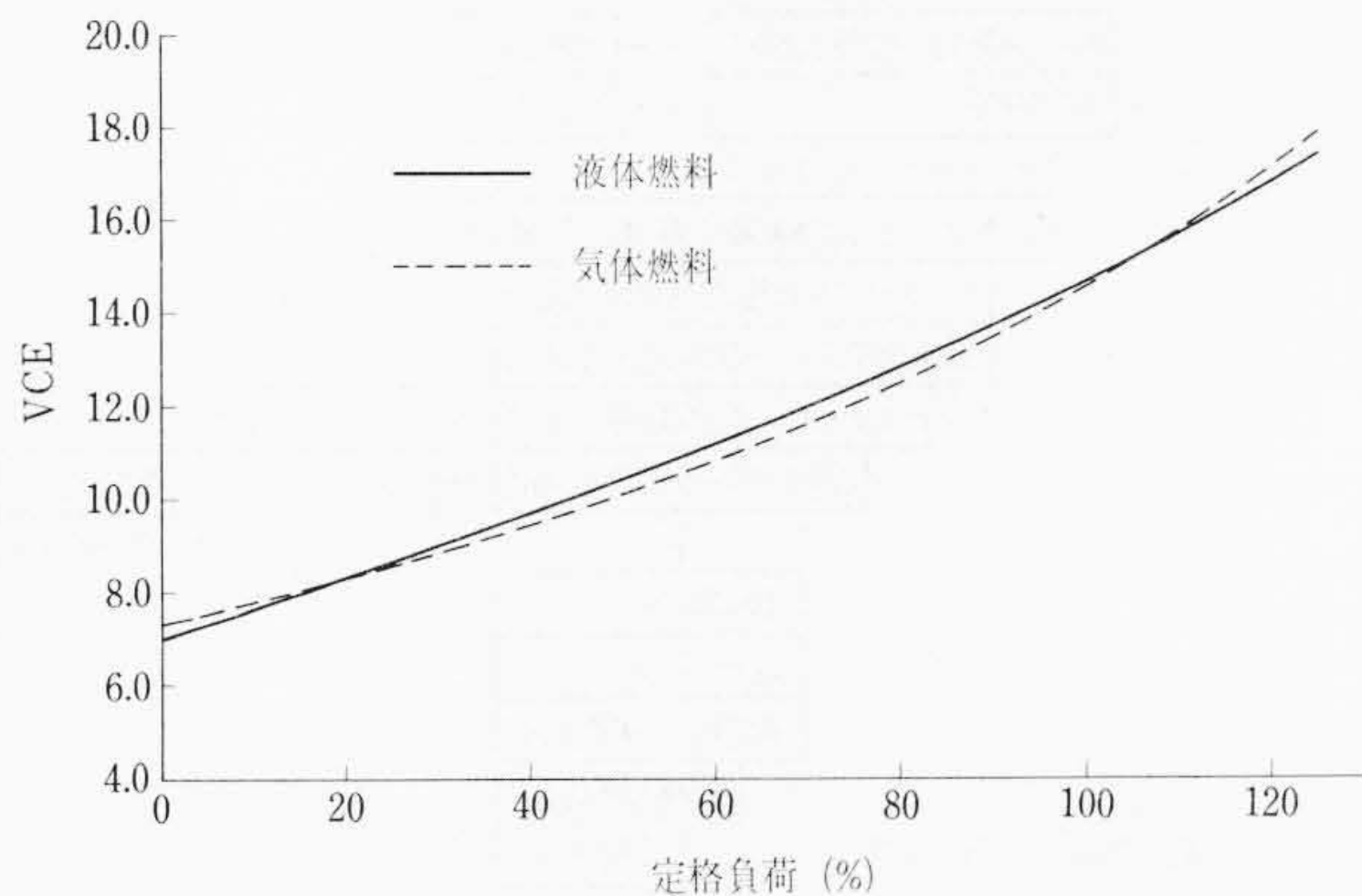


図5 負荷変化図

5. ガスタービン起動順序

ガスタービンに遠方制御盤あるいは現場制御盤より起動指令を与えると設定負荷に至るまで自動的にシーケンシャルに運転は進行し、その間人為的操作はいっさい不要である。まず起動指令により潤滑油ポンプなどの補機モータ類が起動し、油圧などが確立する。その後、起動装置のクラッチが結合し同時に始動トルクを軽減するためのターニング装置および起動用ディーゼルあるいはモータが始動する。これによりガスタービンは回転を始め、その速度が20%に達すると速度リレー14HMにより点火トランス、燃料止め弁、着火VCEが作動し燃料点火が行なわれる。その後30秒間は暖機運転が行なわれる。暖機完了後、排気温度制御点が一定の比率で上昇しガスタービンの速度はしだいに上昇する。速度上昇によりタービン効率ならびにコンプレッサ出口圧が増大すると、排気温度は下降きみとなり、タービン速度は急激に上昇する。この段階ではVCEはタービン加速度を一定に押えるよう働くため、タービン速度上昇は一定となる。この状態のままタービンは加速を続け、95%速度に達すると速度リレー14HSが働き、速度制御回路による速度制御が始まる。速度設定はDSP (Digital Set Point) により100.3%に設定されており、負荷側のサイクルが変動しない限り同期のための速度調整は不要となりそのまま同期投入が行なわれる。これ以降は負荷設定器の設定値までDSPを一定割合で上昇することにより負荷は自動的に上昇する。

図6は以上に述べた起動順序を図表化したものである。

6. ガスタービン保安装置

ガスタービンが正常な運転状態を継続中、異状状態が発生しそのままの運転継続が不可能な場合、自動的に燃料を停止しガスタービンをしゃ断したり、あるいは点検のために異状場所を表示したり、警報を発したりして運転員に注意を促す必要がある。

異状状態が生じた場合、ガスタービンしゃ断信号が発生し、燃料止り弁の操作油圧を切り、止り弁を閉にして燃料をしゃ断する。

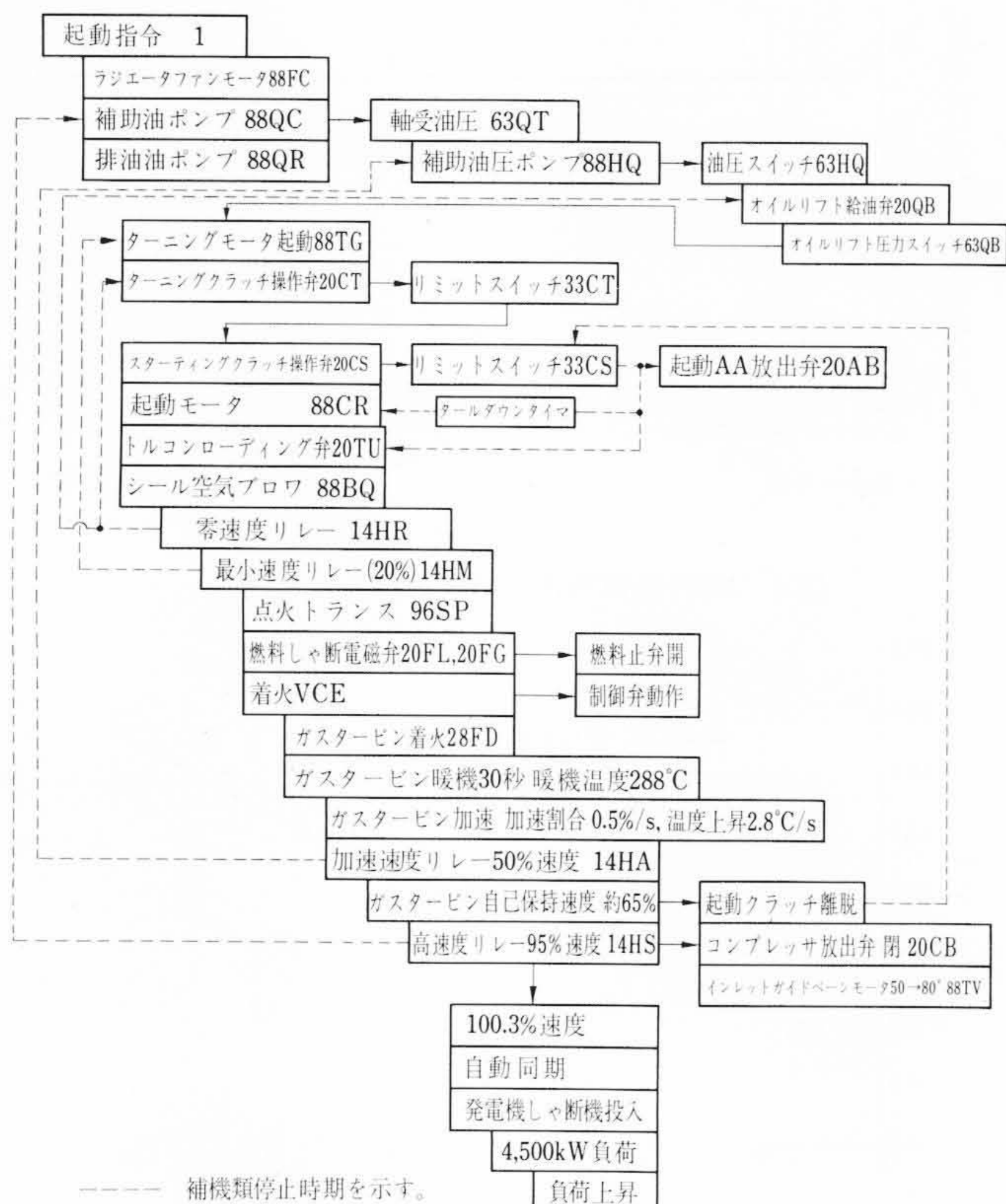


図6 ガスタービン起動順序 (60MWガスタービン)

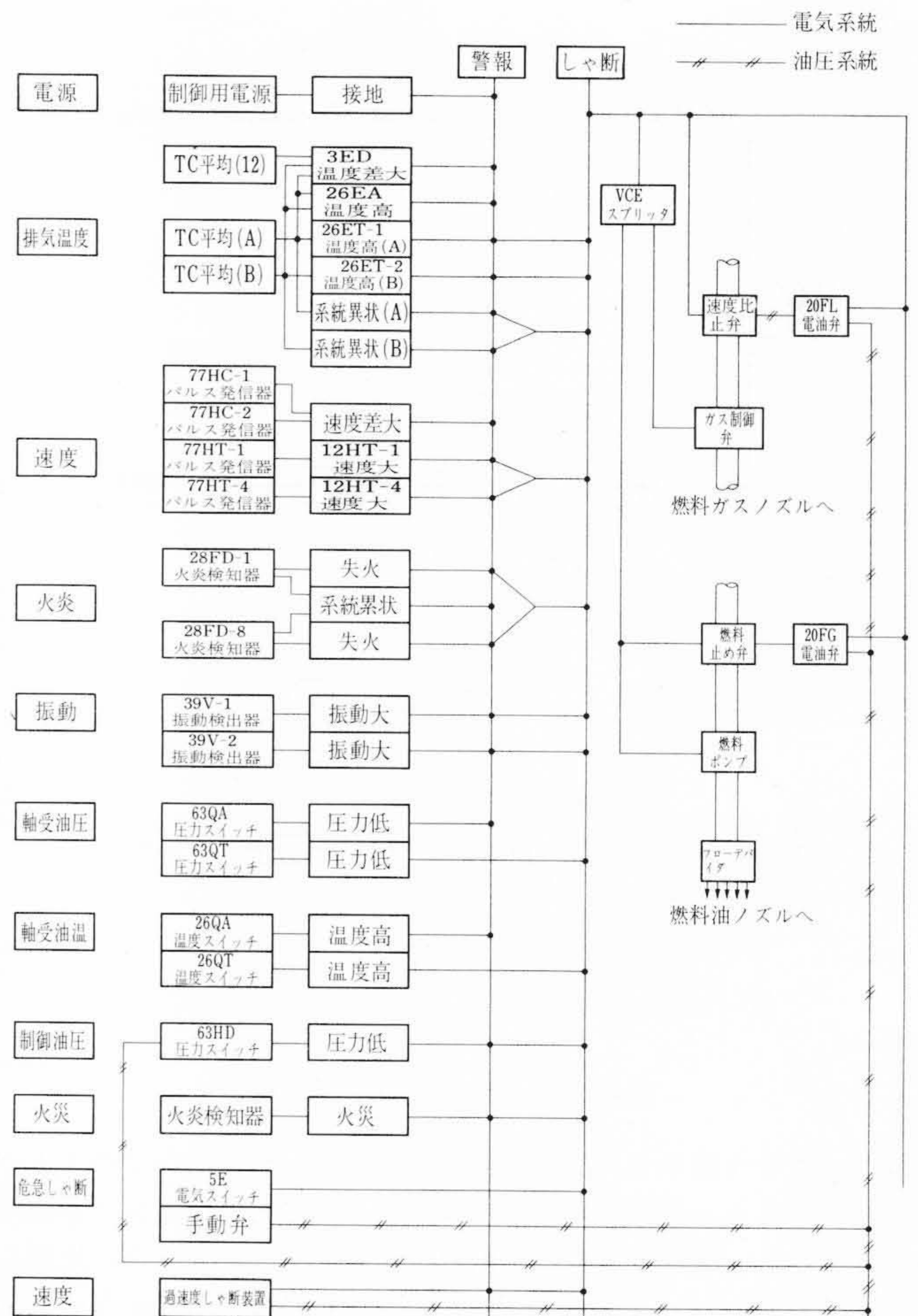


図7 ガスタービン保護系統図

これと同時に制御弁(あるいは燃料ポンプ)の燃料信号VCEを切り、燃料流量をゼロにする操作も行なわれる。すなわちガスタービンしゃ断は独立したこれら2系統の回路を経て達成されることになる。

ガスタービン保護装置の主要なものは、速度、温度、振動、火災検知に関するもので、図7はこれら保護装置の系統図を示すものである。概略について次に述べる。

6.1 過速度保護装置

速度はパルス発信式速度検出器により検出される。この出力パルスは共振回路を通してしゃ断信号となる。共振回路は110%速度で共振するように回路が組まれており、ガスタービン速度がこの速度に達するとしゃ断信号が出る。この回路は速度検出器も含め最低2個以上の独立した回路から形成されている。ただし二重回路の片側だけの信号ではしゃ断信号とはならず警報のみを発するようにしてあり、両回路の信号により初めてしゃ断が行なわれる。

この電氣的過速度保護装置のほかに機械油圧式の過速度ボルト形しゃ断装置を備える場合もある。この機械油圧式に対しては速度設定値を電気式よりも2%だけ上げて112%としている。

6.2 温度保護装置

これはガスタービンの燃焼ガス温度が制御温度を越えて危険な温度に達した場合、警報を発したり、ガスタービンしゃ断を行なうものである。温度検出は2本以上の熱電対によって行なわれ、検出温度は排気ガス温度である。燃料流量が異状に増加し、燃焼温度、排気ガス温度が異状に上昇すると出力増幅された熱電対出力電圧が電気リレーを作動する。これによりまず警報を発し、さらに温度上昇をするとガスタービンをしゃ断する。この温度保護装置は温度検出用熱電対も含めた独立した二重回路より構成しており、回路間に一定値以上の温度差を生じた場合も警報を発する。

6.3 振動保護装置

振動検出器はガスタービンの第1軸受と圧縮機ケーシングに各1個付けてあり、振動速度が25.4mm/sを越えるとタービン制御盤内の振動リレーを作動し、ガスタービンしゃ断信号を出す。振動検出器としてはこのほかに振幅形と加速度形があるが、その違いは、振動による変位を問題にするか、振動によって引き起こされる力を問題にするかにある。日立ガスタービンで使用している速度形は両者の長を生かした中間形であるといえる。

6.4 失火保护装置

ガスタービンがなんらかの原因で燃焼器内の火炎を消失した場合、そのまま燃料を流入させることは危険で、失火を検知したら瞬時に燃料を停止する必要がある。このために火炎監視用の2個の紫外線検知方式火炎検出器が取り付けられている。失火信号は検出器からタービン制御盤内の火炎リレーパネルに導かれ、これからガスタービンしゃ断信号を出す。なお燃焼器の構成上一部分だけ失火する可能性は非常に少ないこと、および計器の誤動作を考慮して検出回路の両側がともに失火信号を出した場合だけしゃ断信号を出すようにしてある。片側だけの場合は警報のみを発する。

6.5 運転結果

スピードトロニック制御装置を取り付けたガスタービンは、昭和43年に営業運転を開始しており、これから25,000時間経過後の現在までの運転状況を見ると700回の自動起動が行なわれ、起動失敗したのは1回のみで起動信頼性は99.8%と非常に高い。またこの間の運転時間は約1,000時間で、発電量は12,000MWhであるが、運転中のトラブルによる停止は皆無で運転の信頼性は100%である。有効性については二、三のトラブルにより80時間の運転不能を生じたため $25,000/25,080=99.7\%$ となっている。

起動特性については図8に示すように起動指令から定格負荷まで急速起動の場合は約3分、平常起動の場合でも約7分と非常に短い。

図9は400MW蒸気タービン発電所をガスタービン発電機単独で起動させた場合の特性を示している。この間ガスタービンは速度一定の運転すなわち無調定率制御 (Isochronous Operation)を行なっている。蒸気プラント起動には3,500HPドラフトファン2基の起動も含まれていたが、ガスタービン発電機は速度変動は0.1Hz以内と小さく、スピードトロニックの精度の高さと応答性の敏速さを示す好例である。

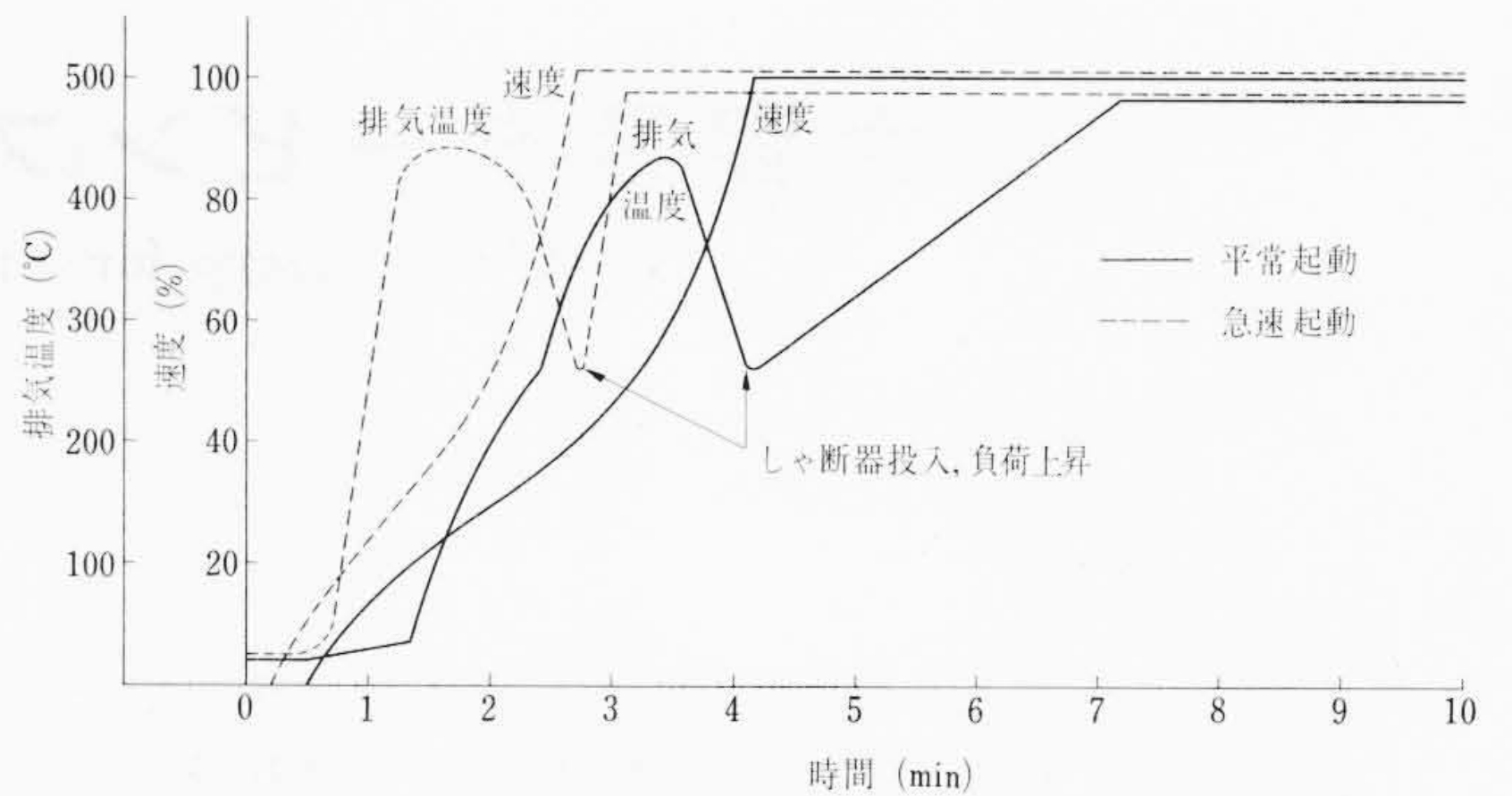


図8 ガスタービン起動特性

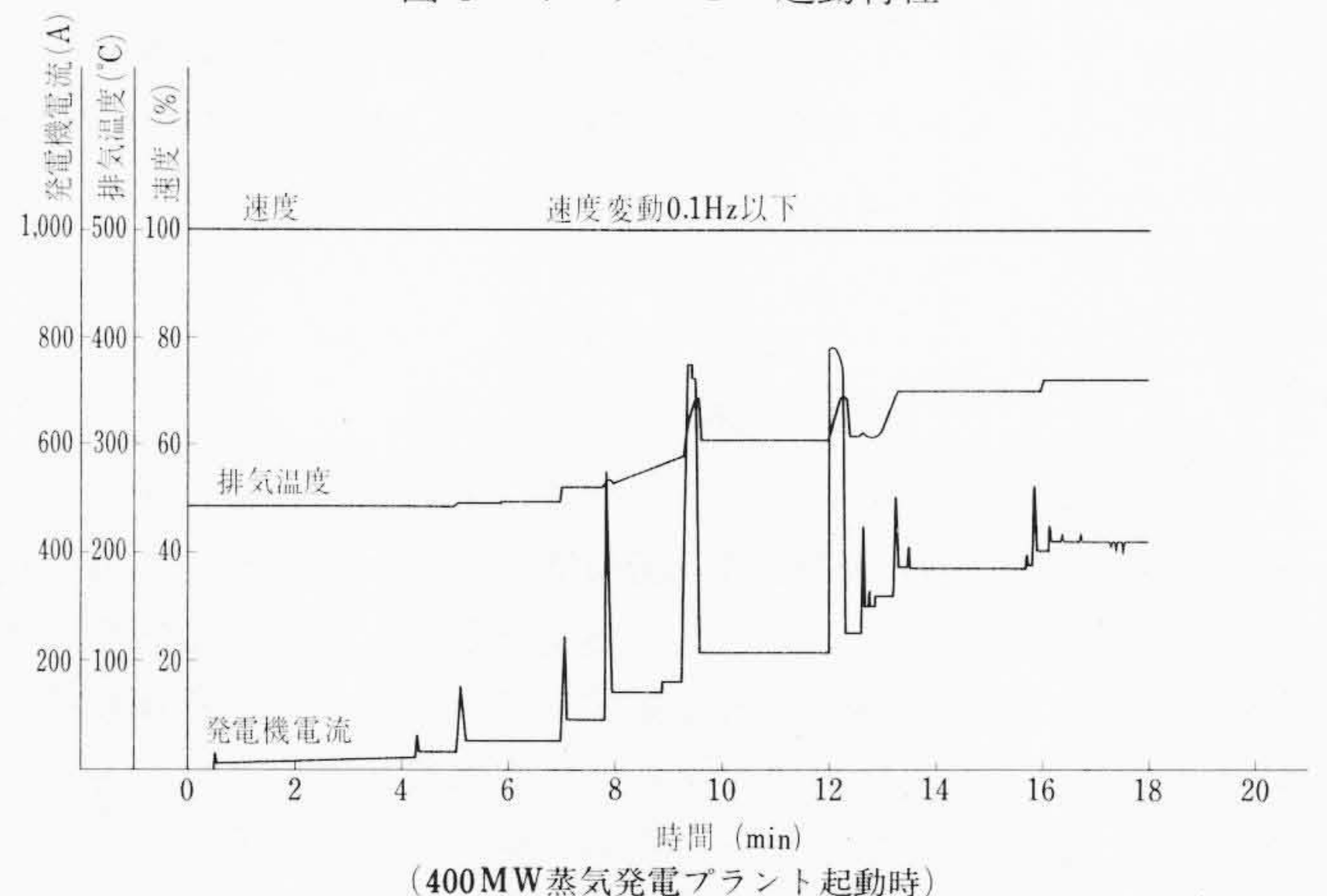


図9 ガスタービン負荷応答特性

7. 結 言

ガスタービンはほかの原動機たとえば蒸気タービン、ディーゼルエンジンなどと比較すると制御部分を単純化、集中化することができ、自動起動、遠隔運転なども比較的容易に行なうことができる特徴を有している。従来日立-GEガスタービンでは機械油圧式制御方式により完全自動運転を行なってきたが、ここに紹介したスピードトロニック制御装置を開発することによりさらに制御性ならびに信頼性の向上を図ったもので、幾多の実績は所期の目的を十分に達成していることを証明するものである。

第34巻

目 次

目 次

第7号

- ・グラフィック・ランスポ 72
- ・解説/おやすみ回路と空間ストップ
- ・豊かなる農業を
- ・ルポ/“善”は“循環”する
- 崩れゆく富士を守る
- 施設園芸モデルハウス

- ・美術館めぐり/南 蛮 美 術 館
- ・インタビュー/鳥 追 い 人 生
- ・家電コーナー/快適な生活環境のために
- ・新 製 品 紹 介
- ・ホームサイエンス

発行所 日立評論社

取次所 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内一丁目5番1号

郵便番号 100

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地

郵便番号 101

振替口座東京 20018番