

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2018-123798

(P2018-123798A)

(43) 公開日 平成30年8月9日(2018.8.9)

(51) Int.Cl.

F 1

テーマコード (参考)

F O 2 B 71/04 (2006.01)

F O 2 B 71/04

F O 2 B 71/02 (2006.01)

F O 2 B 71/02

H O 2 K 35/02 (2006.01)

H O 2 K 35/02

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2017-18111 (P2017-18111)

(22) 出願日 平成29年2月3日(2017.2.3)

(71) 出願人 000003609

株式会社豊田中央研究所

愛知県長久手市横道41番地の1

(74) 代理人 110001210

特許業務法人Y K I 国際特許事務所

(72) 発明者 守屋 一成

愛知県長久手市横道41番地の1 株式会
社豊田中央研究所内

(72) 発明者 後藤 成晶

愛知県長久手市横道41番地の1 株式会
社豊田中央研究所内

(72) 発明者 稲垣 英人

愛知県長久手市横道41番地の1 株式会
社豊田中央研究所内

最終頁に続く

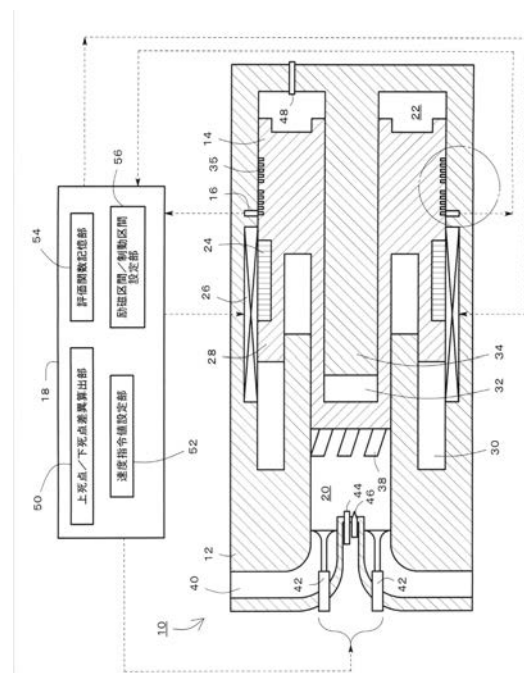
(54) 【発明の名称】 フリーピストン式発電機の制御装置

(57) 【要約】

【課題】フリーピストン式発電機の電力効率を従来よりも向上可能とする。

【解決手段】制御装置18は、膨張行程における第1速度指令値 V_{expC} と、圧縮行程における第2速度指令値 V_{cmpC} を設定する。また制御装置18は、始動時にコイル26を励磁させてピストン14の速度を第1及び第2速度指令値 V_{expC} 、 V_{cmpC} に到達させるモータリングに当たり、ピストン14の往復周期における平均消費電力が最小となるように、ピストン14の往復行程における励磁区間を設定する。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

磁石が組み込まれたピストンが、コイルが設けられたシリンダ内を往復移動することによって発電が行われる、フリーピストン式発電機の制御装置であって、

前記シリンダ内には燃焼室が設けられ、

前記制御装置は、

前記ピストンが前記燃焼室とは反対側に移動させられる膨張行程における第 1 速度指令値と、前記ピストンが前記燃焼室側に移動させられる圧縮行程における第 2 速度指令値を設定し、

始動時に前記コイルを励磁させて前記ピストンの速度を前記第 1 及び第 2 速度指令値に到達させるモータリングに当たり、前記ピストンの往復周期における平均消費電力が最小となるように、前記ピストンの往復行程における励磁区間を設定する、フリーピストン式発電機の制御装置。

10

【請求項 2】

請求項 1 に記載の、フリーピストン式発電機の制御装置であって、

前記制御装置は、前記ピストンの往復行程における原点と上死点との間の中間点から前記上死点までの間の領域に、前記励磁区間の境界を設定する、フリーピストン式発電機の制御装置。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の、フリーピストン式発電機の制御装置であって、

前記制御装置は、前記励磁区間の変化に対する、前記平均消費電力の変化を求める評価関数において、前記平均消費電力が極小値を取る前記励磁区間に基づいて、前記励磁区間の境界を設定する、

フリーピストン式発電機の制御装置。

20

【請求項 4】

磁石が組み込まれたピストンが、コイルが設けられたシリンダ内を往復移動することによって発電が行われる、フリーピストン式発電機の制御装置であって、

前記シリンダ内には燃焼室が設けられ、

前記制御装置は、

前記ピストンが前記燃焼室とは反対側に移動させられる膨張行程における第 1 速度指令値と、前記ピストンが前記燃焼室側に移動させられる圧縮行程における第 2 速度指令値を設定し、

発電時に、電気制動により前記ピストンの速度を前記第 1 及び第 2 速度指令値まで減速させるに当たり、前記ピストンの往復周期における、前記電気制動による平均発電電力が最大となるように、前記ピストンの往復行程における電気制動区間を設定する、

フリーピストン式発電機の制御装置。

30

【請求項 5】

請求項 4 に記載の、フリーピストン式発電機の制御装置であって、

前記制御装置は、前記ピストンの往復行程における原点と上死点との間の中間点から前記上死点までの間の領域に、前記電気制動区間の境界を設定する、

フリーピストン式発電機の制御装置。

40

【請求項 6】

請求項 5 に記載の、フリーピストン式発電機の制御装置であって、

前記制御装置は、前記電気制動区間の変化に対する、前記平均発電電力の変化を求める評価関数において、前記平均発電電力が極大値を取る前記電気制動区間に基づいて、前記電気制動区間の境界を設定する、

フリーピストン式発電機の制御装置。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】**

50

【 0 0 0 1 】

本発明は、磁石が組み込まれたピストンが、コイルが設けられたシリンダ内を往復移動することによって発電する、フリーピストン式発電機の制御装置に関する。

【 背景技術 】

【 0 0 0 2 】

従来から、シリンダ内でピストンを往復移動させることによって発電するフリーピストン式発電機が知られている。ピストンはクランク機構に拘束されずにシリンダ内を往復移動可能となっている。

【 0 0 0 3 】

シリンダ内における、ピストン往復移動方向（シリンダの長手方向）に沿った一端には燃焼室が設けられ、他端には空気ばね室が設けられている。燃料と空気の混合気を燃焼室で燃焼させると、燃焼圧によりピストンが燃焼室から空気ばね室側に押し出される。ピストンの移動に伴い空気ばね室は体積が圧縮される。すると、この圧縮に対する反発力が生じて、ピストンは再び燃焼室に戻される。

10

【 0 0 0 4 】

ピストン外周面には永久磁石が設けられ、シリンダ内周面にはコイルが設けられる。ピストンの往復移動に伴って、永久磁石とコイルとが相対移動する。この際に生じる誘導起電力により、発電が行われる。

【 0 0 0 5 】

特許文献 1 には、フリーピストン式発電機において、ピストンの挙動を制御する方法が記載されている。これによると、膨張行程における第 1 速度指令値と、圧縮行程における第 2 速度指令値が設定される。発電時には、燃焼圧または空気ばねの反発により付勢されるピストンを電気制動により第 1 及び第 2 速度指令値まで減速させるように発電量が制御される。また、モータリング時にはコイルを励磁させてピストンの速度を第 1 及び第 2 速度指令値に到達させるように送電量が制御される。

20

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 6 】

【 特許文献 1 】 特開 2 0 1 6 - 1 0 9 1 2 3 号 公 報

【 発明の概要 】

30

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 7 】

ところで、ピストンの速度制御を行うに当たり、ピストンの励磁区間（発電時の電気制動区間、及びモータリング時の励磁区間）に応じて、電力効率が変化する。例えばモータリングにおいて励磁区間が短いと、その短い区間でピストンに付勢力を加えて第 1 及び第 2 速度指令値に到達させるために、コイルに大電流を流さなければならない。このとき配線抵抗等による損失が増大するおそれがある。そこで本発明は、従来よりも電力効率を向上可能な、フリーピストン式発電機の制御装置を提供することを目的とする。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 8 】

40

本発明は、磁石が組み込まれたピストンが、コイルが設けられたシリンダ内を往復移動することによって発電が行われる、フリーピストン式発電機の制御装置に関するものである。シリンダ内には燃焼室が設けられる。制御装置は、ピストンが燃焼室とは反対側に移動させられる膨張行程における第 1 速度指令値と、ピストンが燃焼室側に移動させられる圧縮行程における第 2 速度指令値を設定する。また制御装置は、始動時にコイルを励磁させてピストンの速度を第 1 及び第 2 速度指令値に到達させるモータリングに当たり、ピストンの往復周期における平均消費電力が最小となるように、ピストンの往復行程における励磁区間を設定する。

【 0 0 0 9 】

また、上記発明において、制御装置は、ピストンの往復行程における原点と上死点との

50

間の中間点から上死点までの間の領域に、励磁区間の境界を設定してもよい。

【 0 0 1 0 】

また、上記発明において、制御装置は、励磁区間の変化に対する、平均消費電力の変化を求める評価関数において、平均消費電力が極小値を取る励磁区間に基づいて、励磁区間の境界を設定してもよい。

【 0 0 1 1 】

また、本発明の別態様は、磁石が組み込まれたピストンが、コイルが設けられたシリンダ内を往復移動することによって発電が行われる、フリーピストン式発電機の制御装置に関する。シリンダ内には燃焼室が設けられる。制御装置は、ピストンが燃焼室とは反対側に移動させられる膨張行程における第 1 速度指令値と、ピストンが燃焼室側に移動させられる圧縮行程における第 2 速度指令値を設定する。また制御装置は、発電時に、電気制動によりピストンの速度を第 1 及び第 2 速度指令値まで減速させるに当たり、ピストンの往復周期における、電気制動による平均発電電力が最大となるように、ピストンの往復行程における電気制動区間を設定する。

10

【 0 0 1 2 】

また、上記発明において、制御装置は、ピストンの往復行程における原点と上死点との間の中間点から上死点までの間の領域に、電気制動区間の境界を設定してもよい。

【 0 0 1 3 】

また、上記発明において、制御装置は、電気制動区間の変化に対する、平均発電電力の変化を求める評価関数において、平均発電電力が極大値を取る電気制動区間に基づいて、電気制動区間の境界を設定してもよい。

20

【発明の効果】

【 0 0 1 4 】

本発明によれば、フリーピストン式発電機の電力効率を従来よりも向上可能となる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 5 】

【図 1】本実施形態に係るフリーピストン式発電システムの概要を説明する図である。

【図 2】スリット列周辺の拡大断面図である。

【図 3】本実施形態に係る速度制御について説明する図である。

【図 4】ピストンの往復行程と励磁区間との関係について説明する図である。

30

【図 5】励磁区間の調整について説明する図である。

【図 6】モータリング時の消費電力の周期平均と励磁境界との関係を例示するグラフである。

【図 7】励磁区間と速度指令値との関係について説明する図である。

【図 8】発電時の発電電力の周期平均と電気制動境界との関係を例示するグラフである。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 6 】

< 全体構成 >

図 1 に、本実施形態に係るフリーピストン式発電システムの概要を示す。フリーピストン式発電システムは、フリーピストン式発電機 10 とその制御装置 18 を備える。フリーピストン式発電機 10 は、シリンダ 12、ピストン 14、及び検出器 16 を備える。

40

【 0 0 1 7 】

シリンダ 12 内の長手方向一端には燃焼室 20 が設けられ、他端には空気ばね室 22 が設けられている。ピストン 14 はシリンダ 12 内に配置され、燃焼室 20 で発生する燃焼圧力と空気ばね室 22 の圧縮に伴う反発力とで、燃焼室 20 と空気ばね室 22 との間を往復移動する。

【 0 0 1 8 】

ピストン 14 の外周面には永久磁石 24 が設けられ、またシリンダ 12 内周面にはコイル 26 が周方向に沿って巻き回されている。ピストン 14 の往復移動に伴い、永久磁石 24 とコイル 26 とが相対移動する。これにより誘導起電力が生じて発電が行われる。

50

【 0 0 1 9 】

また、フリーピストン式発電機 1 0 の始動時、つまりピストン 1 4 を停止状態から往復運動状態にするために、フリーピストン式発電機 1 0 を電動機として使用する。この電動機として使用する動作として、本実施形態では、初期化とモータリングが含まれる。初期化は、ピストン 1 4 の絶対位置が不明であるときにピストン 1 4 を移動させて絶対値の探索を行う動作である。モータリングとは、初期化後にコイル 2 6 に励磁電流を流してピストン 1 4 を移動させることを指しており、ピストン 1 4 の駆動方式としては、燃焼圧力（爆発エネルギー）によりピストン 1 4 を移動させるファイアリングと対の関係にある。

【 0 0 2 0 】

制御装置 1 8 は、発電時（ファイアリング時）には、燃焼圧力や空気ばね室 2 2 の反発力等で付勢されたピストン 1 4 を、電気制動によって速度制御することで、ピストン 1 4 の挙動を制御する。また始動時及びモータリング時には、コイル 2 6 に流す励磁電流を調整して速度制御することで、ピストン 1 4 の挙動を制御する。

10

【 0 0 2 1 】

なお、電気制動とは、発電電力を抵抗器に消費させる発電制動と、発電電力を他の電気機器に分配する回生制動の両者を含むものとする。本実施形態においては、発電制動と回生制動の少なくとも一方が実施されればよい。

【 0 0 2 2 】

< 各構成の詳細 >

ピストン 1 4 は、シリンダ 1 2 内に収容され、当該シリンダ 1 2 内を往復移動する。ピストン 1 4 とシリンダ 1 2 との間にはわずかなクリアランスが設けられており、燃焼室 2 0 と空気ばね室 2 2 との気体の流通を抑制しつつ、シリンダ 1 2 内のピストン 1 4 の移動を可能としている。

20

【 0 0 2 3 】

図 1 に示す例では、ピストン 1 4 は、燃焼室 2 0 側が相対的に小径であり、空気ばね室 2 2 側が相対的に大径となっている。このようにすることで、ピストン 1 4 の空気ばね室 2 2 側の受圧面積が、燃焼室 2 0 側の受圧面積よりも大きくなり、空気ばね室 2 2 の圧力が比較的小さくても、ピストン 1 4 を燃焼室 2 0 に押し戻すことができる。

【 0 0 2 4 】

また、ピストン 1 4 は、大径部（空気ばね室側）の最外周部に、燃焼室 2 0 側に突出するような円環部 2 8 が形成されている。円環部 2 8 はシリンダ 1 2 の燃焼室 2 0 側に設けられたガイドリング溝 3 0 に挿入されるように形成されている。円環部 2 8 がガイドリング溝 3 0 に挿入された状態でピストン 1 4 が往復移動することで、当該往復移動（ストローク）が安定する。

30

【 0 0 2 5 】

加えて、ピストン 1 4 の往復移動を安定させる更なる手段として、ピストン 1 4 の小径部の裏側、つまり空気ばね室 2 2 側には、軸方向に挟まれた止まり穴 3 2 が形成されている。止まり穴 3 2 にはシリンダ 1 2 の空気ばね室 2 2 から延びるガイドシャフト 3 4 が挿入される。

【 0 0 2 6 】

また、円環部 2 8 を含めたピストン 1 4 の大径部の外周面、つまりピストン 1 4 の最外周面には、永久磁石 2 4 が設けられている。永久磁石 2 4 はピストン 1 4 の全ストロークにおいてコイル 2 6 と対面するように配置されていることが好適である。

40

【 0 0 2 7 】

燃焼室 2 0 から相対的に離間した大径部の外周面に永久磁石 2 4 を設けることで、燃焼室 2 0 からの熱が永久磁石 2 4 に伝達しにくくなり、その結果、永久磁石 2 4 の高温化に伴う減磁を防ぐことができる。

【 0 0 2 8 】

円環部 2 8 を含めたピストン 1 4 の大径部の外周面には、永久磁石 2 4 の他にも、スリット列 3 5 が切られている。図 1 に示す例では、ピストン 1 4 の紙面上下にスリット列 3

50

5 が切られているが、さらに両側面にもスリット列 3 5 が切られていてよい。つまりピストン 1 4 の外周面には、周廻りに 90° 間隔でスリット列 3 5 が切られていてよい。また、これらスリット列 3 5 は、位相をずらすようにして形成されていてよい。例えば隣り合うスリット 3 7, 3 7 (図 2 参照) 同士の間隔の 4 分の 1 ごとに、各面にスリット列 3 5 を切るようにしてもよい。このようにすることで、ピストン 1 4 の位置を高精度に検出することが可能となる。

【0029】

スリット列 3 5 の拡大図、すなわち図 1 の一点鎖線の円で囲った部分の拡大図を図 2 に示す。スリット列 3 5 はピストン 1 4 の軸方向に沿ってスリット 3 7 を複数切ることによって構成される。また、本実施形態では、隣り合うスリット 3 7, 3 7 のピッチ (間隔) が、他のピッチとは異なるような特徴部 3 6 を設けている。例えば図 2 では、スリット 3 7, 3 7 間のピッチ d_1 とは異なるピッチ d_2 となるような特徴部 3 6 を、スリット列 3 5 の中央部に設けている。なお、図 1 では、特徴部 3 6 を、紙面上下のスリット列 3 5 に設けているが、周廻りに複数形成されたスリット列 3 5 のいずれかひとつに、特徴部 3 6 を設けるようにしてもよい。

10

【0030】

スリット列 3 5 は、ピストン 1 4 の全ストロークにおいて検出器 1 6 と対向するように形成されていてよい。例えばピストン 1 4 が上死点 (最も燃焼室 2 0 側の位置) にいる場合に、スリット列 3 5 の紙面最も右側のスリット 3 7 が検出器 1 6 と対向するようにし、ピストン 1 4 が下死点 (最も空気ばね室 2 2 側) にいる場合に、スリット列 3 5 の紙面最も左側のスリット 3 7 が検出器 1 6 と対向するようにする。加えて、ピストン 1 4 がストローク中央、つまり、シリンダ長の中央に位置するときに検出器 1 6 と対向するように、特徴部 3 6 をピストン 1 4 に形成することが好適である。

20

【0031】

図 1 に戻り、シリンダ 1 2 は、中空の略筒形状部材である。この中空領域の長手方向の全長、つまりシリンダ長がストローク長となり、その中央位置がストローク中央 (原点) となる。また、ストローク長の端部がストローク端部となる。ピストン 1 4 の形状に合わせて、シリンダの中空形状は、燃焼室 2 0 側が相対的に小径となっており、空気ばね室 2 2 側が相対的に大径となっている。

【0032】

ピストン 1 4 の往復移動方向に沿って、言い換えると、シリンダ長方向の一端には燃焼室 2 0 が形成され、他端には空気ばね室 2 2 が形成されている。燃焼室 2 0 は、掃気孔 3 8、排気口 4 0、排気バルブ 4 2、インジェクタ 4 4、及び点火手段 4 6 が設けられている。

30

【0033】

掃気孔 3 8 は、燃焼室 2 0 内に新気を導入する。新気の導入に際して、図示しない掃気ポンプを駆動させることによって、外部から掃気孔 3 8 に新気を導入するようにしてもよい。掃気孔 3 8 は、例えば、シリンダ 1 2 の内壁面に開口されていてよく、ピストン 1 4 が上死点に位置しているときにはピストン 1 4 によって塞がれるとともに、ピストン 1 4 が下死点に位置しているときには開放されるような位置に形成されていてよい。

40

【0034】

また、排気口 4 0 は、燃焼室で新気と燃料との混合気を燃焼させた後の排気を、外部に排出する。また、排気口 4 0 が無く、掃気孔 3 8 のみで掃気・排気を行うループフロー式であってもよい。

【0035】

インジェクタ 4 4 は、燃料を噴射する噴射手段である。点火手段 4 6 は、混合気に点火して燃焼圧力を生じさせる。また、点火手段 4 6 の無い、圧縮自着火方式によって燃焼圧力を生じさせてもよい。

【0036】

空気ばね室 2 2 は、ピストン 1 4 を燃焼室 2 0 側に押し戻す機能を有している。ピスト

50

ン 1 4 が燃焼室 2 0 側から空気ばね室 2 2 側に移動する際に、空気ばね室 2 2 が圧縮される。この圧縮により反発力が生じ、当該反発力により、ピストン 1 4 が燃焼室 2 0 側に押し戻される。内圧を一定範囲に収めるため、空気ばね室 2 2 には、調圧弁 4 8 が設けられていてもよい。さらに、調圧弁 4 8 に代えて、コンプレッサ等の加圧源を空気ばね室 2 2 に接続してもよい。

【 0 0 3 7 】

コイル 2 6 は、シリンダ 1 2 の内周面に設けられている。コイル 2 6 は、ピストン 1 4 の全ストロークに亘って、永久磁石 2 4 と対向するような位置に設けられていることが好適である。また、コイル 2 6 は、外部に設けられたインバータ等の電力変換器（図示せず）に接続される。コイル 2 6 で発生した交流電力は電力変換器によって直流電力に変換されてバッテリー等の直流電源に供給される。また、初期化時及びモータリング時には、直流電源から供給された直流電力が電力変換器によって交流電力に変換されてコイル 2 6 に供給される。

10

【 0 0 3 8 】

検出器 1 6 は、対向するスリット列 3 5 の通過を検出することでピストン 1 4 の変位を検出する。また、スリット列 3 5 の特徴部 3 6 を検出する。検出器 1 6 は、コイル 2 6 とともに、シリンダ 1 2 の大径部分の内周面に設けられる。上述したように、検出器 1 6 はピストン 1 4 の全ストロークに亘って、スリット列 3 5 と対向するような位置に設けられていることが好適である。

【 0 0 3 9 】

20

検出器 1 6 は、スリット 3 7 の凹凸に応じて 2 つの値を取るようにしてもよい。例えば、検出器 1 6 がスリット 3 7 の底面と相対しているときに、検出器 1 6 は、検出信号 S 1 H を出力する。また、スリット 3 7 , 3 7 間の突出面と相対しているときに、検出器 1 6 は、検出信号 S 1 L を出力する。

【 0 0 4 0 】

検出器 1 6 内には、検出信号 S 1 の値をカウントするカウンタが設けられてよい。例えば、検出器 1 6 内のハードウェア回路によってカウンタが構成されてよい。検出信号 S 1 の値（H / L）が増加する度にカウンタが増えるように構成されており、このカウンタ値によって、ピストン 1 4 の位置が算出できる。また、カウンタ値は、スリット列 3 5 の特徴部 3 6 を検知したときにはリセットするように設定されていてもよい。このリセット動作により、ピストン 1 4 の絶対位置を検出することが可能となる。カウンタ値は制御装置 1 8 に送信される。

30

【 0 0 4 1 】

検出器 1 6 は、例えば、渦電流センサ、光学センサ、静電容量センサ等の非接触センサのいずれかから構成されてよい。なお、シリンダ 1 2 内は潤滑用のオイル等がシリンダ 1 2 の内表面やピストン 1 4 の外表面に付着しており、光学的に良好な検出環境を確保することは困難となる場合がある。このような観点から、検出器 1 6 として、渦電流センサや静電容量センサを用いることが好適である。

【 0 0 4 2 】

制御装置 1 8 は、フリーピストン式発電機 1 0 が安定的な発電を行うために、ピストン 1 4 の挙動を制御する。また、初期化時及びモータリング時には、フリーピストン式発電機 1 0 を電動機として機能させ、ピストン 1 4 を移動させる。

40

【 0 0 4 3 】

制御装置 1 8 は、コンピュータから構成されてよく、例えば、演算回路である CPU、メモリ等の記憶部、及び機器・センサインターフェースが内部バスを介して互いに接続されている。記憶部には、後述する速度制御プログラムや励磁区間 / 制動区間設定プログラムが記憶されており、CPU が当該プログラムを実行することで、速度制御や励磁区間 / 制動区間の設定が行われる。

【 0 0 4 4 】

制御装置 1 8 は、機器・センサインターフェースを介して、周辺機器との信号授受を行

50

う。具体的には、検出器 16 からカウンタ値を受信し、また、排気バルブ 42、インジェクタ 44、及び、点火手段 46 に対して作動信号を送信する。電気制動を行う際には、フリーピストン式発電機 10 の発電量を制御する。例えば、発電電力の供給先（電気機器、バッテリー、抵抗器等）を選択する。さらに、モータリング時にはコイル 26 に供給する励磁電流量を制御する。

【0045】

制御装置 18 には、記憶部に記憶された速度制御プログラムや励磁区間 / 制動区間設定プログラムを CPU が実行することで、複数の機能部が形成される。例えば図 1 に示すように、制御装置 18 に、上死点 / 下死点差異算出部 50、速度指令値設定部 52、評価関数記憶部 54、及び励磁区間 / 制動区間設定部 56 が生成される。これらの機能部は例えば CPU や記憶部等のリソースが割り当てられることで仮想的に生成される。

10

【0046】

< 速度制御によるピストン制御 >

本実施形態に係る制御装置 18 は、速度制御に基づいてピストン 14 の挙動を制御する。制御装置 18 は、ピストン 14 が空気ばね室 22 側に移動させられる膨張行程において第 1 速度指令値を定めるとともに、ピストン 14 が燃焼室 20 側に移動させられる圧縮行程において第 2 速度指令値を定める。

【0047】

膨張行程及び圧縮過程では、ピストン 14 の速度がそれぞれ定められた速度指令値となるように速度制御を行う。発電時（ファイアリング時）は、電気制動によって速度制御を行う。すなわち、制御装置 18 は、ピストン 14 の速度を第 1 速度指令値 V_{expC} （膨張行程）及び第 2 速度指令値 V_{cmpC} （圧縮行程）まで減速させるように発電量を制御する。始動時（モータリング時）は、励磁電流制御によって速度制御を行う。すなわち、制御装置 18 は、ピストン 14 の速度を第 1 速度指令値 V_{expC} （膨張行程）及び第 2 速度指令値 V_{cmpC} （圧縮行程）に到達させるように、コイル 26 への送電量を制御する。

20

【0048】

ピストン 14 の速度は上死点及び下死点で最低速度 0 を取り、ストローク中央位置（原点）で最高速度を取る。このような挙動に合わせて、発電制動及び励磁を行う。

【0049】

発電量とピストン 14 の制動量、及び、送電量（励磁電流量）とピストン 14 の推進量との関係は既知であることから、従来のような外乱要素の多いエネルギー収支に基づくピストン制御と比較して、本実施形態に係る速度制御は、ピストン 14 の挙動をより高精度に制御することが可能となる。

30

【0050】

< 速度指令波の生成 >

上述したように、速度制御においては、ピストン 14 の速度を、膨張行程では第 1 速度指令値に制御し、圧縮過程では第 2 速度指令値とするような制御が行われる。したがって、ピストン 14 のストロークに応じた速度指令波は、図 3 下段にて示すように、第 1 速度指令値 V_{expC} と第 2 速度指令値 V_{cmpC} をピーク値とする矩形波となる。この速度指令波の生成について、以下説明する。

40

【0051】

制御装置 18 の速度指令値設定部 52 は、第 1 及び第 2 速度指令値の設定に当たり、所定の往復周期における、ピストン 14 の上死点位置と下死点位置とに基づいて、その次の往復周期における第 1 及び第 2 速度指令値を設定する。

【0052】

具体的には、上死点 / 下死点差異算出部 50 は、図 3 に示すように、予め定めた、上死点目標位置及び下死点目標位置と、予め定めた、第 1 速度指令値 V_{expC1} 及び第 2 速度指令値 V_{cmpC1} に基づいて、 $k - 1$ 周期目（図 3 では 1 周期目）における、実際の上死点と下死点との差を求める。上死点目標位置と実際の上死点との差 ΔS_{TDc} と、下

50

死点目標位置と実際の下死点との差 ΔS_{BDC} が求められると、上死点 / 下死点差異算出部 50 は、これらの値を用いて速度指令波の振幅 A と、速度 0 からのオフセット量 O とを求める。

【0053】

速度指令値の振幅 A は、下記数式 (1) により求めることができる。また、速度指令値のオフセット量 O は、下記数式 (2) により求めることができる。数式 (1) (2) で求められた振幅 A 及びオフセット量 O に基づいて、速度指令値設定部 52 は、k 周期目 (図 3 では 2 周期目) の速度指令波 (第 1 速度指令値 V_{expC2} 及び第 2 速度指令値 V_{cmpC2}) を求める。

【0054】

【数 1】

$$A = k_{pA}(\Delta S_{TDC} - \Delta S_{BDC}) + k_{iA} \int (\Delta S_{TDC} - \Delta S_{BDC}) \quad \cdots (1)$$

$$O = k_{pO}(\Delta S_{TDC} + \Delta S_{BDC}) + k_{iO} \int (\Delta S_{TDC} + \Delta S_{BDC}) \quad \cdots (2)$$

【0055】

ここで、数式 (1) の k_{pA} は振幅比例項ゲイン、 k_{iA} は振幅積分項ゲインを示す。また、数式 (2) の k_{pO} はオフセット比例項ゲイン、 k_{iO} はオフセット積分項ゲインを示す。

【0056】

< 励磁区間 / 制動区間の設定 >

制御装置 18 は、第 1 速度指令値 V_{expC} 及び第 2 速度指令値 V_{cmpC} に基づくピストン 14 の制御に当たり、モータリング時におけるコイル 26 への励磁区間及び発電時におけるピストン 14 の電気制動区間を調整する。

【0057】

図 4 上段には、ピストン 14 の往復行程 (全ストローク) 1 周期分が例示されている。横軸は時間、縦軸はピストン 14 の位置を示す。また図 4 下段には、ピストン 14 の往復行程と同期した、速度指令値 V_{expC} 、 V_{cmpC} の波形が示されている。横軸は時間、縦軸は速度指令値を示す。

【0058】

本実施形態に係る制御装置 18 では、ピストン 14 の往復行程 (全ストローク) において、励磁区間 (モータリング時) 及び電気制動区間 (発電時) を任意に変更可能となっている。この変更の際して、本実施形態では、ピストン 14 の往復周期における平均電力について、モータリング時は消費電力が最小となるように、発電時は発電電力が最大となるように、励磁区間及び電気制動区間が設定される。

【0059】

図 5 には、モータリング時の励磁区間の例が示されている。例えば励磁区間は固定区間と可変区間に分けられる。固定区間は、例えばピストン 14 が相対的に高速となる原点の周辺区間であり、例えば原点と下死点目標位置との間の下死点側中間点から、原点と上死点目標位置との間の上死点側中間点までの区間である。励磁区間の可変区間は、例えば下死点側中間点から下死点目標位置までの区間と、上死点側中間点から上死点目標位置までの区間である。可変区間では、下死点側中間点を起点として下死点目標位置側に区間を延伸させることが可能であり、また、上死点側中間点を起点として上死点目標位置側に区間を延伸させることが可能となっている。なお、可変区間の境界から上死点 / 下死点までの区間は、ピストン 14 が自由運動する。

【0060】

なお、図 5 ではモータリング時の例を示したが、発電時も同様に電気制動区間が設定可能である。すなわち、固定区間は下死点側中間点から上死点側中間点までの区間である。

10

20

30

40

50

可変区間は、下死点側中間点から下死点目標位置までの区間と、上死点側中間点から上死点目標位置までの区間である。可変区間では、下死点側中間点を起点として下死点目標位置側に区間を延伸させることが可能であり、また、上死点側中間点を起点として上死点目標位置側に区間を延伸させることが可能となっている。なお、可変区間の境界から上死点／下死点までの区間は、ピストン 14 が自由運動する。

【 0 0 6 1 】

上述した励磁区間のうち可変区間の設定に際して、コイル 26 の励磁に要する消費電力 [W] の周期平均 [W / T] を用いる。また電気制動区間のうち可変区間の設定に際して、電気制動に伴う発電電力 [W] の周期平均 [W / T] を用いる。例えば 3 相交流によりフリーピストン式発電機 10 を制御する際には、評価関数である下記数式 (3) に基づいて、平均消費電力 / 平均発電電力が求められる。

10

【 0 0 6 2 】

【 数 2 】

$$\frac{1}{T} \int_T (i_u V_u + i_v V_v + i_w V_w) dt \quad \cdot \cdot \cdot \quad (3)$$

【 0 0 6 3 】

数式 (3) において、T はピストン 14 のストローク周期を示す。i_u , v_u はそれぞれ U 相電流、U 相電圧を示す。i_v , v_v はそれぞれ V 相電流、V 相電圧を示す。i_w , v_w はそれぞれ W 相電流、W 相電圧を示す。

20

【 0 0 6 4 】

励磁区間 / 制動区間設定部 56 は、モータリングに際して、励磁区間 (の可変区間) を変化させたときの評価関数 (数式 (3)) の平均消費電力の変化を参照する。さらにその平均消費電力が最小となる極小値に対応する位置を励磁区間の境界 (励磁オンとオフの切り替え点) とする。例えば評価関数による平均消費電力は、予め実験やシミュレーション等で求めておくこともでき、評価関数記憶部 54 に記憶される。

【 0 0 6 5 】

図 6 には、励磁境界を変化させたときの、平均消費電力の変化を示すグラフが例示されている。横軸は励磁境界の位置を示し、上死点側中間点 (0 . 5) から上死点目標位置 (1 . 0) までの区間が示されている。縦軸は平均消費電力が示される。この図に示されているように、励磁境界を 0 . 8 に取ったときに平均消費電力が最小 (極小) となることが理解される。

30

【 0 0 6 6 】

このように励磁境界 (励磁区間) の変化に伴って平均消費電力が変化する理由について、図 7 を用いて説明する。図 7 (a) 、図 7 (b) とともに横軸は時間を示し、縦軸は速度指令値を示している。図 7 (a) には励磁区間を相対的に短くした例が示され、図 7 (b) には励磁区間を相対的に長くした例が示されている。

【 0 0 6 7 】

まず、励磁境界が 0 . 5 から 0 . 8 までの区間における、平均消費電力の変化について説明する。ピストン 14 が上死点目標位置及び下死点目標位置に到達するように、第 1 速度指令値 V_{exp} C 及び第 2 速度指令値 V_{cmp} C を設定するに当たり、励磁区間が短くなるほど、つまり励磁区間の境界が上死点や下死点から遠ざかるほど、第 1 速度指令値 V_{exp} C 及び第 2 速度指令値 V_{cmp} C は相対的に高くなる (図 (a)) 。

40

【 0 0 6 8 】

第 1 速度指令値 V_{exp} C 及び第 2 速度指令値 V_{cmp} C が相対的に高くなる結果、コイル 26 に大電流が供給される。その結果、コイル 26 を含む配線において配線抵抗等に伴う電力損失が発生する。配線抵抗に伴う電力損失は電流の自乗に比例することから、コイル 26 に供給する電流が増大するほど電力損失は増加する。その結果、第 1 速度指令値

50

V e x p C 及び第 2 速度指令値 V c m p C に到達させるために要する平均消費電力は相対的に（電力損失分）増加する。

【 0 0 6 9 】

また、励磁境界が 0 . 8 を超過する区間では、励磁区間において、励磁によるピストン 1 4 の単振動運動を制動するように一定速度にてピストン 1 4 が付勢される。このように励磁によってピストン 1 4 に加えられた慣性力が奪われるようにしてピストン 1 4 の挙動が制御されることで、電力効率が低減する。その結果、平均消費電力が増加する。

【 0 0 7 0 】

励磁区間 / 制動区間設定部 5 6 は、評価関数記憶部 5 4 から数式 (3) を呼び出して、平均消費電力が最小となる極小値を取得し、これに基づいてピストン 1 4 の往復行程における励磁区間を設定する。この励磁区間に基づいてコイル 2 6 が励磁され、ピストン 1 4 が駆動される。ピストン 1 4 の上死点及び下死点の実位置と、上死点目標位置及び下死点目標位置との差異が上死点 / 下死点差異算出部 5 0 によって算出され、これに基づいて速度指令値設定部 5 2 にて第 1 速度指令値 V e x p C 及び第 2 速度指令値 V c m p C が設定（更新）される。

【 0 0 7 1 】

図 8 には、発電時の電気制動境界（電気制動区間）の変化に伴う、平均発電電力の変化を示すグラフが例示されている。縦軸は平均発電電力を示し、横軸は電気制動境界を示す。

【 0 0 7 2 】

図 8 に示すように、電気制動境界を 0 . 8 に取ったときに、平均発電電力が最大となる極大値となる。励磁区間 / 制動区間設定部 5 6 は、これに基づいてピストン 1 4 の往復行程における電気制動区間を設定する。電気制動区間では電気制動に伴ってコイル 2 6 から発電電力が得られる。ピストン 1 4 の上死点及び下死点の実位置と、上死点目標位置及び下死点目標位置との差異が上死点 / 下死点差異算出部 5 0 によって算出され、これに基づいて速度指令値設定部 5 2 にて第 1 速度指令値 V e x p C 及び第 2 速度指令値 V c m p C が設定（更新）される。

【 0 0 7 3 】

なお、図 6、図 8 では上死点側中間点から上死点目標位置までの平均消費電力 / 平均発電電力の変化が示されていたが、評価関数記憶部 5 4 には、下死点側中間点から下死点目標位置までの平均消費電力 / 平均発電電力の変化を表す評価関数も記憶されている。これに基づいて下死点側中間点から下死点目標位置までの励磁区間 / 電気制動区間（可変区間）の境界が設定される。

【 0 0 7 4 】

< その他の実施形態 >

上述した実施形態では、燃焼室 2 0 と対向して空気ばね室 2 2 を設けていたが、この形態に限らない。要するにピストン 1 4 の付勢に抗してピストン 1 4 を燃焼室 2 0 に押し戻す反発力を生じさせるものであればよい。例えば、空気ばね室 2 2 の代わりにばね室を設けてもよい。具体的には、ピストン 1 4 のストローク方向に垂直なシリンダ 1 2 の内壁に弾性体を設ける。弾性体は、金属や樹脂をばね状（コイルばね、皿ばね）に加工したものであってよい。また、空気ばね室 2 2 を構成する空間にゴム等の弾性体を充填してもよい。さらに、空気ばね室 2 2 の代わりに磁石室を設けてもよい。例えばピストン 1 4 とシリンダ 1 2 との互いの対向面に磁石を設け、その反発力を利用する。磁石は永久磁石であっても電磁石であってもよい。ただし、ピストン 1 4 に給電手段を設けることが困難な場合は、ピストン 1 4 には永久磁石を設けることが好適である。加えて、空気ばね室 2 2 に上記のばねや弾性体、及び磁石の少なくとも一つを組み合わせてもよい。また、空気ばね室 2 2 の代わりに第 2 の燃焼室を設けてもよい。

【 0 0 7 5 】

なお、上述した燃焼室 2 0 の燃焼圧力に応じたばね係数の調整については、例えばばねや弾性体であればピストン 1 4 のストローク方向の位置を可変にする移動手段を設ければ

10

20

30

40

50

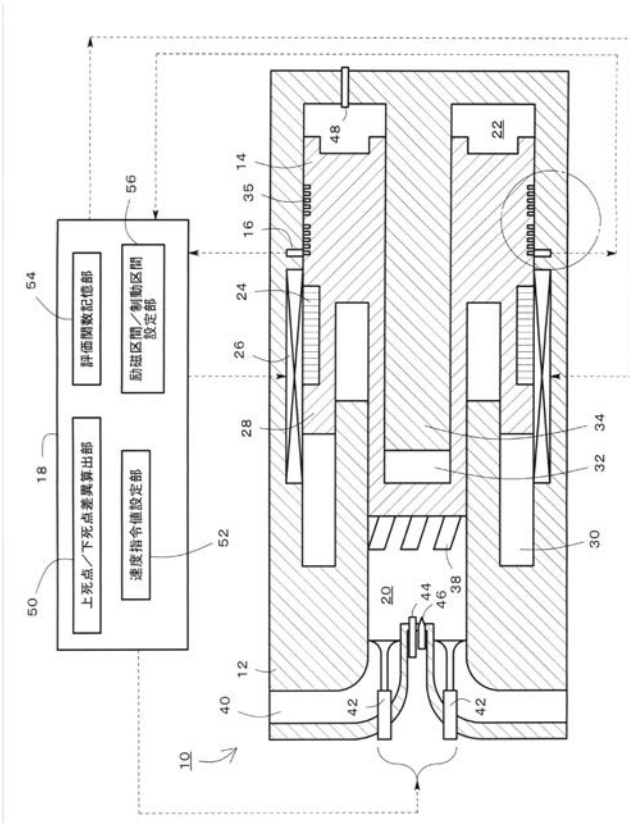
よい。また、電磁石であれば電流量を調整すればよい。また、空気ばね室 22 の代わりに第 2 の燃焼室を設ける場合には、燃焼室 20 に噴射する燃料の供給量の変化と協調するようにして、第 2 の燃焼室に噴射する燃料の供給量を調整すればよい。

【符号の説明】

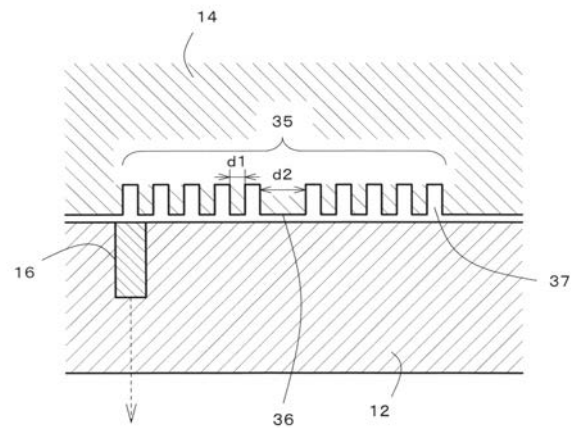
【 0 0 7 6 】

10 フリーピストン式発電機、12 シリンダ、14 ピストン、16 検出器、18 制御装置、20 燃焼室、22 空気ばね室、24 永久磁石、26 コイル、50 上死点 / 下死点差異算出部、52 速度指令値設定部、54 評価関数記憶部、56 励磁区間 / 制動区間設定部。

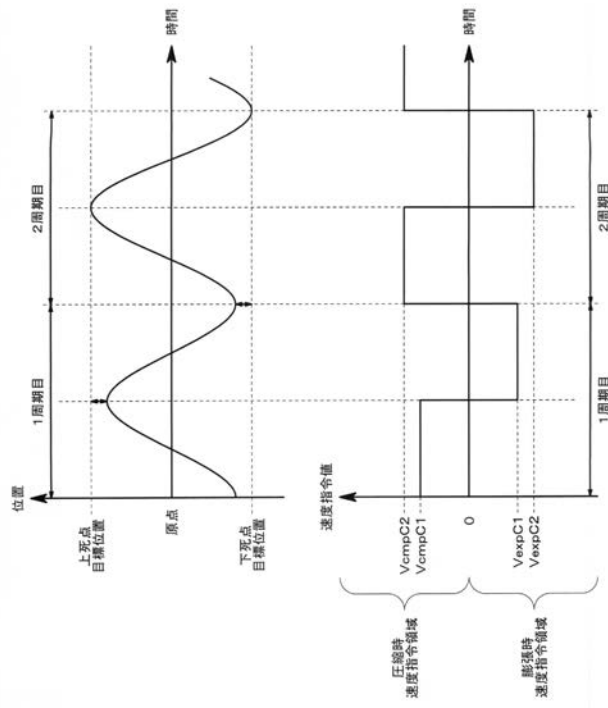
【 図 1 】



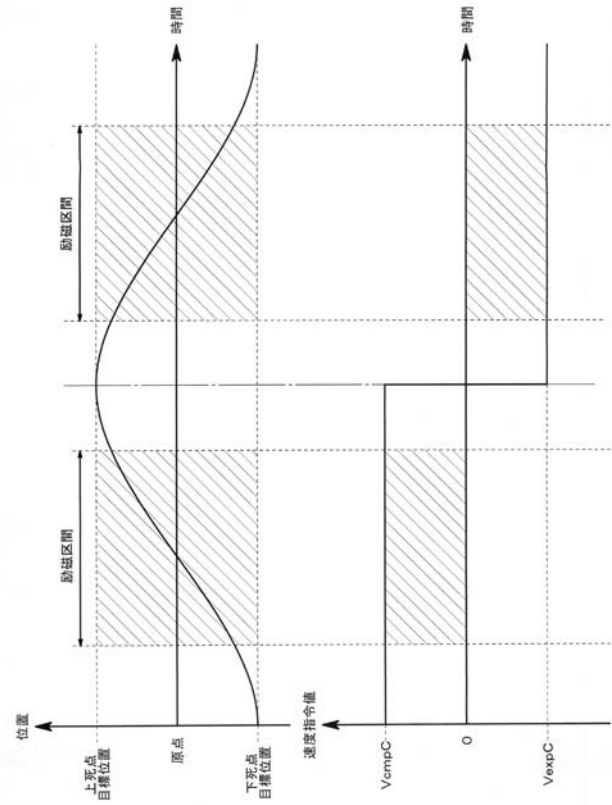
【 図 2 】



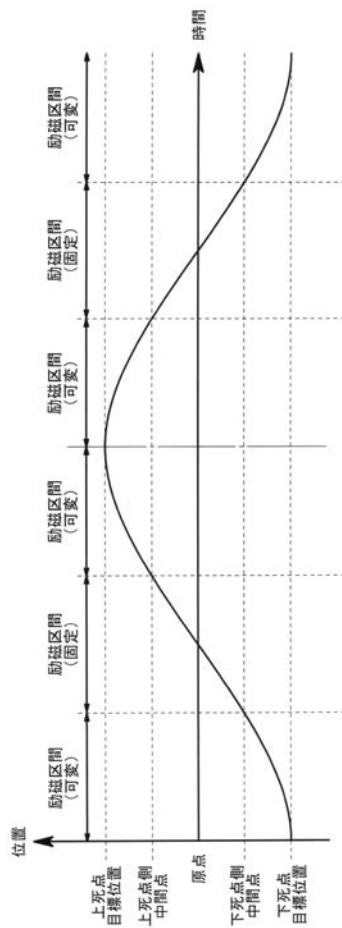
【図 3】



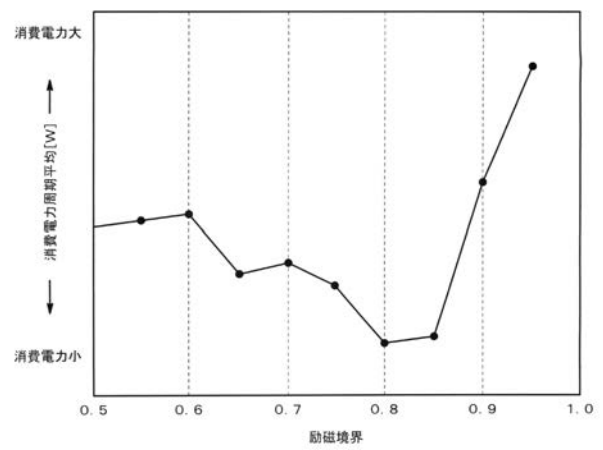
【図 4】



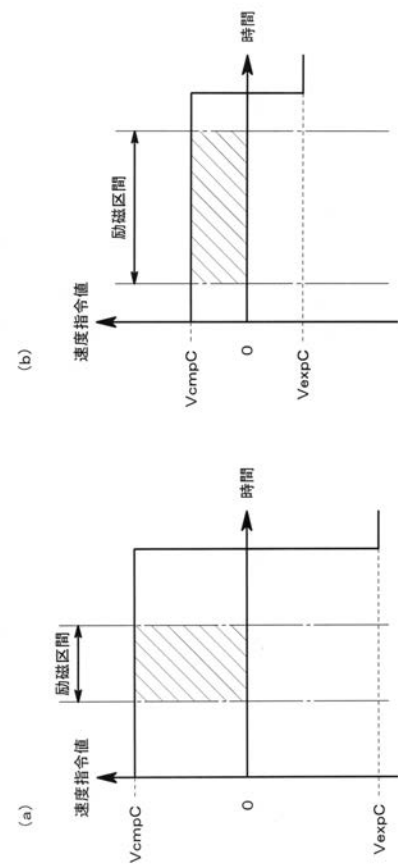
【図 5】



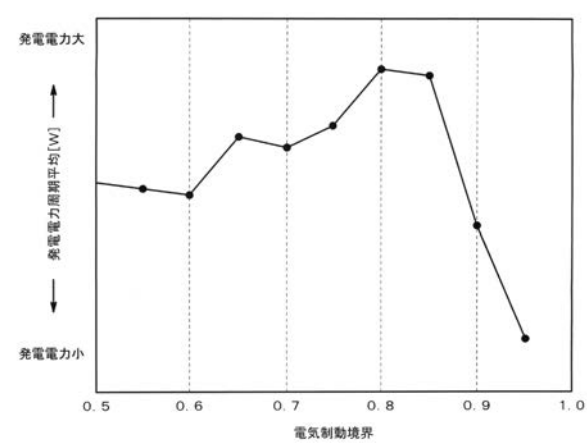
【図 6】



【 図 7 】



【 図 8 】



フロントページの続き

- (72)発明者 秋田 智行
愛知県長久手市横道4-1番地の1 株式会社豊田中央研究所内
- (72)発明者 中北 清己
愛知県長久手市横道4-1番地の1 株式会社豊田中央研究所内
- (72)発明者 堀田 義博
愛知県長久手市横道4-1番地の1 株式会社豊田中央研究所内