

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7363528号
(P7363528)

(45)発行日 令和5年10月18日(2023.10.18)

(24)登録日 令和5年10月10日(2023.10.10)

(51)国際特許分類

F I

H 0 2 P 23/14 (2006.01)
B 6 0 L 50/16 (2019.01)
B 6 0 L 3/00 (2019.01)
H 0 2 P 27/06 (2006.01)
G 0 1 K 7/36 (2006.01)

H 0 2 P 23/14
B 6 0 L 50/16 Z H V
B 6 0 L 3/00 N
H 0 2 P 27/06
G 0 1 K 7/36

請求項の数 7 (全29頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2020-12002(P2020-12002)
(22)出願日 令和2年1月28日(2020.1.28)
(65)公開番号 特開2021-118652(P2021-118652
A)
(43)公開日 令和3年8月10日(2021.8.10)
審査請求日 令和4年7月20日(2022.7.20)

(73)特許権者 000003137
マツダ株式会社
広島県安芸郡府中町新地3番1号
(74)代理人 110001427
弁理士法人前田特許事務所
(72)発明者 瀬尾 宣英
広島県安芸郡府中町新地3番1号 マツ
ダ株式会社内
(72)発明者 鈴木 玄理
広島県安芸郡府中町新地3番1号 マツ
ダ株式会社内
審査官 池田 貴俊

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 モータの磁石温度推定装置、及びそれを備えるハイブリッド車

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

磁石を有しかつ回転動力を出力するロータと、前記ロータに対しギャップを隔てて対向する複数のコイルを有するステータと、を備えるモータの磁石温度推定装置であって、

前記ロータの回転に応じて生じる誘起電圧を検出するセンサと、
前記ロータの回転数及び回転位置を検出するモータ回転センサと、

前記センサ及び前記モータ回転センサの検出信号が入力され、前記複数のコイルへの通電を通じて前記モータを制御するコントローラと、を備え、

前記ロータには、該ロータの回転方向において前記磁石と隣接する空隙が設けられ、

前記コントローラは、前記ロータの回転に伴って、前記磁石と、前記複数のコイルのうちの一のコイルと、がすれ違う際の所定期間にわたって検出される前記誘起電圧に基づいて、前記磁石の温度を推定し、

前記所定期間とは、前記磁石及び該磁石に隣接する他の磁石の中間に位置する部位と、前記一のコイルの中心軸線とが交わるタイミングを含まないように、該タイミングの前後に設定された期間であって、該期間に相当する電気角の範囲が、予め前記コントローラに記憶された期間であり、

前記コントローラは、前記電気角の範囲と、前記モータ回転センサの検出信号とに基づいて、前記所定期間にわたって前記誘起電圧を取得するとともに、該所定期間にわたって取得された前記誘起電圧の平均値に基づいて、前記磁石の温度を推定する

ことを特徴とするモータの磁石温度推定装置。

【請求項 2】

請求項 1 に記載されたモータの磁石温度推定装置において、
前記ロータの回転軸に垂直な断面上で、前記回転方向における前記空隙の寸法を D_1 とし、前記回転方向における前記コイルの直径を D_2 とすると、
 $D_1 \geq D_2 / 4 \dots (A)$

の関係が満足される

ことを特徴とするモータの磁石温度推定装置。

【請求項 3】

請求項 1 又は 2 に記載されたモータの磁石温度推定装置において、
前記空隙は、前記回転方向に沿って延び、
前記空隙は、前記回転方向において前記磁石から離間するにつれて、前記ロータの径方向における寸法が短くなる

ことを特徴とするモータの磁石温度推定装置。

10

【請求項 4】

請求項 3 に記載されたモータの磁石温度推定装置において、
前記空隙は、前記ロータにおける前記磁石の収容スペースと連通し、
前記収容スペースは、前記径方向における両側から前記磁石を挟持する一对の支持面を有し、

前記一对の支持面のうちの少なくとも一方は、前記空隙の内周面と面一に繋がっていることを特徴とするモータの磁石温度推定装置。

20

【請求項 5】

請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載されたモータの磁石温度推定装置において、
前記センサは、前記複数のコイルのうちの 1 つに重畳されるサーチコイルからなり、
前記サーチコイルは、前記モータを駆動するインバータとは独立した回路に接続され、
前記コントローラは、前記サーチコイルに生じる誘起電圧に基づいて前記磁石の温度を推定する

ことを特徴とするモータの磁石温度推定装置。

【請求項 6】

請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載されたモータの磁石温度推定装置において、
前記コントローラは、前記磁石の温度の推定結果に基づいて、該磁石の温度状態を判定し、

前記コントローラは、前記温度状態が異常であると判定される場合、前記モータの出力を制限する

ことを特徴とするモータの磁石温度推定装置。

30

【請求項 7】

請求項 1 から 6 のいずれか 1 項に記載されたモータの磁石温度推定装置と、
前記モータと、

前記モータと協働するエンジンと、を備える

ことを特徴とするハイブリッド車。

【発明の詳細な説明】

40

【技術分野】

【0001】

ここに開示する技術は、モータの磁石温度推定装置、及びそれを備えるハイブリッド車に関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献 1 には、モータの磁石温度推定装置の一例として、永久磁石型回転機の永久磁石の温度推定装置が開示されている。具体的に、この特許文献 1 に開示されている装置は、永久磁石の磁束密度を抽出するとともに、抽出された磁束密度に基づいて、永久磁石の温度を推定する。

50

【 0 0 0 3 】

また、特許文献 2 には、モータの磁石温度推定装置の別例として、電動車両用モータの冷却制御装置が開示されている。具体的に、この特許文献 2 に開示されている装置は、モータの駆動によって生じる誘起電圧を検知し、検知された誘起電圧に基づいて、モータの磁石温度を推定する。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 4 】

【 文献 】 特開 2 0 0 7 - 3 3 6 7 0 8 号 公 報

国際公開第 2 0 1 4 / 1 6 7 6 9 0 号

10

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 5 】

ところで、モータのロータを構成する磁石は、過度に高温になると不可逆的に減磁してしまう。したがって、モータの性能を保つためには、磁石が高温になったときに磁石温度を低下させる必要がある。磁石温度をより確実に低下させるためには、磁石温度を精度よく推定することが求められる。

【 0 0 0 6 】

ここで、磁石温度の推定方法としては、前記特許文献 2 に開示されているように、モータの駆動によって生じる誘起電圧を用いることが考えられる。しかしながら、モータの駆動中、ロータの回転に伴う磁束変化に起因して、誘起電圧は変動することになる。このことは、磁石温度を精度よく推定するには不都合である。

20

【 0 0 0 7 】

ここに開示する技術は、かかる点に鑑みてなされたものであり、その目的とするところは、誘起電圧の変動を抑制し、ひいては磁石温度の推定精度を高めることにある。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 8 】

本開示は、磁石を有しかつ回転動力を出力するロータと、前記ロータに対しギャップを隔てて対向する複数のコイルを有するステータと、を備えるモータの磁石温度推定装置に係る。

30

【 0 0 0 9 】

そして、本開示の第 1 の態様によれば、前記モータの磁石温度推定装置は、前記ロータの回転に応じて生じる誘起電圧を検出するセンサと、前記ロータの回転数及び回転位置を検出するモータ回転センサと、前記センサ及び前記モータ回転センサの検出信号が入力され、前記複数のコイルへの通電を通じて前記モータを制御するコントローラと、を備え、前記ロータには、該ロータの回転方向において前記磁石と隣接する空隙が設けられ、前記コントローラは、前記ロータの回転に伴って、前記磁石と、前記複数のコイルのうちの一のコイルと、がすれ違う際の所定期間にわたって検出される前記誘起電圧に基づいて、前記磁石の温度を推定し、前記所定期間とは、前記磁石及び該磁石に隣接する他の磁石の中間に位置する部位と、前記一のコイルの中心軸線とが交わるタイミングを含まないように、該タイミングの前後に設定された期間であって、該期間に相当する電気角の範囲が、予め前記コントローラに記憶された期間であり、前記コントローラは、前記電気角の範囲と、前記モータ回転センサの検出信号とに基づいて、前記所定期間にわたって前記誘起電圧を取得するとともに、該所定期間にわたって取得された前記誘起電圧の平均値に基づいて、前記磁石の温度を推定する。

40

【 0 0 1 0 】

ここで、「誘起電圧」の語は、磁石から発せられる磁束に起因した誘導起電力を指す。

【 0 0 1 1 】

一般に、ファラデーの誘導法則から明らかなように、誘起電圧の大きさは、一コイルに鎖交する磁束の時間変化に比例する。したがって、磁束の時間変化が相対的に大きく変化

50

するときには、誘起電圧もまた、相対的に大きく変動することになる。換言すれば、磁束の時間変化が可能な限り抑制されるようなタイミングで誘起電圧を検出することで、誘起電圧の変動を抑制することができる。

【0012】

本願発明者らが鋭意検討を重ねた結果、得られた知見によれば、ロータの回転に際して磁石とコイルとが向かい合うタイミングこそが、磁束の時間変化が抑制されるタイミングに他ならない。したがって、前記モータの磁石温度推定装置は、磁石とコイルとが向かい合う際に検出される誘起電圧に基づいて磁石温度を推定する。このように構成することで、誘起電圧の時間変動を可能な限り抑制することができる。

【0013】

また、前述のタイミングにおける誘起電圧の時間変化は、ロータに空隙を設けることでより一層抑制される。この現象は、各空隙がフラックスバリアとして機能することで、一コイルに向かい合う磁石の端部からの磁束漏れを低減し、その端部における磁束量変化を安定化するとともに、一コイルに向かい合う磁石に隣接した他の磁石からの磁束の回り込みが抑制されて発生する。

【0014】

このように、磁石とコイルとが向かい合う際に検出される誘起電圧を用いることと、空隙をフラックスバリアとして機能させることが相まって、誘起電圧の検出に際し、その時間変動を可能な限り抑制することができる。これにより、磁石温度を精度よく推定することができるようになる。

【0015】

ところで、誘起電圧に基づいて磁石温度を把握する術としては、誘起電圧の実効値、平均値及び最大値等を用いたり、誘起電圧を周波数成分に分解したときの最低次高調波を用いたりすることも考えられる。しかしながら、それらの方法を用いた場合、磁石全体の温度こそ推定できるものの、各磁石の温度を個別に推定するには不向きである。

【0016】

一方、前記の構成によれば、磁石毎に誘起電圧を検出することで、磁石温度を個別に推定することが可能となる。このように、前記の構成は、各磁石の温度を個別にかつ精度よく推定できるという点で有効である。

【0017】

また、前記構成によれば、前記コントローラは、誘起電圧の平均値に基づいて磁石温度を推定する。特定のタイミングで検出される誘起電圧ではなく、平均化を施した誘起電圧を用いることで、ノイズ等に起因した誘起電圧のバラツキの影響を低減することができる。これにより、磁石温度を精度よく推定する上で有利になる。

【0018】

また、本開示の第2の態様によれば、前記ロータの回転軸に垂直な断面上で、前記回転方向における前記空隙の寸法をD1とし、前記回転方向における前記コイルの直径をD2とすると、

$$D1 \geq D2 / 4 \dots (A)$$

の関係が満足される、としてもよい。

【0019】

この構成によれば、回転方向における空隙の寸法を長くすることで、そのフラックスバリアとしての効果を高めることができる。本願発明者らが鋭意検討を重ねた結果、得られた知見によれば、上式(A)が満足されるときに、フラックスバリアとしての機能を十分に発揮させることが可能となる。このことは、誘起電圧の時間変動をより確実に抑制し、ひいては、磁石温度を精度よく推定する上で有効である。

【0020】

また、本開示の第3の態様によれば、前記空隙は、前記回転方向に沿って延び、前記空隙は、前記回転方向において前記磁石から離間するにつれて、前記ロータの径方向における寸法が短くなる、としてもよい。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 1 】

この構成によれば、空隙において磁石に近接する部位は、径方向における寸法が相対的に長くなる分だけ断面積が広く確保され、フラックスバリアとしての機能を発揮させる上で有利になる。一方、空隙において磁石から離間する部位は、径方向における寸法が徐々に短くなって先細となるため、ロータの機械的強度を確保する上で有利になる。

【 0 0 2 2 】

このように、前記の構成によれば、フラックスバリアとしての機能を高めつつも、機械的強度を確保することができるようになる。

【 0 0 2 3 】

また、本開示の第4の態様によれば、前記空隙は、前記ロータにおける前記磁石の収容スペースと連通し、前記収容スペースは、前記径方向における両側から前記磁石を挟持する一对の支持面を有し、前記一对の支持面のうちの少なくとも一方は、前記空隙の内周面と面一に繋がっている、としてもよい。

10

【 0 0 2 4 】

この構成によれば、支持面と空隙の内周面とを面一に繋げることで、両面をスムーズに接続することが可能となる。この構成は、支持面と前記内周面との間に段差が存する構成に比して、誘起電圧を滑らかに変動させることが可能となる。これにより、誘起電圧の時間変動をより確実に抑制し、ひいては、磁石温度を精度よく推定する上で有利になる。

【 0 0 2 5 】

また、本開示の第5の態様によれば、前記センサは、前記複数のコイルのうちの1つに重畳されるサーチコイルからなり、前記サーチコイルは、前記モータを駆動するインバータとは独立した回路に接続され、前記コントローラは、前記サーチコイルに生じる誘起電圧に基づいて前記磁石の温度を推定する、としてもよい。

20

【 0 0 2 6 】

この構成によれば、サーチコイルを介することで、そのサーチコイルが重畳されたコイルに生じる誘起電圧を間接的に検出することが可能となる。この場合、前記モータの磁石温度推定装置は、ロータの回転に際し、サーチコイルが重畳されたコイルに対向する磁石の温度を検出することになる。これにより、磁石温度を個別に推定することが可能になる。

【 0 0 2 7 】

また、本開示の第6の態様によれば、前記コントローラは、前記磁石の温度の推定結果に基づいて、該磁石の温度状態を判定し、前記コントローラは、前記温度状態が異常であると判定される場合、前記モータの出力を制限する、としてもよい。

30

【 0 0 2 8 】

この構成によれば、前述のように、磁石温度を精度よく推定することで、磁石の温度状態を精度よく判定することができるようになる。これにより、モータの出力を制限すべきタイミングを従来よりも的確に判定することができ、ひいては、モータをより適切に制御することができるようになる。

【 0 0 2 9 】

また、本開示の第7の態様は、ハイブリッド車に係る。このハイブリッド車は、前記モータの磁石温度推定装置と、前記モータと、前記モータと協働するエンジンと、を備える。

40

【 0 0 3 0 】

この構成によれば、モータの磁石温度を精度よく推定することで、磁石温度の上昇をよりの確なタイミングで抑制することができる。これにより、モータの性能をより長期間にわたり保持することができるようになる。このことは、ハイブリッド車の長寿命化に資する。

【 発明の効果 】

【 0 0 3 1 】

以上説明したように、本開示によれば、誘起電圧の変動を抑制し、ひいては磁石温度の推定精度を高めることができる。

【 図面の簡単な説明 】

50

【 0 0 3 2 】

【図 1】図 1 は、自動車の構成を例示する概略図である。

【図 2 A】図 2 A は、モータの構成を概略的に例示する側面図である。

【図 2 B】図 2 B は、モータの構成を概略的に例示する断面図である。

【図 3】図 3 は、MCU 及びこれに関連する入出力装置を例示するブロック図である。

【図 4】図 4 は、モータの磁石温度推定装置の構成を例示するブロック図である。

【図 5】図 5 は、コイルに生じる誘起電圧を例示するグラフである。

【図 6】図 6 は、空隙面積と電圧安定性及び機械強度との関係を例示するグラフである。

【図 7】図 7 は、誘起電圧の高速フーリエ変換によって得られる振幅及び位相を例示する図である。

10

【図 8】図 8 は、磁石の磁束密度と磁石温度との関係を例示するグラフである。

【図 9】図 9 は、第 1 及び第 2 推定制御に関連する処理を例示するフローチャートである。

【図 10】図 10 は、第 1 推定部による磁石温度の推定手順を例示するフローチャートである。

【図 11】図 11 は、第 2 推定部による磁石温度の推定手順を例示するフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 3 3 】

以下、本開示の実施形態を図面に基づいて説明する。なお、以下の説明は例示である。

【 0 0 3 4 】

20

(1) 移動体

(1 - 1) 全体構成

図 1 は、移動体としての自動車 1 の構成を例示する概略図である。図 1 に示す自動車 1 は、4 輪のハイブリッド車である。ハイブリッド車としての自動車 1 は、駆動源として、モータ 3 と、このモータ 3 と協働するエンジン 2 と、を備える。エンジン 2 及びモータ 3 は、互いに協働することで、4 つの車輪 4 F, 4 F, 4 R, 4 R のうち、車体の後側に位置する駆動輪 4 R, 4 R を回転駆動する。この回転駆動によって、自動車 1 が移動（走行）する。

【 0 0 3 5 】

この自動車 1 の場合、エンジン 2 は車体の前側に配置され、駆動輪 4 R は前述のように車体の後側に配置される。すなわち、自動車 1 は、いわゆる FR 車である。さらに、この自動車 1 の場合、モータ 3 よりもエンジン 2 が主体となって動力を発生する。モータ 3 は、エンジン 2 の駆動をアシストする形で利用される。すなわち、自動車 1 は、いわゆるマイルドハイブリッド車である。また、モータ 3 は、駆動源として機能するばかりでなく、回生時には発電機としても利用される。

30

【 0 0 3 6 】

なお、自動車 1 は、マイルドハイブリッド車に限定されない。自動車 1 は、モータ 3 が主体となって動力を発生するように構成された、いわゆるフルハイブリッド車とすることもできる。

【 0 0 3 7 】

40

自動車 1 は、エンジン 2 及びモータ 3 の他、駆動系の装置として、第 1 クラッチ 5、インバータ 6、第 2 クラッチ 7、変速機 8、デファレンシャルギア 9、バッテリー 10 などを備える。これら装置の複合体（駆動システム）の作用により、自動車 1 は走行する。

【 0 0 3 8 】

自動車 1 はまた、制御系の装置として、エンジンコントロールユニット（ECU）20、モータコントロールユニット（MCU）21、変速機コントロールユニット（TCU）22、ブレーキコントロール（BCU）23、総合コントロールユニット（GCU）24などを備える。

【 0 0 3 9 】

制御系の装置には、各種センサが電氣的に接続されている。後述のように、自動車 1 は

50

、特にモータ 3 に関連したセンサとして、モータ回転センサ 5 1 と、サーチコイル 5 5 と、電圧センサ 5 6 と、を備える。

【 0 0 4 0 】

(1 - 2) 駆動系の装置

エンジン 2 は、例えばガソリンを燃料にして燃焼を行う内燃機関である。エンジン 2 は、いわゆる 4 サイクルエンジンである。すなわち、本実施形態に係るエンジン 2 は、吸気、圧縮、膨張及び排気の各サイクルを繰り返すことで回転動力を発生させる。なお、エンジン 2 の種類及び形態は、本実施形態に示すものに限定されない。エンジン 2 は、ディーゼルエンジン等、様々な形態を取り得る。

【 0 0 4 1 】

エンジン 2 は、回転動力を出力する出力軸（不図示）を備える。この出力軸は、車体の前後方向に沿わせた状態で、車幅方向における略中央部に配置される。自動車 1 は、吸気システム、排気システム、燃料供給システムなど、エンジン 2 に付随した様々なシステムを備える。それらのシステムの図示及び説明は、省略する。

【 0 0 4 2 】

図 2 A は、モータ 3 の構成を概略的に例示する側面図である。図 2 B は、モータ 3 の構成を概略的に例示する断面図である。図 2 A 及び図 2 B に示すモータ 3 は、図 1 に例示するようにエンジン 2 の後方に配置される。このモータ 3 は、第 1 クラッチ 5 を介してエンジン 2 と直列に連結される。モータ 3 は、3 相交流によって駆動される永久磁石型の同期モータである。図 2 A に示すように、モータ 3 は、大略、モータケース 3 1 と、シャフト 3 2 と、ロータ 3 3 と、ステータ 3 4 と、を備える。

【 0 0 4 3 】

モータケース 3 1 は、円柱状のスペースを区画する円筒状の容器からなる。モータケース 3 1 は、その中心軸方向における両端面が封止された状態で、自動車 1 の車体に固定され。ロータ 3 3 及びステータ 3 4 は、モータケース 3 1 に収容される。シャフト 3 2 は、その中心軸方向における両端部をそれぞれモータケース 3 1 から突出させた状態で、モータケース 3 1 に回転自在に支持される。

【 0 0 4 4 】

第 1 クラッチ 5 は、シャフト 3 2 の一端部（前端部）と、エンジン 2 の出力軸との間に介在するように設置される。第 1 クラッチ 5 は、出力軸とシャフト 3 2 とが連結された状態（連結状態）と、出力軸とシャフト 3 2 とが分離した状態（解放状態）と、の間で切替可能に構成される。

【 0 0 4 5 】

第 2 クラッチ 7 は、シャフト 3 2 の他端部（後端部）と、変速機 8 の入力軸との間に介在するように設置される。第 2 クラッチ 7 は、シャフト 3 2 と入力軸とが連結された状態（連結状態）と、シャフト 3 2 と入力軸とが分離した状態（解放状態）と、の間で切替可能に構成されている。

【 0 0 4 6 】

なお、第 1 クラッチ 5 及び第 2 クラッチ 7 は、それぞれ、前述の連結状態と解放状態との間の状態（部分連結状態）において、シャフト 3 2 を介して伝達される動力の大きさを調整可能に構成される。

【 0 0 4 7 】

ロータ 3 3 は、磁石 3 5 を有しかつ回転動力を出力するように構成される。具体的に、本実施形態に係るロータ 3 3 は、円柱状の部材からなる。この円柱状の部材は、中心に軸孔を有する複数の金属板を、その中心軸方向に沿って積層することで構成される。ロータ 3 3 の軸孔に対してシャフト 3 2 の中間部分を固定することで、ロータ 3 3 は、シャフト 3 2 と一体化される。

【 0 0 4 8 】

ロータ 3 3 の外周部分には、該ロータ 3 3 の回転方向に沿って、複数の磁石 3 5 が配置される。複数の磁石 3 5 は、ステータ 3 4 の内周面に S 極を指向させた第 1 磁石 3 5 a と

10

20

30

40

50

、回転方向において第1磁石35aと隣接しかつステータ34の内周面にN極を指向させた第2磁石35bと、を含む。

【0049】

なお、「ロータ33の回転方向」は、該ロータ33、ひいてはステータ34及びモータ3の周方向に等しい。以下の記載では、「ロータ33の回転方向」の語を、単に「回転方向」という。同様に、「ロータ33の径方向」の語を、以下の記載では単に「径方向」という。

【0050】

また、以下の記載では、ステータ34に対する第1磁石35aの姿勢を明確にするために、第1磁石35aをS磁石35aともいう。同様に、第2磁石35bをN磁石35bともいう。

10

【0051】

複数の磁石35は、例えば図2Aに示す構成では、4個の第1磁石35aと、4個の第2磁石35bと、からなる。第1磁石35a及び第2磁石35bは、回転方向に沿って、等間隔で交互に並ぶように配置される。

【0052】

また、複数の磁石35は、2A及び図2Bに示す断面、つまりシャフト32に垂直な断面上では、それぞれ、径方向の寸法に比して回転方向の寸法が長い矩形状に形成される。

【0053】

また、複数の磁石35は、いずれも、いわゆる磁力可変マグネットとして構成される。すなわち、複数の磁石35は、それぞれ、各磁石35から発せられる磁力の大きさを大小に可変することができる。通常、この種のモータ3には、その磁力を長期にわたり保持できるように、保磁力(Coercivity)が大きい永久磁石が使用される。このモータ3では、磁力を比較的容易に変更できるように、通常よりも保持力の小さい永久磁石が磁石35として用いられる。

20

【0054】

磁石35として用いられる永久磁石には、フェライト磁石、ネオジム磁石、サマリウムコバルト磁石、アルニコ磁石など、様々な種類があり、保持力も様々である。磁石35の素材は、使用に応じて選択可能であり、特に限定されない。

【0055】

また、各磁石35は、ロータ33の周縁に沿って区画された收容スペース37に收容される。図2Bに例示するように、收容スペース37は、磁石35を支持するための一对の支持面37a, 37bによって区画される。一对の支持面37a, 37bは、径方向における両側から磁石35を挟持する。

30

【0056】

ステータ34は、ロータ33に対しギャップを隔てて対向するように配置された複数のコイル36を有する。具体的に、本実施形態に係るステータ34は、複数の金属板を積層してなるステータコア34aと、そのステータコア34aに電線を巻回してなる複数のコイル36と、を有する。

【0057】

このうち、ステータコア34aには、径方向に沿って放射状に延びる複数のティース34bが設けられる。複数のティース34bの間に区画されるスロットには、所定の順序で電線が巻回される。そうして巻き掛けられた電線によって、複数のコイル36が形成される。すなわち、複数のコイル36は、それぞれ、いわゆる集中巻きのコイルとして構成されている。

40

【0058】

複数のコイル36は、流れる電流の位相が異なるU相、V相及びW相からなる3相のコイル群を構成する。各コイル群は、回転方向に沿って順番に配置される。例えば図2Aに示す構成では、複数のコイル36は、計12個のコイル36からなる。12個のコイル36は、4つのコイル36からなるU相コイル群と、4つのコイル36からなるV相コイル

50

群と、4つのコイル36からなるW相コイル群と、に区分される。

【0059】

以下、U相コイル群に属するコイル36をU相コイル36uと呼称し、V相コイル群に属するコイル36をV相コイル36vと呼称し、W相コイル群に属するコイル36をW相コイル36wと呼称する場合がある(図2B等を参照)。

【0060】

なお、本実施形態では、8極12スロットのモータ3を例示したが、モータ3の構成は、この例に限定されない。モータ3は、より多くの極数及びスロット数を有するよう構成してもよい。例えば、Nを整数として、 $2 \times N$ 個の磁石35と、 $3 \times N$ 個のスロットとでモータ3を構成することができる。

10

【0061】

コイル36に通電するために、これらコイル36には3本の接続ケーブル36a, 36a, 36aが接続される。3本の接続ケーブル36a, 36a, 36aは、U相のコイル群に接続される接続ケーブル36aと、V相のコイル群に接続される接続ケーブル36aと、W相のコイル群に接続される接続ケーブル36aと、を有する。これら接続ケーブル36a, 36a, 36aは、モータケース31の外側に導出されるとともに、インバータ6を介してバッテリー10と接続される。この自動車1の場合、バッテリー10は、50V以下の定格電圧とされたバッテリー、具体的には48Vの直流バッテリー(低電圧バッテリー)が用いられる。

【0062】

本実施形態に係るバッテリー10は、従来知られたハイブリッド車に搭載されるバッテリーのように高電圧ではない。そのため、バッテリー10自体を軽量かつコンパクトにすることができる。さらに、高度な感電対策が不要となるため、絶縁部材等も簡素化することができる。この簡素化によって、バッテリー10をより軽量かつコンパクトにすることができる。このように、自動車1の重量を抑制することができるため、燃費及び電力消費を抑制することができる。

20

【0063】

バッテリー10は、インバータ6に直流電流を供給する。インバータ6は、その直流電流をU相、V相及びW相からなる3相の交流電流に変換する。インバータ6は、U相に変換された交流電流をU相コイル群に通電し、V相に変換された交流電流をV相コイル群に通電し、W相に変換された交流電流をW相コイル群に通電する。

30

【0064】

交流電流の通電により、各コイル群をなすコイル36が磁界を生成する。そうして、磁界を生成したコイル36と、各磁石35とが互いに引力または斥力を及ぼし合うことで、ロータ33が回転駆動される。回転駆動されたロータ33は、シャフト32を介して回転動力を出力する。この回転動力は、シャフト32及び第2クラッチ7を介して変速機8に入力される。

【0065】

この自動車1の場合、変速機8は、多段式自動変速機、いわゆるATである。変速機8は、一方の端部に入力軸を有し、他方の端部に出力軸を有する。これら入力軸と出力軸との間に、複数の遊星歯車機構、クラッチ、ブレーキなどの変速機構が組み込まれる。そうした変速機構を切り替えることで、自動車1の前進又は後退を切り替えたり、変速機8の入力軸と出力軸との間で回転数を変更したりすることができる。変速機8の出力軸は、車体の前後方向に沿って延びる。この出力軸は、該出力軸と同軸に配置されるプロペラシャフト11を介してデファレンシャルギア9に連結される。

40

【0066】

デファレンシャルギア9は、一对の駆動シャフト13, 13に連結される。一对の駆動シャフト13, 13は、車幅方向に延びて左右の駆動輪4R, 4Rに連結される。プロペラシャフト11を介して出力される回転動力は、デファレンシャルギア9によって各駆動シャフト13に振り分けられた後、各駆動シャフト13を通じて各駆動輪4Rに伝達され

50

る。各車輪 4 F , 4 F , 4 R , 4 R には、その回転を制動するためのブレーキ 1 4 が取り付けられる。

【 0 0 6 7 】

また、本実施形態に係るモータ 3 は、ロータ 3 3 を構成する磁石 3 5 の温度（以下、単に「磁石温度」という）を判定するために、2 種類のセンサ 5 5 , 5 6 を備える。2 種類のセンサ 5 5 , 5 6 は、サーチコイル 5 5 と、電圧センサ 5 6 と、からなる（図 3 参照）。これらのセンサ 5 5 , 5 6 は、双方とも、ロータ 3 3 の回転に応じて生じる誘起電圧を検出することができる。

【 0 0 6 8 】

このうち、サーチコイル 5 5 は、図 2 B に例示するように、複数のコイル 3 6 のうちのいずれか 1 つに電線を重畳することで構成される。サーチコイル 5 5 は、電線が重畳されたコイル 3 6 と同軸になる。サーチコイル 5 5 は、サーチ用接続ケーブル 3 6 b を介することで M C U 2 1 に接続される。サーチ用接続ケーブル 3 6 b は、インバータ 6 に通じる 3 本の接続ケーブル 3 6 a , 3 6 a , 3 6 a とは電気的に切り離されている。すなわち、サーチ用接続ケーブル 3 6 b は、モータ 3 を駆動するインバータ 6 とは独立した回路に接続されるようになっている。

10

【 0 0 6 9 】

サーチコイル 5 5 は、ロータ 3 3 の回転に際し、サーチコイル 5 5 が構成されたコイル 3 6 を磁石 3 5 が通り過ぎるときに生じる誘起電圧を検出し、その検出信号を M C U 2 1 に入力する。

20

【 0 0 7 0 】

一方、電圧センサ 5 6 は、詳細な図示は省略するが、モータ 3 の中性点と、各接続ケーブル 3 6 a , 3 6 a , 3 6 a との間の電圧を検出し、その検出信号を M C U 2 1 に入力する。

【 0 0 7 1 】

ここで、図 1 等に示すモータ 3 は、サーチコイル 5 5 及び電圧センサ 5 6 による誘起電圧の検出に適した特徴部を備える。具体的に、本実施形態に係るロータ 3 3 には、回転方向において磁石 3 5 と隣接する空隙 3 8 が設けられる。この空隙 3 8 は、回転方向における磁石 3 5 の両端に隣接して配置される。

【 0 0 7 2 】

各空隙 3 8 は、いわゆるフラックスバリアとして機能する。すなわち、空隙 3 8 は、ある磁石 3 5 が発する磁束が、ロータ 3 3 内で他の磁石 3 5 に回り込むのを抑制する機能をなす。これにより、ギャップを介してステータ 3 3 と鎖交する磁束を増やすことができる。

30

【 0 0 7 3 】

詳しくは、各空隙 3 8 は、回転方向に沿って、対応する磁石 3 5 から離間する方向に延びる。回転方向における各空隙 3 8 の寸法は、コイル 3 6 の寸法に基づいて規定される。具体的に、ロータ 3 3 の回転軸（シャフト 3 2 ）に垂直な断面、つまり図 2 B に示す断面上で、回転方向における空隙 3 8 の寸法を D_1 とし、回転方向におけるコイル 3 6 の直径を D_2 とすると、

$$D_1 \geq D_2 / 4 \quad \dots (A)$$

の関係が満足される。式 (A) は、回転方向における空隙 3 8 の寸法の下限を規定する。また、図 2 B に示す断面上で、回転方向における磁石 3 5 同士の間隔を D_3 とすると、

$$D_3 \geq 2 \times D_1 \quad \dots (B)$$

の関係が満足される。式 (B) は、回転方向における空隙 3 8 の寸法の上限を規定する。

【 0 0 7 4 】

式 (A) 及び式 (B) より、下式 (C) に示す関係が満足される。

【 0 0 7 5 】

$$D_2 / 4 \leq D_1 \leq D_3 / 2 \quad \dots (C)$$

また、各空隙 3 8 は、回転方向において磁石 3 5 から離間するにつれて、径方向における寸法が短くなる。すなわち、各空隙 3 8 は、図 2 B に例示するように先細に形成される

40

50

。同図に示すように、各空隙 3 8 の先端部は、回転方向において互いに向かい合う。

【 0 0 7 6 】

また、空隙 3 8 は、ロータ 3 3 における磁石 3 5 の收容スペース 3 7 と連通する。図 2 B に示すように、收容スペース 3 7 を区画する支持面 3 7 a , 3 7 b のうち、径方向の外側に位置する支持面 3 7 a は、空隙 3 8 の内周面と面に繋がっている。一方、径方向の内側に位置する支持面 3 7 b は、空隙 3 8 の内周面に対し、段差を介して繋がっている。

【 0 0 7 7 】

(1 - 3) 制御系の装置

自動車 1 は、該自動車 1 の走行をコントロールするために、前述した E C U 2 0、M C U 2 1、T C U 2 2、B C U 2 3 及び G C U 2 4 を備える。これらのユニットのうち、E C U 2 0 は、エンジン 2 の作動を主に制御するユニットである。M C U 2 1 は、モータ 3 の作動を主に制御するユニットである。T C U 2 2 は、第 1 クラッチ 5、第 2 クラッチ 7 及び変速機 8 の作動を主に制御するユニットである。B C U 2 3 は、ブレーキ 1 4 の作動を主に制御するユニットである。G C U 2 4 は、E C U 2 0、M C U 2 1、T C U 2 2 及び B C U 2 3 と電氣的に接続され、これらのユニットを総合的に制御する上位ユニットである。

【 0 0 7 8 】

前述したユニットのうち、M C U 2 1 は、「モータの制御装置」の主体を構成する。M C U 2 1 は、コントローラの一例である。図 3 に示すように、M C U 2 1 は、マイクロコンピュータ 2 1 1 と、メモリ 2 1 2 と、I / F 回路 2 1 3 と、を備える。マイクロコンピュータ 2 1 1 は、プログラムを実行する。メモリ 2 1 2 は、プログラム及びデータを格納する。メモリ 2 1 2 は、例えば R A M (Random Access Memory) や R O M (Read Only Memory) である。I / F 回路 2 1 3 は、電気信号の入出力を行う。

【 0 0 7 9 】

また、G C U 2 4 等、M C U 2 1 以外の各ユニットは、M C U 2 1 と協働することによって「モータの制御装置」を構成する。各ユニットは、M C U 2 1 と同様に、マイクロコンピュータ (不図示) と、メモリ (不図示) と、I / F 回路 (不図示) と、を備える。

【 0 0 8 0 】

M C U 2 1 には、センサとしてのサーチコイル 5 5 及び電圧センサ 5 6 が接続される。サーチコイル 5 5 及び電圧センサ 5 6 の検出信号は、それぞれ M C U 2 1 に入力される。サーチコイル 5 5 及び電圧センサ 5 6 以外のセンサのうち、自動車 1 の走行に関連するものとしては、以下のセンサ 5 0 - 5 4 が上げられる。

【 0 0 8 1 】

まず、エンジン回転センサ 5 0 は、エンジン 2 の回転数を検出して E C U 2 0 に入力する。エンジン回転センサ 5 0 は、エンジン 2 に取り付けられる。モータ回転センサ 5 1 は、ロータ 3 3 の回転数及び回転位置を検出して M C U 2 1 に入力する。モータ回転センサ 5 1 は、モータ 3 に取り付けられる。電流センサ 5 2 は、各コイル 3 6 に通電される電流値を検出して M C U 2 1 に入力する。電流センサ 5 2 は、接続ケーブル 3 6 a に取り付けられる。

【 0 0 8 2 】

磁気センサ 5 3 は、磁石 3 5 が発する磁界を検出し、その強度を示す信号を M C U 2 1 に入力する。磁気センサ 5 3 は、モータ 3 に取り付けられる。アクセルセンサ 5 4 は、自動車 1 の駆動に要求される出力に相当するアクセル開度を検出し、その大きさを示す信号を E C U 2 0 に入力する。アクセルセンサ 5 4 は、運転者が自動車 1 を駆動するときに踏み込まれるアクセルペダル 1 5 に取り付けられる。

【 0 0 8 3 】

これらセンサから入力される検出信号に基づいて、各ユニットが協働して駆動システムを制御することで自動車 1 が走行する。エンジン 2 の駆動によって自動車 1 が走行するときには、アクセルセンサ 5 4 及びエンジン回転センサ 5 0 の検出信号に基づいて、E C U 2 0 がエンジン 2 の運転を制御する。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 4 】

そして、TCU 2 2 は、第 1 クラッチ 5 及び第 2 クラッチ 7 が連結状態になるように制御する。自動車 1 の制動時には、BCU 2 3 が各ブレーキ 1 4 を制御する。回生による制動時には、TCU 2 2 は、第 1 クラッチ 5 が解放状態又は部分連結状態となるように制御するとともに、第 2 クラッチ 7 が連結状態となるように制御する。こうすることで、MCU 2 1 は、モータ 3 によって発電を実行し、その発電によって生成される電力がバッテリー 1 0 に回収されるように制御する。

【 0 0 8 5 】

一方、MCU 2 1 は、複数のコイル 3 6 への通電を通じてモータ 3 を制御する。詳しくは、MCU 2 1 は、モータ 3 が単独で回転動力を出力する状態で、あるいは、モータ 3 がエンジン 2 の駆動をアシストする状態で、モータ 3 の回転動力によって自動車 1 が走行するように制御する。

10

【 0 0 8 6 】

具体的に、アクセルセンサ 5 4、エンジン回転センサ 5 0 等の検出値に基づいて、ECU 2 0 がエンジン 2 の回転動力を設定する。それに伴い、予め設定されたエンジン 2 とモータ 3 との間での出力の分配比率に従って、所定の出力範囲に収まるように、GCU 2 4 がモータ 3 の回転動力の要求量を設定する。MCU 2 1 は、その要求量が出力されるように、モータ 3 に流れる 3 相交流を介してモータ 3 を制御する。

【 0 0 8 7 】

さらに詳しくは、MCU 2 1 は、3 相交流におけるトルク電流成分を制御することで、ロータ 3 3 に発生するトルクを変更する。それによって、モータ 3 に、回転動力の要求量を出力させる。

20

【 0 0 8 8 】

MCU 2 1 はまた、3 相交流における磁化電流成分を制御することで、コイル 3 6 に発生する磁界強度を変更する。詳細は省略するが、コイル 3 6 に発生する磁界強度を変更することで、磁石 3 5 によって生成される磁界強度（磁石 3 5 の磁力）を変更することができる。具体的に、磁石 3 5 の磁力は、駆動電流によってコイル 3 6 に発生する磁界強度と略一致するように変更される。

【 0 0 8 9 】

また、MCU 2 1 は、予め定められている制御ロジックに従って、磁石温度の推定と、磁石温度に基づいたモータ制御と、を実行することができる。以下、磁石温度を推定するための制御ロジックについて詳細に説明する。

30

【 0 0 9 0 】

(2) 磁石温度の推定ロジック

MCU 2 1 は、磁石温度を判定するための制御ロジックとして、2 種類の推定ロジックを単体で又は組み合わせて実行することができる。すなわち、MCU 2 1 は、「モータの磁石温度推定装置」を構成する。モータの磁石温度推定装置としての MCU 2 1 の構成は、図 4 に示す通りである。

【 0 0 9 1 】

2 種類の推定ロジックのうち、第 1 の推定ロジックは、誘起電圧が平坦となるタイミングに着目した制御ロジックである。また、第 2 の推定ロジックは、誘起電圧の高調波成分に着目した制御ロジックである。2 種類の推定ロジックは、予めメモリ 2 1 2 に記憶されている。

40

【 0 0 9 2 】

(2 - 1) 第 1 の推定ロジック

図 5 は、コイル 3 6 に生じる誘起電圧を例示するグラフである。図 6 は、空隙面積と電圧安定性及び機械強度との関係を例示するグラフである。ここでは、図 5 及び図 6 を参照しながら、第 1 の推定ロジックについて説明する。

【 0 0 9 3 】

図 5 に示すグラフ G 1 は、U 相コイル 3 6 u に生じる誘起電圧 V_u 、V 相コイル 3 6 v

50

に生じる誘起電圧 V_v 、及びW相コイル 36w に生じる誘起電圧 V_w それぞれの時間変化を例示している。

【0094】

以下、U相コイル 36u に生じる誘起電圧 V_u を例に取り説明する。この場合、誘起電圧 V_u は、4つのU相コイル 36u のうちの1つにサーチコイル 55 を重畳した上で、そのサーチコイル 55 における電圧をモニターすることで検出される。以下の説明は、V相コイル 36v 及びW相コイル 36w についても同様である。

【0095】

図5の下部に示すように、S磁石(第1磁石) 35a が生成する磁束のうち、このS磁石 35a を貫く磁束は、径方向の内側を指向する(矢印 A_s を参照)。一方、N磁石(第2磁石) 35b が生成する磁束のうち、このN磁石 35b を貫く磁束は、径方向の外側を指向する(矢印 A_n を参照)。S磁石 35a 及びN磁石 35b によって生成される磁束と、例えばU相コイル 36u と、が鎖交することで、U相コイル 36u に誘起電圧 V_u が生じる。

10

【0096】

ここで、ファラデーの誘導法則から明らかなように、誘起電圧 V_u の大きさは、U相コイル 36u に鎖交する磁束の時間変化に比例する。したがって、磁束の時間変化が最大となるタイミングで、誘起電圧 V_u はピークを迎えることになる。

【0097】

具体的に、磁束の時間変化が最大となるタイミングは、ロータ 33 の外周部のうちS磁石 35a とN磁石 35b との中間に位置する部位と、U相コイル 36u の中心軸線 L_c と、が交わるタイミングに等しい(図5の囲み部 C2 を参照)。このタイミングは、U相コイル 36u に鎖交する磁束の向きが反転するタイミングに相当する。

20

【0098】

一方、磁束の時間変化が最小あるいは可及的に小さくなるタイミングにおいては、誘起電圧 V_u の時間変化を可能な限り抑制することができる。具体的に、S磁石 35a 又はN磁石 35b と、U相コイル 36u と、が向かい合うタイミングにおいて、誘起電圧 V_u の時間変化は最小となる(図5の囲み部 C1 及びC3 を参照)。さらに詳しくは、回転方向におけるS磁石 35a 又はN磁石 35b の中央部と、U相コイル 36u の中心軸線 L_c と、とが交わるタイミング(以下、「最小タイミング」ともいう)において、誘起電圧 V_u の時間変化は最小となる。

30

【0099】

図5の上部に示す例では、囲み部 C1 及びC3 において誘起電圧 V_u が実質的に平坦となることを見て取れよう。具体的に、囲み部 C1 においては、N磁石 35b による磁束が主体となって生じる誘起電圧 V_u が平坦となる。囲み部 C3 においては、S磁石 35a による磁束が主体となって生じる誘起電圧 V_u が平坦となる。以下、誘起電圧 V_u において平坦となる部分を「誘起電圧の肩部」と呼称する。

【0100】

また、誘起電圧 V_u の肩部における時間変化は、ロータ 33 に空隙 38 を設けることでより平坦となる。この現象は、空隙 38 がフラックスバリアとして機能することで、U相コイル 36u に向かい合う磁石 35 の端部からの磁束漏れを低減し、その端部における磁束量変化を安定化するとともに、U相コイル 36u に向かい合う磁石 35 に隣接した他の磁石 35 からの磁束の回り込みが抑制されて発生する。

40

【0101】

空隙 38 が奏する効果は、図6に示す通りである。図6の上段に示すグラフ G2 は、空隙面積と電圧安定性との関係を示す。一方、図6の下段に示すグラフ G3 は、空隙面積と電圧安定性との関係を示す。ここで、「空隙面積」の語は、シャフト 32 に垂直な断面、すなわち図2Bに示す断面上での各空隙 38 の断面積を意味する。一方、「電圧安定性」の語は、誘起電圧 V_u の時間変化の大小を意味する。誘起電圧 V_u の時間変化が大きいとき、該時間変化が小さいときに比して、電圧安定性は低くなる。また、「機械強度」の語

50

は、ロータ 33 の機械的強度を意味する。

【0102】

図 6 のグラフ G2 に示すように、空隙面積が大きいときには、それが小さいときに比して電圧安定性は高くなる。しかしながら、同図のグラフ G3 に示すように、空隙面積が大きいときには、それが小さいときに比して機械強度は低くなる。図 6 に示すように、所定の範囲 R1 内に収まるように空隙面積を設定することで、電圧安定性と機械強度を両立することができる。この範囲 R1 内に空隙面積を設定した場合、その空隙 38 の寸法 D1 は、上式 (C) を満足することになる。上式 (C)、ひいては式 (A) を満足するように構成することで、各空隙 38 に、フラックスバリアとしての機能を十分に発揮させることが可能となる。

10

【0103】

以上の知見を踏まえ、本願発明者らは、第 1 の推定ロジックを以下の如く構築した。

【0104】

すなわち、本実施形態に係る MCU21 は、ロータ 33 の回転に伴って磁石 35 と複数のコイル 36 のいずれか 1 つとが向かい合う際に検出される誘起電圧 V_u に基づいて、磁石温度を推定する。

【0105】

具体的に、MCU21 は、サーチコイル 55 を介して誘起電圧 V_u の肩部を検出する。誘起電圧 V_u の肩部を検出することは、時間変化が最小となるタイミングで誘起電圧 V_u を検出することに等しい。誘起電圧 V_u の肩部を検出することと、空隙 38 をフラックスバリアとして機能させることが相まって、誘起電圧 V_u の検出に際し、その時間変動を可能な限り抑制することができる。これにより、誘起電圧 V_u の検出精度を高めることができる。

20

【0106】

MCU21 は、そうして検出された誘起電圧 V_u に基づいて、磁石温度を推定する。周知のように、誘起電圧 V_u と、磁石 35 が発する磁束密度と、は比例関係にある。また、図 8 のグラフ G7 に例示するように、磁石 35 が発する磁束密度と、磁石温度と、は直線状の関係なす。したがって、誘起電圧 V_u を検出することで、磁束密度を介して磁石温度を算出することができる。

【0107】

特に本実施形態では、MCU21 のメモリ 212 には、磁束密度と磁石温度との関係を示すテーブルが予め記憶されている。したがって、MCU21 は、誘起電圧 V_u に基づいて磁束密度を算出するとともに、そうして算出された磁束密度とメモリ 212 に記憶されたテーブルとを用いることで、磁石温度を推定することができる。誘起電圧 V_u の検出精度を高めた状態で磁石温度を推定することで、磁石温度を精度よく推定することができるようになる。

30

【0108】

また、MCU21 のメモリ 212 には、ロータ 33 の回転に際し、回転方向における磁石 35 の中央部と、複数のコイル 36 の各々の中心軸線 L_c と、が交わるタイミング (最小タイミング) が予め記憶されており、MCU21 は、その最小タイミングで誘起電圧 V_u を取得する。最小タイミングは、誘起電圧 V_u の時間変化が最小となるタイミングに等しい。したがって、最小タイミングで誘起電圧 V_u を検出することは、その検出精度を高める上で有効である。また、最小タイミングを予め記憶しておくことで、誘起電圧 V_u をより確実に抑制することが可能となり、ひいては、磁石温度を精度よく推定する上で有利になる。

40

【0109】

また、MCU21 による誘起電圧 V_u の検出は、最小タイミングにおいてのみ実行されるのではなく、最小タイミングを含んだ所定期間 T_s にわたり実行することもできる。

【0110】

具体的に、MCU21 は、最小タイミングを含んだ所定期間 T_s にわたって誘起電圧 V

50

uを取得するとともに、その所定期間 T_s にわたって取得された誘起電圧 V_u の平均値に基づいて、磁石温度を推定する。特定のタイミングで検出される誘起電圧 V_u ではなく、その平均値を用いることで、誘起電圧 V_u の時間変動の影響を可能な限り抑制したり、ノイズ等に起因した誘起電圧 V_u のバラツキの影響を低減したりすることができる。これにより、磁石温度を精度よく推定する上で有利になる。

【0111】

なお、本実施形態に係る所定期間 T_s は、誘起電圧 V_u がピークを迎えるタイミングを含まないように設定される。すなわち、所定期間 T_s は、回転方向において2つの磁石35の中間に位置する部位と、コイル36の中心軸線 L_c と、が交わるタイミングを含まない期間として設定される。

【0112】

また、MCU21は、モータ3の駆動に要するコイル36ではなく、それらコイル36のうちの1つに重畳されるサーチコイル55に生じる誘起電圧 V_u に基づいて、磁石温度を推定する。サーチコイル55を用いることで、そのサーチコイル55が重畳されたコイル36に生じる誘起電圧を間接的に検出することが可能となる。これにより、サーチコイル55とすれ違う各磁石35の温度を個別に推定することができるようになり、ひいては磁石温度をより正確に判定することができるようになる。磁石温度の正確な判定は、後述のように、磁石温度に基づいたモータ制御を実行するときに、取り分け有効となる。

【0113】

なお、誘起電圧 V_u に基づいて磁石温度を把握する術としては、誘起電圧 V_u の実効値、平均値及び最大値等を用いたり、第2の推定ロジックのように、誘起電圧 V_u を周波数成分に分解したときの最低次高調波を用いたりすることも考えられる。しかしながら、それらの方法を用いた場合、磁石35全体の温度や、磁石35間の温度差こそ精度よく推定できるものの、各磁石35の温度を個別に推定するには不向きである。

【0114】

一方、第1の推定ロジックによれば、磁石35毎に誘起電圧を検出することで、磁石温度を個別に推定することが可能となる。このように、第1の推定ロジックは、各磁石35の温度を個別にかつ精度よく推定できるという点で有効である。

【0115】

また、図2Bに例示したように、各空隙38は、回転方向において磁石35から離間するにつれて、ロータ33の径方向における寸法が短くなる。この場合、空隙38において磁石35に近接する部位は、径方向における寸法が相対的に長くなる分だけ断面積が広く確保され、フラックスバリアとしての機能を発揮させる上で有利になる。一方、空隙38において磁石から離間する部位は、径方向における寸法が徐々に短くなって先細となるため、ロータ33の機械的強度を確保する上で有利になる。

【0116】

また、図2Bに例示したように、一对の支持面37a, 37bのうち、径方向の外側に位置する一方の支持面37aは、空隙38の内周面と面一に繋がっている。支持面37aと空隙38の内周面とを面一に繋げることで、両面をスムーズに接続することが可能となる。この構成は、支持面37aと空隙38の内周面との間に段差が存する構成に比して、誘起電圧 V_u を滑らかに変動させることが可能となる。これにより、誘起電圧 V_u の時間変動をより確実に抑制し、ひいては、磁石温度を精度よく推定する上で有利になる。

【0117】

(2-2) 第2の推定ロジック

図7は、誘起電圧の高速フーリエ変換によって得られる振幅及び位相を例示する図である。図8は、磁石35の磁束密度と磁石温度との関係を例示するグラフである。ここでは、図7及び図8を参照しながら、第2の推定ロジックについて説明する。

【0118】

以下、U相コイル36uに生じる誘起電圧 V_u を例に取り説明する。この場合、誘起電圧 V_u は、モータ3の中性点と、U相コイル36uに接続される接続ケーブル36aとの

10

20

30

40

50

間の電位差をモニターすることで検出される。以下の説明は、V相コイル36v及びW相コイル36wについても同様である。

【0119】

図7の左部に示すグラフG4は、U相コイル36uに生じる誘起電圧Vuを示す。一方、図7の右部に示す棒グラフG5は、その誘起電圧Vuを高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)をすることで得られる周波数スペクトルの絶対値(振幅)を示す。また、図7の右部に示す折れ線グラフG6は、FFTによって得られる周波数スペクトルの偏角(位相)を示す。

【0120】

また、図7の右部に示す折れ線グラフG6'は、S磁石35bとN磁石35bとの温度差がグラフG6と同一であり、かつ、S磁石35bとN磁石35bとの温度の大小関係が、グラフG6に示す状況とは逆転した場合を示す。

【0121】

グラフG4に示すように、誘起電圧Vuの波形は、正弦波から相違する。このことは、第1の推定ロジックの説明の際に言及したように、ロータ33の回転に伴って磁石35とコイル36との位置関係が変化することに起因する。見方を変えると、グラフG4に示す波形は、所定周波数を有する正弦波(基本波)に対し、その所定周波数の整数倍の周波数成分(高調波)が重畳することで実現されると捉えることもできる。

【0122】

ここで、基本波の周波数をf0とし、最低次高調波の周波数をf1とし、モータ3の極数をNpとし、モータ回転数をRmとし、1極の磁石35の数(一極あたりの磁石35の個数)をNmとすると、

$$f_0 = N_p \times R_m \quad \dots (D)$$

$$f_1 = N_m \times f_0 \quad \dots (E)$$

の関係が満足される。本実施形態の場合、Np = 8であり、Nm = 2である。したがって、最低次高調波は、基本波に対し2倍の周波数を有する2次高調波となる。なお、前記磁石35の代わりに分割磁石を用いた場合、Nmは4以上の整数となり得る。

【0123】

本願発明者らは、鋭意検討を重ねた結果、誘起電圧VuにFFTを施すことで得られる周波数スペクトルのうち、最低次高調波の周波数スペクトルには、第1磁石35aとしてのS磁石35aと、第2磁石35bとしてのN磁石35bと、の温度差を間接的に示す情報が含まれることを突き止めた。

【0124】

本願発明者らによって得られた知見によれば、最低次高調波の周波数スペクトルの振幅は、S磁石35aとN磁石35bとの温度差に比例する。例えば、高調波に係る振幅は、磁石間の温度差が大きいつきには、その温度差が小さいつきに比して大きくなる。図7に示す例では、S磁石35aとN磁石35bとの温度差が大きくなるにつれて、囲み部C4に示す振幅がより大きくなる。

【0125】

また、本願発明者らによれば、高調波の周波数スペクトルの位相は、S磁石35aに比してN磁石35bが高温のつきと、N磁石35bに比してS磁石35aが高温のつきと、で位相が反転する。図7に示す例は、N磁石35bに比してS磁石35aが高温の場合を示している。この場合、高調波の位相の符号は、囲み部C5に示すように正となる。一方、磁石35間の温度差が図7に示す例と同じであったとしても、S磁石35aに比してN磁石35bが高温の場合には、囲み部C5と同一周波数における位相の符号は、囲み部C5'に示すように反転して負となる。

【0126】

さらに、本願発明者らによれば、基本波の周波数スペクトルの振幅は、S磁石35a及びN磁石35bの平均温度と関連する。詳しくは、基本波に係る振幅は、S磁石35a及びN磁石35bが発する磁束密度の平均値が大きいつきには、その平均値が小さいつきに

10

20

30

40

50

比して大きくなる。一方、磁束密度の大きさは、前述のように、磁石温度と直線状の関係にある。したがって、基本波に係る振幅を用いることで、各磁石 3 5 が取り得る平均温度を推定することができる。

【 0 1 2 7 】

以上の知見を踏まえ、本願発明者らは、第 2 の推定ロジックを以下の如く構築した。

【 0 1 2 8 】

すなわち、本実施形態に係る M C U 2 1 は、誘起電圧を構成する周波数成分のうち、所定周波数に対応した周波数スペクトルに基づいて磁石温度を推定する。

【 0 1 2 9 】

具体的に、M C U 2 1 は、所定周波数に対応した周波数スペクトルを取得するべく、誘起電圧に対して F F T を実行する。ここで、所定周波数は、磁石 3 5 の個数に応じて規定される第 n 次高調波 (n は整数) のうち、最低次高調波 (本実施形態では、2 次高調波) の周波数である。

10

【 0 1 3 0 】

次いで、M C U 2 1 は、F F T を通じて得られた周波数スペクトルの振幅に基づいて、磁石 3 5 が発する磁束密度を推定する。具体的に、M C U 2 1 は、基本波に係る振幅と、最低次高調波に係る振幅と、を加算する。これにより、磁石 3 5 間の温度差を考慮した振幅の最大値 (最大振幅) を算出することができる。この演算を行うべく、本実施形態に係る M C U 2 1 は、F F T を通じて得られた周波数スペクトルが入力されるバンドパスフィルタ 5 7 を備える。このバンドパスフィルタ 5 7 の構成は、最低次高調波の周波数に応じて、適宜変更することができる。

20

【 0 1 3 1 】

そして、M C U 2 1 は、そうして得られた最大振幅に基づいて磁束密度を算出し、その磁束密度に基づいて磁石温度を推定する。最大振幅は、磁石 3 5 間の温度差を考慮した誘起電圧 V_u の最大値を示す。一方、誘起電圧 V_u と、磁石 3 5 が発する磁束密度と、は前述のように比例関係にある。また、磁石 3 5 が発する磁束密度と、磁石温度と、は直線状の関係をなす。したがって、誘起電圧 V_u を検出することで、磁束密度を介して磁石温度を算出することができる。

【 0 1 3 2 】

M C U 2 1 はまた、F F T を通じて得られた周波数スペクトルの位相に基づいて、N 磁石 3 5 b と S 磁石 3 5 b とのうち、相対的に高温又は低温な磁石 3 5 を特定することができる。この機能は、磁石温度を用いた後述のモータ制御に用いられる。

30

【 0 1 3 3 】

このように、第 2 の推定ロジックによれば、誘起電圧 V_u にフーリエ変換を施すことで得られる周波数スペクトルの振幅を用いることで、磁石温度を精度よく推定できる。

【 0 1 3 4 】

ところで、誘起電圧 V_u に基づいて磁石温度を把握する術としては、第 1 の推定ロジックのように、特定のタイミングで検出される誘起電圧 V_u に基づいて磁石温度を推定することも考えられる。しかしながら、この方法を用いるためには、誘起電圧を A / D 変換する際のサンプリング周波数を、モータ 3 の回転数に見合うように高く設定する必要がある。このような方法は、モータが高回転となる場合には不都合である。

40

【 0 1 3 5 】

一方、第 2 の推定ロジックは、特定のタイミングで誘起電圧 V_u を検出せずとも磁石温度を推定することができるため、従来よりもサンプリング周波数を低く抑えることができる。サンプリング周波数を低く抑えることで、フィルタリング処理等、誘起電圧 V_u に対する処理を簡素化することが可能になる。また、誘起電圧 V_u に対する処理の簡素化は、磁石温度をより迅速に推定したり、より確実に推定したりする上で有効である。

【 0 1 3 6 】

また、第 2 の推定ロジックによれば、周波数スペクトルの位相を用いることで、S 磁石 3 5 a と N 磁石 3 5 b のうち、相対的に高温な磁石 3 5 を特定することができる。このこ

50

とは、各磁石 3 5 の温度をきめ細かく制御する上で有効である。

【 0 1 3 7 】

特に、最低次高調波の振幅及び位相を用いることで、各磁石 3 5 の温度差を精度よく推定したり、より高温な磁石 3 5 を精度よく特定したりすることができる。このことは、各磁石 3 5 の温度をよりの確に推定する上で有効である。

【 0 1 3 8 】

また、前述のように、最低次高調波の振幅と、基本波の振幅とを加算してなる最大振幅を用いて磁石温度を推定することで、各磁石 3 5 が取り得る温度ばらつきを考慮した温度推定を実現することができる。これにより、磁石温度を過小評価することなく、より安全サイドに立って磁石温度を推定することができる。

10

【 0 1 3 9 】

(3) 磁石温度の推定装置

図 4 は、モータの磁石温度推定装置の構成を例示するブロック図である。

【 0 1 4 0 】

図 4 に示す推定装置は、複数の機能ブロックを備えてなる。具体的に、この推定装置は、第 1 及び第 2 の推定ロジックのうち的一方を選択する推定方法選択部 2 1 4 と、第 1 の推定ロジックを実行する第 1 推定部 2 1 5 と、第 2 の推定ロジックを実行する第 2 推定部 2 1 6 と、第 1 推定部 2 1 5 又は第 2 推定部 2 1 6 の実行結果に基づいてモータ 3 を制御するモータ制御部 2 1 7 と、を備える。

【 0 1 4 1 】

以下、各機能ブロックについて順番に説明する。

20

【 0 1 4 2 】

(3 - 1) 推定方法選択部

推定方法選択部 2 1 4 は、ロータ 3 3 の回転数に基づいて、第 1 推定部 2 1 5 によって第 1 の推定ロジックを実行するか、或いは、第 2 推定部 2 1 6 によって第 2 の推定ロジックを実行するかを選択する。

【 0 1 4 3 】

具体的に、推定方法選択部 2 1 4 は、モータ回転数センサ 4 1 からの検出信号に基づいて、ロータ 3 3 の回転数が所定閾値未満の場合は第 1 推定部 2 1 5 を選択し、ロータ 3 3 の回転数が所定閾値以上の場合は第 2 推定部 2 1 6 を選択する。推定方法選択部 2 1 4 は、第 1 推定部 2 1 5 及び第 2 推定部 2 1 6 のうち、選択された一方を介して温度推定を実行させる。

30

【 0 1 4 4 】

第 1 推定部 2 1 5 による磁石温度の推定は、磁石温度を個別にかつ精度よく推定することができる。一方、第 2 推定部 2 1 6 による磁石温度の推定は、従来よりもサンプリング周波数を低く抑えることができるため、モータ 3 の回転数が高い場合であっても、磁石温度を確実に推定することができる。

【 0 1 4 5 】

そこで、図 4 に示す推定方法選択部は、モータ 3 の回転数が相対的に低い場合は第 1 推定部 2 1 5 による温度推定を実行させる一方、モータ 3 の回転数が高い場合は第 2 推定部 2 1 6 による温度推定を実行させる。このように構成することで、磁石温度の推定精度を可能な限り確保しつつも、モータ 3 の回転数が高い場合であっても、磁石温度を確実に推定することができるようになる。

40

【 0 1 4 6 】

なお、推定方法選択部 2 1 4 による選択の基準となる所定閾値は、モータ 3 の仕様に応じて規定される。この所定閾値は、MCU 2 1 のメモリ 2 1 2 に予め記憶される。

【 0 1 4 7 】

(3 - 2) 第 1 推定部

第 1 推定部 2 1 5 は、第 1 の推定ロジックを実行するための機能ブロックとして、誘起電圧検出部 2 1 a と、平均電圧算出部 2 1 b と、磁束密度算出部 2 1 c と、磁石温度推定

50

部 2 1 d と、制限量算出部 2 1 e と、を有する。

【 0 1 4 8 】

このうち、誘起電圧検出部 2 1 a は、サーチコイル 5 5 を介して誘起電圧 V_u を検出する。この誘起電圧 V_u は、計 1 2 個のコイル 3 6 のうち、サーチコイル 5 5 が重畳された U 相コイル 3 6 u に生じる誘起電圧と略一致する。具体的に、誘起電圧検出部 2 1 a は、不図示の A / D コンバータを介して誘起電圧 V_u を検出し、それをデジタル信号に変換する。誘起電圧検出部 2 1 a によってデジタル信号に変換された誘起電圧 V_u は、平均電圧算出部 2 1 b に入力される。

【 0 1 4 9 】

平均電圧算出部 2 1 b は、誘起電圧検出部 2 1 a から入力される誘起電圧 V_u に基づいて、前述した肩部、具体的には最小タイミングを含んだ所定期間 T_s における平均電圧を算出する。平均電圧の算出は、N 磁石 3 5 b に起因して生じる肩部（図 5 の囲み部 C 1 参照）と、N 磁石 3 5 b に起因して生じる肩部（図 5 の囲み部 C 3 参照）と、の双方に対し、個別に実行される。また、この所定期間 T_s に相当する電気角の範囲は、予めメモリ 2 1 2 に記憶されている。平均電圧算出部 2 1 b は、メモリ 2 1 2 に記憶されている電気角の範囲と、モータ回転センサ 5 1 の検出信号と、に基づいて、所定期間 T_s における誘起電圧 V_u の平均値を算出する。そうして算出された平均値は、磁束密度算出部 2 1 c に入力される。

10

【 0 1 5 0 】

以下、平均電圧算出部 2 1 b によって算出される平均値のうち、N 磁石 3 5 b に係る平均値を第 1 電圧 V_n と呼称し、S 磁石 3 5 a に係る平均値を第 2 電圧 V_p と呼称する。

20

【 0 1 5 1 】

磁束密度算出部 2 1 c は、平均電圧算出部 2 1 b から入力される第 1 電圧 V_n 及び第 2 電圧 V_p に基づいて、N 磁石 3 5 b から発せられる磁束密度 B_n と、S 磁石 3 5 a から発せられる磁束密度 B_p と、を算出する。具体的に、磁束密度算出部 2 1 c は、下式 (F) , (G) に基づいて磁束密度 B_n , B_p を算出する。

【 0 1 5 2 】

$$B_n = V_n / (R_m \times N_c \times c) \quad \dots (F)$$

$$B_p = V_p / (R_m \times N_c \times c) \quad \dots (G)$$

上式 (F) , (G) において、 R_m はモータ回転数であり、 N_c はコイル巻き数であり、 c は定数である。モータ回転数 R_m は、モータ回転センサ 5 1 によって都度検出される。コイル巻き数 N_c と定数 c は、メモリ 2 1 2 に予め記憶され、磁束密度 B_n , B_p の算出に際して読み込まれる。磁束密度算出部 2 1 c によって推定された磁束密度 B_n , B_p は、磁石温度推定部 2 1 d に入力される。

30

【 0 1 5 3 】

磁石温度推定部 2 1 d は、磁束密度算出部 2 1 c により推定された磁束密度 B_n , B_p に基づいて、S 磁石 3 5 a の磁石温度 T_p と、N 磁石 3 5 b の磁石温度 T_n と、を推定する。具体的に、磁石温度推定部 2 1 d は、図 8 のグラフ G 7 に対応したテーブルをメモリ 2 1 2 から読み込んで、そのテーブルと磁束密度 B_n , B_p とを照らし合わせることで磁石温度 T_p , T_n を推定する。磁石温度推定部 2 1 d によって推定された磁石温度 T_n , T_p は、制限量算出部 2 1 e に入力される。

40

【 0 1 5 4 】

制限量算出部 2 1 e は、磁石温度推定部 2 1 d によって推定された磁石温度 T_n , T_p に基づいて、各磁石 3 5 a , 3 5 b の温度状態を判定する。制限量算出部 2 1 e は、その温度状態が異常であると判定される場合、モータ 3 の出力を制限するためのモータ制限量 P_m を算出する。

【 0 1 5 5 】

具体的に、制限量算出部 2 1 e は、各磁石温度 T_n , T_p と、予め設定された上限温度 T_{max} と、を比較する。制限量算出部 2 1 e は、N 磁石 3 5 b に係る磁石温度 T_n と、S 磁石 3 5 a に係る磁石温度 T_p と、が双方とも上限温度 T_{max} を上回る場合、磁石 3

50

5の温度状態が異常であると判定する。ここで、上限温度 T_{max} は、モータ3の仕様、設計に応じて規定され、メモリ212に予め記憶される。磁石35の温度状態が異常であると判定された場合、制限算出部21eは、下式(H)を通じてパワー制限量を算出する。

【0156】

$$\text{パワー制限量} = K1 | T_n - T_{max} | + K1 | T_p - T_{max} | \dots (H)$$

上式(H)において、定数Kは、メモリ212に予め記憶されており、パワー制限量の算出に際して読み込まれる。制限算出部21eにより算出されたパワー制限量は、モータ制御部217に入力される。

【0157】

なお、磁石温度 T_n 、 T_p のうちの少なくとも一方が上限温度 T_{max} 以下となった場合、制限算出部21eは、磁石35の温度状態は正常であると判定する。この場合、パワー制限量の算出は実行されない。

【0158】

(3-3)第2推定部

第2推定部216は、第2の推定ロジックを実行するための機能ブロックとして、誘起電圧検出部21fと、FFT実行部21gと、温度ばらつき算出部21hと、磁束密度算出部21iと、磁石温度推定部21jと、制限算出部21kと、を有する。

【0159】

このうち、誘起電圧検出部21fは、電圧センサ56を介して誘起電圧 V_u を検出する。この誘起電圧 V_u は、計12個のコイル36のうち、4個のU相コイル36uに生じる誘起電圧と略一致する。具体的に、誘起電圧検出部21aは、不図示のA/Dコンバータを介して誘起電圧 V_u を検出し、それをデジタル信号に変換する。誘起電圧検出部21fによってデジタル信号に変換された誘起電圧 V_u は、平均電圧算出部21bに入力される。

【0160】

FFT実行部21gは、誘起電圧検出部21fから入力される誘起電圧 V_u に対しFFTを実行し、誘起電圧 V_u を周波数スペクトルに変換する。具体的に、FFT実行部21gは、誘起電圧 V_u のうち、N周期にわたるデータに対してFFTを実行する。なお、ここでいう「N周期」とは、モータ回転数が大きく変化しない範囲を指す。Nの大きさは、予めメモリ212に記憶してもよいし、モータ回転センサ51の検出信号に基づいて都度算出してもよい。

【0161】

FFT実行部21gは、誘起電圧 V_u にFFTを施すことで、実時間から周波数へと変数変換してなる周波数スペクトルを得る。より詳細には、FFT実行部21gによって得られる周波数スペクトルは、周波数スペクトルの絶対値(振幅)と、周波数スペクトルの偏角(位相)と、からなる。

【0162】

そうして得られた周波数スペクトルに対し、FFT実行部21gは、バンドパスフィルタ57によるフィルタリングを施す。このフィルタリングによって、FFT実行部21gは、少なくとも、基本波の振幅 F_a と、最低次高調波の振幅 F_b 及び位相 P_b と、を導出し、それらを温度ばらつき算出部21hに入力する。

【0163】

温度ばらつき算出部21hは、FFT実行部21gからの入力信号に基づいて、温度ばらつきに起因した振幅の最大値(最大振幅) F_{max} を算出する。具体的に、温度ばらつき算出部21hは、下式(I)に基づいて最大振幅 F_{max} を算出する。

【0164】

$$F_{max} = F_a + F_b \dots (I)$$

上式(I)に示すように、温度ばらつき算出部21hは、基本波の振幅 F_a と、最低次高調波の振幅 F_b と、を加算することで最大振幅 F_{max} を算出する。温度ばらつき算出

10

20

30

40

50

部 2 1 h によって算出された最大振幅 F_{max} は、磁束密度算出部 2 1 i に入力される。

【 0 1 6 5 】

磁束密度算出部 2 1 i は、温度ばらつき算出部 2 1 h によって算出された最大振幅 F_{max} に基づいて、各磁石 3 5 から発せられる磁束密度 B_m を算出する。具体的に、磁束密度算出部 2 1 i は、下式 (J) に基づいて磁束密度 B_m を算出する。

【 0 1 6 6 】

$$B_m = V_n / (R_m \times N_c \times c) \quad \dots (J)$$

引数 R_m 、 N_c 、 c が意味するところは、上式 (J)、(G) と共通である。磁束密度算出部 2 1 c によって推定された磁束密度 B_n 、 B_p は、磁石温度推定部 2 1 d に入力される。

10

【 0 1 6 7 】

磁石温度推定部 2 1 j は、磁束密度算出部 2 1 i により推定された磁束密度 B_m に基づいて、各磁石 3 5 の磁石温度 T_m を推定する。具体的に、磁石温度推定部 2 1 j は、図 8 のグラフ G 7 に対応したテーブルをメモリ 2 1 2 から読み込んで、そのテーブルと磁束密度 B_m とを照らし合わせることで磁石温度 T_m を推定する。磁石温度推定部 2 1 j によって推定された磁石温度 T_m は、制限算出部 2 1 k に入力される。

【 0 1 6 8 】

制限算出部 2 1 k は、磁石温度推定部 2 1 j によって推定された磁石温度 T_m に基づいて、各磁石 3 5 の温度状態を判定する。制限算出部 2 1 k は、その温度状態が異常であると判定される場合、モータ 3 の出力を制限するためのモータ制限 P_m を算出する。

20

【 0 1 6 9 】

具体的に、制限算出部 2 1 k は、磁石温度 T_m と、予め設定された上限温度 T_{max} と、を比較する。制限算出部 2 1 k は、磁石温度 T_m が上限温度 T_{max} を上回る場合、磁石 3 5 の温度状態が異常であると判定する。ここで、上限温度 T_{max} は、第 1 推定部 2 1 5 における制限算出部 2 1 e と同様に、メモリ 2 1 2 に予め記憶される。磁石 3 5 の温度状態が異常であると判定された場合、制限算出部 2 1 k は、下式 (K) を通じてパワー制限量を算出する。

【 0 1 7 0 】

$$\text{パワー制限量} = K_2 | T_m - T_{max} | \quad \dots (K)$$

上式 (K) において、定数 K_2 は、メモリ 2 1 2 に予め記憶されており、パワー制限量の算出に際して読み込まれる。制限算出部 2 1 k により算出されたパワー制限量は、モータ制御部 2 1 7 に入力される。

30

【 0 1 7 1 】

なお、磁石温度 T_m が上限温度 T_{max} 以下となった場合、制限算出部 2 1 k は、磁石 3 5 の温度状態は正常であると判定する。この場合、パワー制限量の算出は実行されない。

【 0 1 7 2 】

(3 - 4) モータ制御部

モータ制御部 2 1 7 は、第 1 推定部 2 1 5 又は第 2 推定部 2 1 6 によって算出されたパワー制限量に基づいた制御を実行する。具体的に、モータ制御部 2 1 7 は、パワー制限量とモータ 3 の要求出力とを比較し、要求出力がパワー制限量を上回っているか否かを判定する。

40

【 0 1 7 3 】

ここで、要求出力がパワー制限量を上回っている場合、モータ制御部 2 1 7 は、磁石 3 5 の温度異常に対応するための高温対策制御を実行しつつ、インバータ 6 を介してモータ 3 を駆動する。一方、要求出力がパワー制限量以下の場合、磁石 3 5 の温度異常への対応は不要と判定し、通常通り、インバータ 6 を介してモータ 3 を駆動する。

【 0 1 7 4 】

なお、モータ制御部 2 1 7 は、高温対策制御として、自動車 1 の加速度を制限したり、バッテリー 1 0 の充電量を制限したりすることで、モータ 3 の出力を制限する。モータ 3 の

50

出力を制限する代わりに、モータ制御部 2 1 7 は、冷却液の流量を増大させたり、強制空冷を実行したりすることで、モータ 3 の冷却量を増大させてもよい。あるいは、モータ制御部 2 1 7 は、コイル 3 6 に通電される交流電流を変調することで、渦電流に起因したジュール熱の発生を抑制することもできる。

【 0 1 7 5 】

(4) モータ制御の具体例

以下、MCU 2 1 が実行するモータ制御の具体例を説明する。図 9 は、第 1 及び第 2 推定制御に関連する処理を例示するフローチャートである。また、図 1 0 は、第 1 推定部 2 1 5 による磁石温度の推定手順を例示するフローチャートであり、図 1 1 は、第 2 推定部 2 1 6 による磁石温度の推定手順を例示するフローチャートであらう。

10

【 0 1 7 6 】

まず、図 9 のステップ S 1 において、MCU 2 1 は、モータ 3 の要求トルクがゼロであるか否かを判定する。この判定は、アクセルセンサ 5 4 等、各種センサの検出信号に基づいて実行される。モータ 3 の要求トルクがゼロという状況は、自動車 1 の加減速が要求されていない状態、モータ 3 に発電が要求されていない状態等が該当する。ステップ S 1 の判定が N O の場合、制御プロセスはステップ S 8 に進む。ステップ S 1 の判定が Y E S の場合、制御プロセスはステップ S 2 に進む。

【 0 1 7 7 】

ステップ S 2 において、MCU 2 1 は、インバータ 6 のスイッチングを停止する。具体的に、MCU 2 1 は、インバータ 6 の内部でスイッチング素子のオンオフ制御を停止する。

20

【 0 1 7 8 】

続くステップ S 3 において、MCU 2 1 は、各種センサの検出信号を読み込む。ステップ S 3 で読み込まれる検出信号には、少なくとも、モータ回転センサ 5 1 の検出信号が含まれる。

【 0 1 7 9 】

続くステップ S 4 において、MCU 2 1 における推定方法選択部 2 1 4 が、モータ 3 の回転数が所定閾値以上か否かを判定し、所定閾値以上の場合はステップ S 5 に進み、所定閾値未満の場合はステップ S 6 へ進む。

【 0 1 8 0 】

ステップ S 5 においては、第 1 推定部 2 1 5 が、第 1 の推定ロジックに基づいた制御（第 1 推定制御）を実行し、磁石温度を推定する。一方、ステップ S 6 においては、第 2 推定部 2 1 6 が、第 2 の推定ロジックに基づいた制御（第 2 推定制御）を実行し、磁石温度を推定する。

30

【 0 1 8 1 】

図 1 0 は、図 9 におけるステップ S 5 の詳細を例示するフローチャートである。すなわち、図 1 0 のステップ S 5 1 ~ S 5 8 が、図 9 のステップ S 5 を構成することになる。

【 0 1 8 2 】

まず、ステップ S 5 1 において、誘起電圧検出部 2 1 a に、U 相コイル 3 6 u に生じる誘起電圧 V_u が入力される。誘起電圧検出部 2 1 a に入力される誘起電圧 V_u は、サーチコイル 5 5 によって検出される誘起電圧 V_u に等しい。

40

【 0 1 8 3 】

続くステップ S 5 2 において、平均電圧算出部 2 1 b は、誘起電圧 V_u のピーク手前側の肩部（すなわち、N 磁石 3 5 b に起因して生じる肩部）における電圧値を平均し、それを第 1 電圧 V_n とする。ここでいう肩部は、前述した所定期間 T_s に相当する。この所定期間 T_s は、例えば 40° 以上 50° 以下の電気角とすることができる。

【 0 1 8 4 】

続くステップ S 5 3 において、平均電圧算出部 2 1 b は、誘起電圧 V_u のピーク通過後の肩部（すなわち、S 磁石 3 5 a に起因して生じる肩部）における電圧値を平均し、それを第 2 電圧 V_p とする。ピーク通過後の肩部に相当する所定期間 T_s は、例えば 130° 以上 140° 以下の電気角とすることができる。

50

【 0 1 8 5 】

続くステップ S 5 4 において、磁束密度算出部 2 1 c は、第 1 電圧 V_n に基づいて、N 磁石 3 5 b の磁束密度 B_n を算出する。磁束密度 B_n の算出は、前述した式 (F) に基づいて行われる。

【 0 1 8 6 】

続くステップ S 5 5 において、磁束密度算出部 2 1 c は、第 2 電圧 V_p に基づいて、S 磁石 3 5 a の磁束密度 B_p を算出する。磁束密度 B_p の算出は、前述した式 (G) に基づいて行われる。

【 0 1 8 7 】

続くステップ S 5 6 において、磁石温度推定部 2 1 d は、メモリ 2 1 2 に記憶されているテーブルと、N 磁石 3 5 b 及び S 磁石 3 5 a の磁束密度 B_n , B_p と、を照らし合わせることで、N 磁石 3 5 b の磁束密度 B_n に対応した磁石温度 T_n と、S 磁石 3 5 a の磁束密度 B_p に対応した磁石温度 T_p と、を読み出す。

10

【 0 1 8 8 】

続くステップ S 5 7 において、制限算出部 2 1 e は、N 磁石 3 5 b の磁石温度 T_n と上限温度 T_{max} との比較と、S 磁石 3 5 a の磁石温度 T_s と上限温度 T_{max} との比較と、を実行する。そして、制限算出部 2 1 e は、2 つの磁石温度 T_n , T_s が双方とも上限温度 T_{max} よりも大きい場合にはステップ S 5 8 に進む。制限算出部 2 1 e はまた、2 つの磁石温度 T_n , T_s のうちの一方が上限温度 T_{max} 以下の場合にはステップ S 5 8 をスキップしてリターンする。

20

【 0 1 8 9 】

ステップ S 5 8 において、制限算出部 2 1 e は、上式 (H) を用いてパワー制限量を算出してリターンする。制御プロセスは、図 1 0 に示すフローから戻り、図 9 のステップ S 7 に進む。

【 0 1 9 0 】

一方、図 1 1 は、図 9 におけるステップ S 6 の詳細を例示するフローチャートである。すなわち、図 1 1 のステップ S 6 1 ~ S 6 9 が、図 9 のステップ S 6 を構成することになる。

【 0 1 9 1 】

まず、ステップ S 6 1 において、誘起電圧検出部 2 1 f に、U 相コイル 3 6 u に生じる誘起電圧 V_u が入力される。誘起電圧検出部 2 1 a に入力される誘起電圧 V_u は、電圧センサ 5 6 によって検出される誘起電圧 V_u に等しい。

30

【 0 1 9 2 】

続くステップ S 6 2 において、FFT 実行部 2 1 g は、誘起電圧 V_u の N 周期データに対し、FFT を実行する。前述のように、N 周期とは、モータ回転数が大きく変化しない期間を指す。FFT 実行部 2 1 g はまた、FFT によって得られる周波数スペクトルをバンドパスフィルタ 5 7 でフィルタリングすることで、基本波の振幅 F_a と、最低次高調波の振幅 F_b 及び位相 P_b を出力する。

【 0 1 9 3 】

続くステップ S 6 3 において、温度ばらつき算出部 2 1 h は、FFT によって得られた基本波の振幅 F_a を読み込む。それに続くステップ S 6 4 において、温度ばらつき算出部 2 1 h は、FFT によって得られた最低次高調波の振幅 F_b 及び位相 P_b を読み込む。

40

【 0 1 9 4 】

続くステップ S 6 5 において、温度ばらつき算出部 2 1 h は、基本波の振幅 F_a と最低次高調波の振幅 F_b とを加算することで、温度ばらつきの最大値に対応する最大振幅 F_{max} を算出する。

【 0 1 9 5 】

続くステップ S 6 6 において、磁束密度算出部 2 1 i は、最大振幅 F_{max} に基づいて、磁石 3 5 の磁束密度 B_m を算出する。磁束密度 B_m の算出は、前述した式 (J) に基づいて行われる。

50

【 0 1 9 6 】

続くステップ S 6 7 において、磁石温度推定部 2 1 j は、メモリ 2 1 2 に記憶されているテーブルと、磁石 3 5 の磁束密度 B m と、を照らし合わせることで、磁束密度 B m に対応した磁石温度 T m を読み出す。

【 0 1 9 7 】

続くステップ S 6 8 において、制限算出部 2 1 k は、磁石温度 T m と上限温度 T m a x との比較を実行する。そして、制限算出部 2 1 k は、磁石温度 T m が上限温度 T m a x よりも大きい場合にはステップ S 6 9 に進む。制限算出部 2 1 k はまた、磁石温度 T m が上限温度 T m a x 以下の場合にはステップ S 6 9 をスキップしてリターンする。

【 0 1 9 8 】

ステップ S 5 8 において、制限算出部 2 1 e は、上式 (K) に基づいてパワー制限量を算出してリターンする。制御プロセスは、図 1 1 に示すフローから戻り、図 9 のステップ S 7 に進む。

【 0 1 9 9 】

図 9 のフローに戻ると、ステップ S 5 及びステップ S 6 から続くステップ S 7 において、M C U 2 1 は、インバータ 6 のスイッチングを停止する。具体的に、M C U 2 1 は、インバータ 6 の内部でスイッチング素子のオンオフ制御を開始する。

【 0 2 0 0 】

続くステップ S 8 において、モータ制御部 2 1 7 は、モータ 3 の要求出力がパワー制限量を上回っているか否かを判定する。この判定が Y E S の場合、制御プロセスはステップ S 9 に進む一方、N O の場合、制御プロセスは、ステップ S 9 をスキップして終了する。

【 0 2 0 1 】

ステップ S 9 において、M C U 2 1 は、前述した高温対策制御を実行する。高温対策制御を実行することで、例えば、モータ 3 の出力を制限したり、モータ 3 の冷却量を増大させたり、渦電流に起因したジュール熱の発生を抑制したりすることが可能となる。

【 0 2 0 2 】

《他の実施形態》

前記実施形態では、第 1 推定部 2 1 5 は、サーチコイル 5 5 の検出信号に基づいて第 1 の推定ロジックを実行するように構成されていたが、本開示は、その構成には限定されない。第 1 推定部 2 1 5 は、例えば、電圧センサ 5 6 の検出信号に基づいて第 1 の推定ロジックを実行することができる。

【 0 2 0 3 】

同様に、前記実施形態では、第 2 推定部 2 1 6 は、電圧センサ 5 6 の検出信号に基づいて第 2 の推定ロジックを実行するように構成されていたが、本開示は、その構成には限定されない。第 2 推定部 2 1 6 は、例えば、サーチコイル 5 5 の検出信号に基づいて第 2 の推定ロジックを実行することができる。

【符号の説明】

【 0 2 0 4 】

- 1 自動車
- 2 エンジン
- 2 1 M C U (コントローラ)
- 2 1 4 推定方法選択部
- 2 1 5 第 1 推定部
- 2 1 6 第 2 推定部
- 2 1 7 モータ制御部
- 2 1 g F F T 実行部
- 3 モータ
- 3 5 磁石
- 3 5 a S 磁石 (第 1 磁石)
- 3 5 b N 磁石 (第 2 磁石)

10

20

30

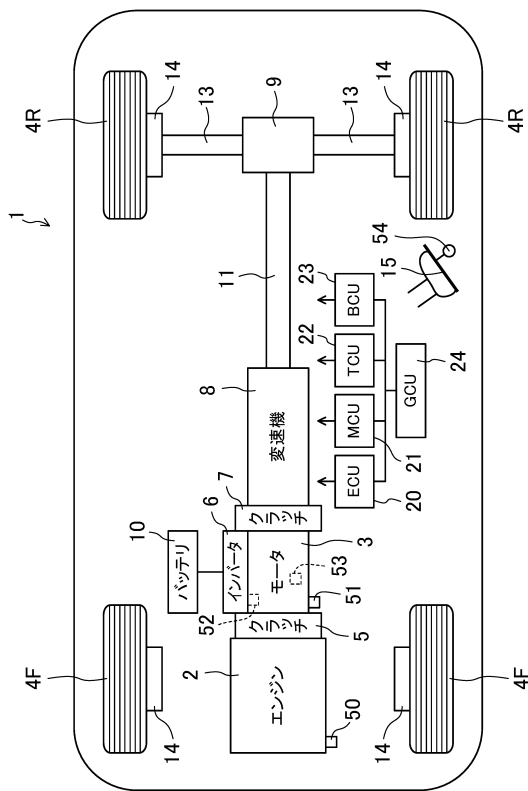
40

50

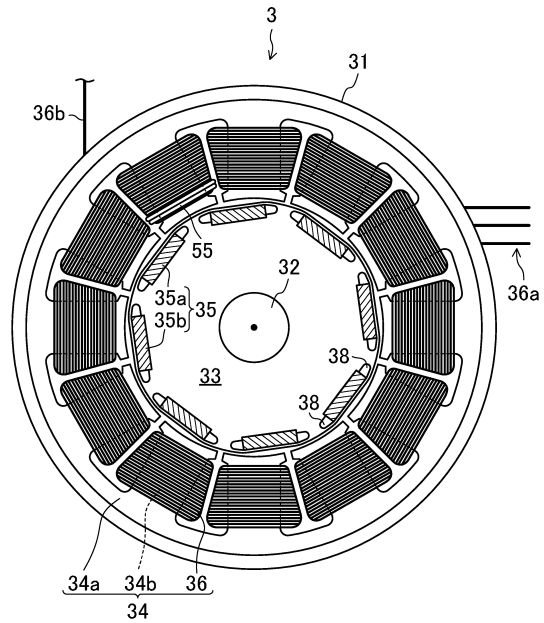
- 3 6 コイル
- 3 6 u U相コイル
- 3 6 v V相コイル
- 3 6 w W相コイル
- 3 7 収容スペース
- 3 7 a 支持面
- 3 7 b 支持面
- 3 8 空隙
- 5 1 モータ回転センサ
- 5 5 サーチコイル(センサ)
- 5 6 電圧センサ(センサ)
- 5 7 バンドパスフィルタ
- 6 インバータ
- L c 中心軸線
- T s 所定期間

【図面】

【図1】



【図2A】



10

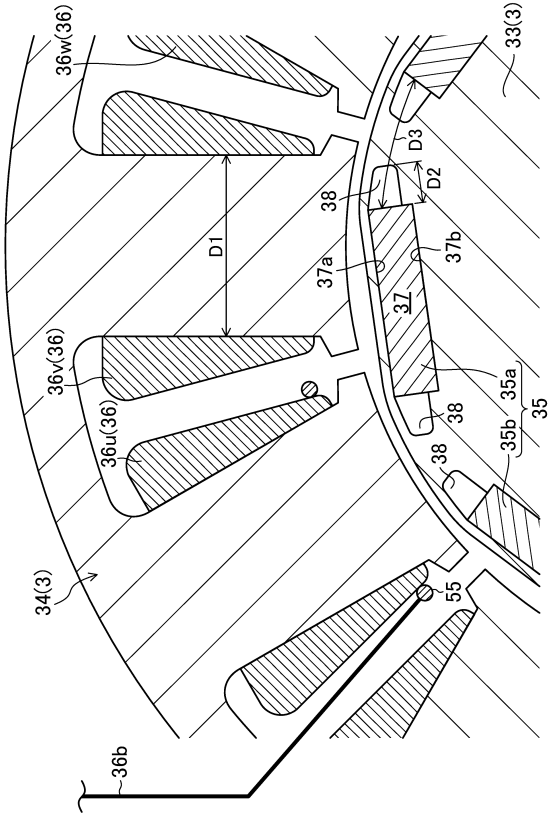
20

30

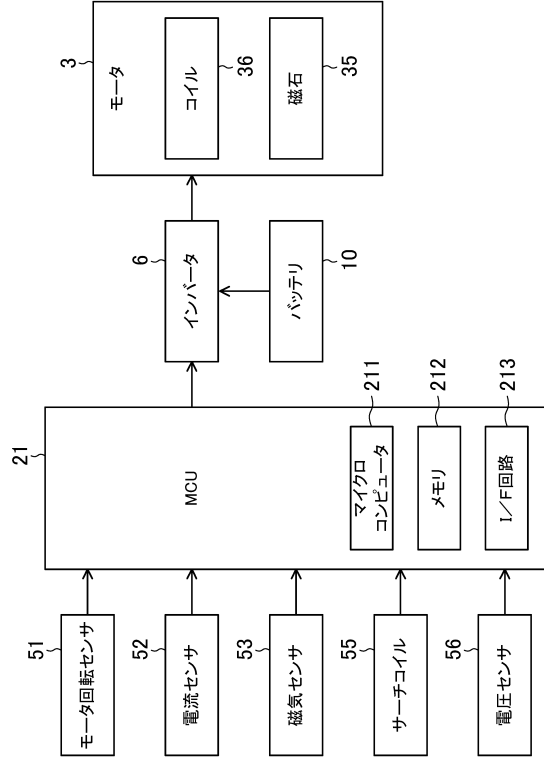
40

50

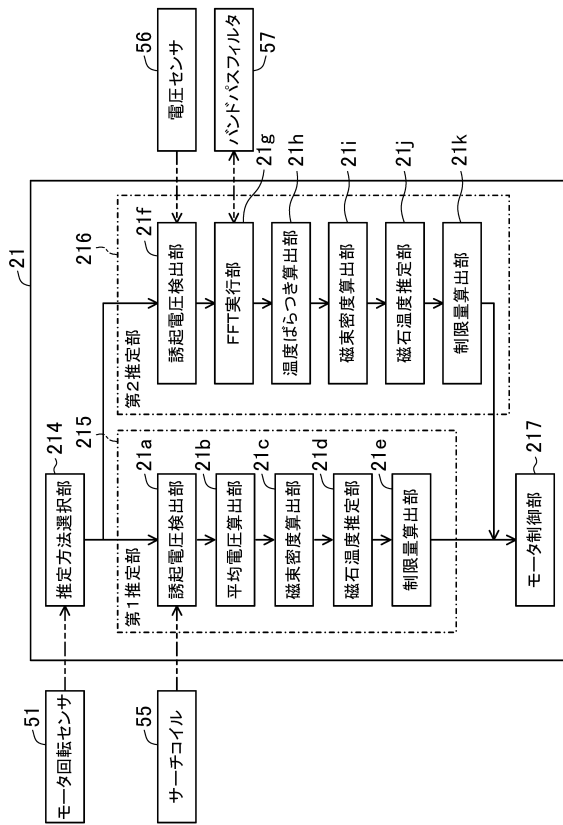
【図2B】



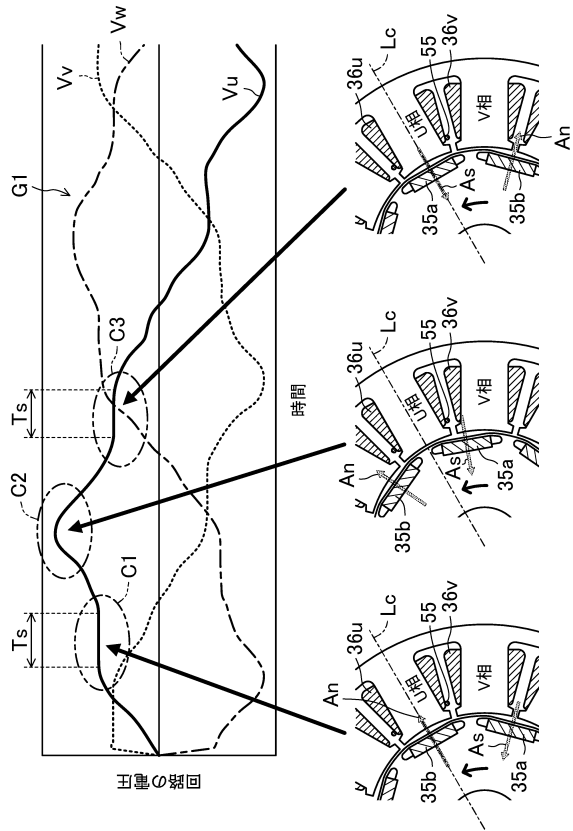
【図3】



【図4】



【図5】



10

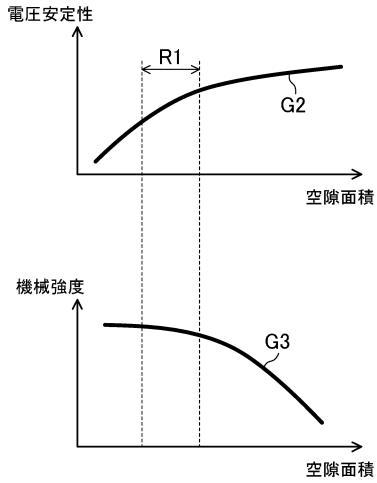
20

30

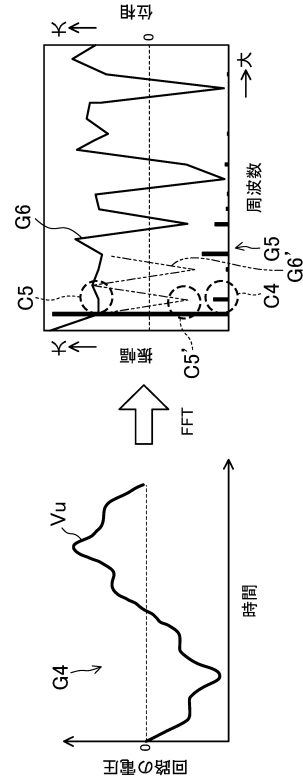
40

50

【図6】



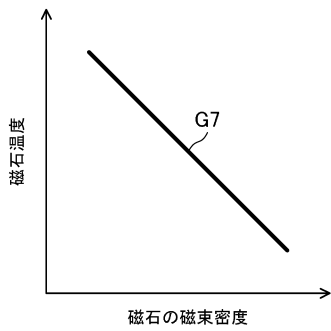
【図7】



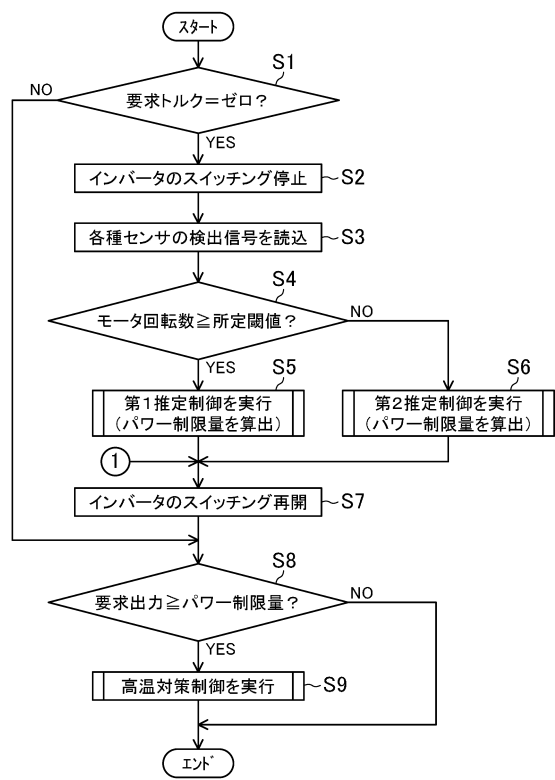
10

20

【図8】



【図9】

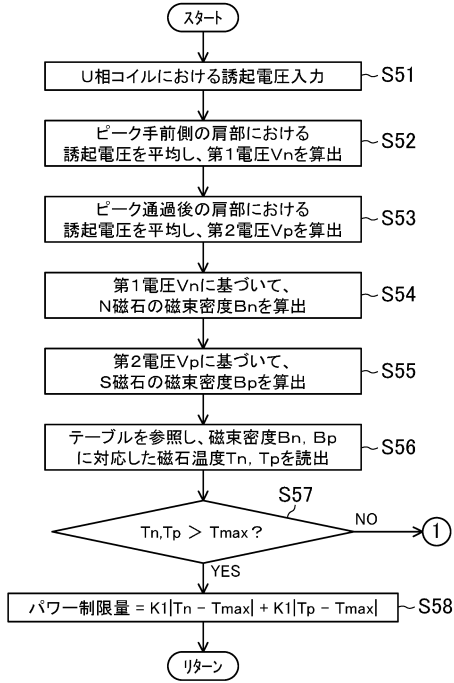


30

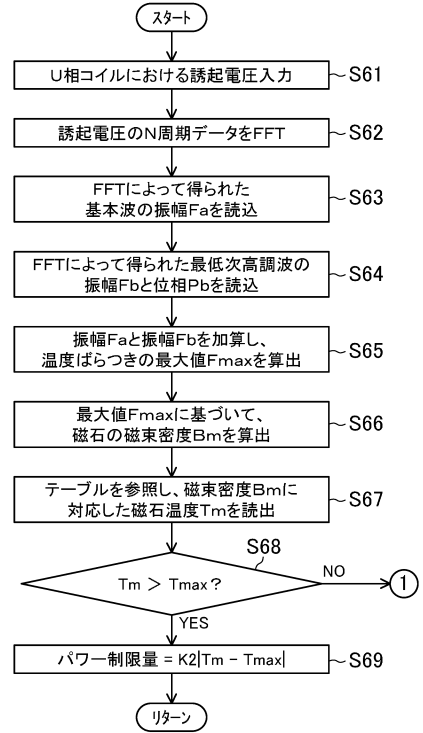
40

50

【 図 1 0 】



【 図 1 1 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類		F I		
<i>G 0 1 K</i>	<i>13/08 (2006.01)</i>	<i>G 0 1 K</i>	<i>13/08</i>	<i>B</i>
<i>B 6 0 K</i>	<i>6/48 (2007.10)</i>	<i>B 6 0 K</i>	<i>6/48</i>	
<i>B 6 0 K</i>	<i>6/54 (2007.10)</i>	<i>B 6 0 K</i>	<i>6/54</i>	
<i>B 6 0 K</i>	<i>6/26 (2007.10)</i>	<i>B 6 0 K</i>	<i>6/26</i>	
<i>B 6 0 W</i>	<i>10/08 (2006.01)</i>	<i>B 6 0 W</i>	<i>10/08</i>	<i>9 0 0</i>
<i>B 6 0 W</i>	<i>20/50 (2016.01)</i>	<i>B 6 0 W</i>	<i>20/50</i>	
<i>H 0 2 K</i>	<i>11/225 (2016.01)</i>	<i>H 0 2 K</i>	<i>11/225</i>	

(56)参考文献	特開 2 0 0 6 - 3 0 4 4 6 2 (J P , A)
	特開 2 0 1 3 - 0 8 1 3 1 2 (J P , A)
	特開 2 0 0 2 - 3 5 4 7 2 1 (J P , A)
	特開 2 0 1 7 - 1 0 8 5 6 8 (J P , A)
	特開 2 0 0 6 - 0 7 4 8 8 7 (J P , A)
	特開 2 0 0 9 - 2 7 8 7 3 3 (J P , A)

(58)調査した分野	(Int.Cl. , D B 名)
	H 0 2 P 2 3 / 1 4
	B 6 0 L 5 0 / 1 6
	B 6 0 L 3 / 0 0
	H 0 2 P 2 7 / 0 6
	G 0 1 K 7 / 3 6
	G 0 1 K 1 3 / 0 8
	B 6 0 K 6 / 4 8
	B 6 0 K 6 / 5 4
	B 6 0 K 6 / 2 6
	B 6 0 W 1 0 / 0 8
	B 6 0 W 2 0 / 5 0
	H 0 2 K 1 1 / 2 2 5