

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7136005号
(P7136005)

(45)発行日 令和4年9月13日(2022.9.13)

(24)登録日 令和4年9月5日(2022.9.5)

(51)国際特許分類 F I
H 0 2 P 25/22 (2006.01) H 0 2 P 25/22

請求項の数 9 (全27頁)

(21)出願番号	特願2019-100618(P2019-100618)	(73)特許権者	000004260 株式会社デンソー
(22)出願日	令和1年5月29日(2019.5.29)		愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地
(65)公開番号	特開2020-195240(P2020-195240 A)	(74)代理人	100093779 弁理士 服部 雅紀
(43)公開日	令和2年12月3日(2020.12.3)	(72)発明者	鈴木 崇志 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式 会社デンソー内
審査請求日	令和3年8月4日(2021.8.4)	審査官	柏崎 翔

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 多相回転機の制御装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

多相巻線への通電に係る一群の構成要素の単位を系統と定義すると、二系統の多相巻線(801、802)を有する多相回転機(80)の駆動を制御する制御装置であって、前記二系統の多相巻線に個別に通電可能な二系統の電力変換器(601、602)と、互いに独立して設けられ、電流検出器(701、702)により検出された多相巻線に流れる電流に基づき、前記電力変換器から多相巻線に流す電流を制御する演算を行う二系統の演算装置(401、402)と、

を備え、

各系統の前記演算装置は、

少なくとも各系統の異常情報を系統間通信により双方向に通信し、

自系統が正常であることを前提として、

他系統の正常時且つ通信正常時、自系統の前記演算装置が演算した電流指令値、又は、他系統の前記演算装置が演算し前記系統間通信により取得した電流指令値のうち少なくとも一方に基づいて推定電流を演算し、

他系統の異常時又は通信異常時、自系統の前記演算装置が演算した電流指令値に基づいて推定電流を演算し、

自系統の多相巻線に流れる電流について、前記系統間通信の通信周期よりも短い周期で電流制御演算を行い、且つ、他系統の多相巻線に流れる電流により自系統の多相巻線に発生する電圧を非干渉化するための制御量である非干渉化制御量を、自系統又は他系統の電

流指令値に基づいて演算された前記推定電流を用いて算出する多相回転機の制御装置。

【請求項 2】

多相巻線への通電に係る一群の構成要素の単位を系統と定義すると、二系統の多相巻線（801、802）を有する多相回転機（80）の駆動を制御する制御装置であって、前記二系統の多相巻線に個別に通電可能な二系統の電力変換器（601、602）と、互いに独立して設けられ、電流検出器（701、702）により検出された多相巻線に流れる電流に基づき、前記電力変換器から多相巻線に流す電流を制御する演算を行う二系統の演算装置（401、402）と、

を備え、

各系統の前記演算装置は、

少なくとも一種類の情報を、系統間通信により少なくとも一方向に通信し、

自系統の多相巻線に流れる電流について、前記系統間通信の通信周期よりも短い周期で電流制御演算を行い、且つ、他系統の多相巻線に流れる電流により自系統の多相巻線に発生する電圧を非干渉化するための制御量である非干渉化制御量を、自系統又は他系統の電流指令値に基づいて演算された推定電流を用いて算出し、

自系統又は他系統の多相巻線に流れる実電流に基づいて、前記推定電流を補正する多相回転機の制御装置。

【請求項 3】

各系統の前記演算装置は、自系統の多相巻線に流れる実電流に基づいて前記推定電流を補正する請求項 2 に記載の多相回転機の制御装置。

【請求項 4】

各系統の前記演算装置は、他系統の多相巻線に流れる実電流に基づいて前記推定電流を補正する請求項 2 に記載の多相回転機の制御装置。

【請求項 5】

各系統の前記演算装置は、各系統の多相巻線に流れる実電流、及び、各系統の異常情報を前記系統間通信により双方向に通信し、

自系統が正常であることを前提として、

他系統の正常時且つ通信正常時、他系統の実電流に基づいて前記推定電流を補正し、

他系統の異常時又は通信異常時、自系統の実電流に基づいて前記推定電流を補正する請求項 2 に記載の多相回転機の制御装置。

【請求項 6】

前記推定電流は、自系統又は他系統の電流指令値に基づいて、電流制御器及び回転機モデルにより演算される請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載の多相回転機の制御装置。

【請求項 7】

少なくとも一方の系統の前記演算装置は、入力される信号に基づいて電流指令値を演算し、当該電流指令値を他系統の前記演算装置へ送信する請求項 1 ~ 6 のいずれか一項に記載の多相回転機の制御装置。

【請求項 8】

車両に搭載される多相回転機の制御装置であって、

前記系統間通信は、車両ネットワークを経由して行われる請求項 1、5 または 7 のいずれか一項に記載の多相回転機の制御装置。

【請求項 9】

前記系統間通信は、当該制御装置の内部で行われる請求項 1、5 または 7 のいずれか一項に記載の多相回転機の制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、多相回転機の制御装置に関する。

【背景技術】

【0002】

10

20

30

40

50

従来、二重巻線式多相回転機の二系統の多相巻線に電力変換器から通電する電流を制御する制御装置において、巻線間の磁気結合による系統間の干渉電圧を補償するように非干渉化制御演算を行う技術が知られている。

【0003】

例えば特許文献1に開示された多重巻線回転機の制御装置は、二系統の多相巻線に流れる電流が実質的に同一であるとみなし、二系統の非干渉制御項を統合する。具体的には、自系統におけるd q軸の他方の軸である相手軸の非干渉制御項に、他系統の相手軸の非干渉制御項を統合する。この制御装置は、非干渉化制御演算の入力として自系統の制御器後指令電流のみを用いることで、制御構成を簡素化し、演算負荷の低減を図っている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【文献】特許第6497106号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

特許文献1の制御装置は、二系統に共通の一つの演算装置を有しており、他系統の電流情報の取得にあたり、演算装置間の通信負荷を考慮する必要はない。一方、各系統の電力変換器に対応する二系統の演算装置が別々に設けられる構成では、他系統の電流情報を通信によって取得する必要がある。二系統の多相巻線の電流を制御する場合、演算装置間の通信負荷が高く、制御周期を短くできないため、制御性能が劣化するという問題がある。また、演算周期を短くするために演算装置間の通信を速くすると、通信による他の回路へのノイズが増えたり、通信がノイズの影響を受けやすくなったりする。

【0006】

本発明はこのような点に鑑みて創作されたものであり、その目的は、二系統の演算装置による非干渉化制御における通信負荷を低減する多相回転機の制御装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0007】

多相巻線への通電に係る一群の構成要素の単位を「系統」と定義する。本発明による多相回転機の制御装置は、二系統の多相巻線(801、802)を有する多相回転機(80)の駆動を制御する制御装置である。この多相回転機の制御装置は、二系統の電力変換器(601、602)と、二系統の演算装置(401、402)と、を備える。

【0008】

二系統の電力変換器は、二系統の多相巻線に個別に通電可能である。二系統の演算装置は、互いに独立して設けられ、電流検出器(701、702)により検出された多相巻線に流れる電流に基づき、電力変換器から多相巻線に流す電流を制御する演算を行う。二系統の演算装置が互いに独立して設けられるとは、ハードウェア構成が物理的に分離していることを意味する。各系統の演算装置は、少なくともも一種類の情報を、系統間通信により少なくとも一方向に通信する。

【0009】

各系統の演算装置は、自系統の多相巻線に流れる電流について、系統間通信の通信周期よりも短い周期で電流制御演算(具体的には電流フィードバック演算)を行う。また、各系統の演算装置は、他系統の多相巻線に流れる電流により自系統の多相巻線に発生する電圧を非干渉化するための制御量である非干渉化制御量を、自系統又は他系統の電流指令値に基づいて演算された推定電流を用いて算出する。本発明の一態様では、各系統の演算装置は、少なくとも各系統の異常情報を系統間通信により双方向に通信する。各系統の演算装置は、自系統が正常であることを前提として、他系統の正常時且つ通信正常時、自系統の演算装置が演算した電流指令値、又は、他系統の演算装置が演算し系統間通信により取得した電流指令値のうち少なくとも一方に基づいて推定電流を演算し、他系統の異常時又

10

20

30

40

50

は通信異常時、自系統の演算装置が演算した電流指令値に基づいて推定電流を演算する。

【 0 0 1 0 】

本発明による各系統の演算装置は、自系統の多相巻線に流れる電流についての電流制御演算を相対的に短い周期で行いつつ、相対的に長い周期で系統間通信を行う。また、各系統の演算装置は、自系統又は他系統の電流指令値に基づいて非干渉化制御を行う。自系統の電流指令値のみに基づき非干渉化制御を行う場合、他系統の電流情報を用いないため、通信負荷を低減することができる。また、系統間通信により取得した他系統の電流情報を用いて非干渉化制御を行う場合でも、電流制御演算の演算周期に対し通信周期の長い「粗い通信」を用いることで通信負荷を低減することができる。

【 0 0 1 1 】

好ましくは、推定電流は、自系統又は他系統の電流指令値に基づいて、電流制御器及び回転機モデルにより演算される。「回転機モデル」はいわゆる「モータモデル」である。適切な推定電流が用いられることで、電流制御の開ループゲインが低く抑えられて安定性が向上するとともに、閉ループゲインが高まり、指令値に対する出力応答性が向上する。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 2 】

【 図 1 】 各実施形態による多相回転機の制御装置（ E C U ）が適用される電動パワーステアリング装置の概略構成図。

【 図 2 】 二系統機電一体モータの軸方向断面図。

【 図 3 】 図 2 の I I I - I I I 線断面図。

【 図 4 】 二系統多相同軸モータの構成を示す模式図。

【 図 5 】 モータ駆動システムの全体構成図。

【 図 6 】 二系統の演算装置（マイコン）の制御ブロック図。

【 図 7 】 第 1 実施形態による電圧指令演算部の信号伝達を示すブロック線図。

【 図 8 】 電流指令値選択部による電流指令値の選択処理のフローチャート。

【 図 9 】 各系統の処理周期に関する第 1 の構成例を示すタイムチャート。

【 図 1 0 】 各系統の処理周期に関する第 2 の構成例を示すタイムチャート。

【 図 1 1 】 第 2 実施形態による電圧指令演算部の信号伝達を示すブロック線図。

【 図 1 2 】 (a) 図 1 1 の制御構成における電流指令値、実電流、推定電流の関係を等価変換したブロック線図、(b) 電流指令値から推定電流への伝達関数を示すブロック線図、(c) 実電流から推定電流への伝達関数を示すブロック線図。

【 図 1 3 】 (a) 第 2 実施形態、(b) 比較例 1、(c) 比較例 2 の信号伝達を示すブロック線図。

【 図 1 4 】 開ループ特性を示す周波数特性図。

【 図 1 5 】 閉ループ特性を示す周波数特性図。

【 図 1 6 】 図 1 5 の X V I 部拡大図。

【 図 1 7 】 図 1 5 の X V I I 部拡大図。

【 図 1 8 】 第 3 実施形態による電圧指令演算部の信号伝達を示すブロック線図。

【 図 1 9 】 リレー後電圧監視回路の構成例の図。

【 図 2 0 】 入力電圧に基づく自他系統の異常判定のフローチャート。

【 図 2 1 】 リレー後電圧監視回路の他の構成例の図。

【 図 2 2 】 各種異常の有無に応じて非干渉化制御量の算出に用いる情報を切り替えるフローチャート。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 3 】

以下、本発明の多相回転機の制御装置の複数の実施形態を図面に基づいて説明する。各実施形態において「多相回転機の制御装置」としての E C U は、車両の電動パワーステアリング装置に適用され、操舵アシストトルクを発生するモータ（すなわち多相回転機）の通電を制御する。複数の実施形態で実質的に同一の構成には同一の符号を付して説明を省略する。また、以下の第 1 ~ 第 3 実施形態を包括して「本実施形態」という。最初に図 1

10

20

30

40

50

～図 6 を参照し、各実施形態に共通する事項について説明する。

【 0 0 1 4 】

[電動パワーステアリング装置の構成]

図 1 に、電動パワーステアリング装置 9 0 を含むステアリングシステム 9 9 の全体構成を示す。なお、図 1 には、E C U 1 0 がモータ 8 0 の軸方向の一方側に一体に構成されている「機電一体式」のモータ 8 0 0 が図示されるが、E C U 1 0 とモータ 8 0 とがハーネスで接続された「機電別体式」にも、本実施形態は同様に適用可能である。また、図 1 に示す電動パワーステアリング装置 9 0 はコラムアシスト式であるが、ラックアシスト式の電動パワーステアリング装置にも、本実施形態は同様に適用可能である。

【 0 0 1 5 】

ステアリングシステム 9 9 は、ハンドル 9 1、ステアリングシャフト 9 2、ピニオンギア 9 6、ラック軸 9 7、車輪 9 8、及び、電動パワーステアリング装置 9 0 等を含む。ハンドル 9 1 にはステアリングシャフト 9 2 が接続されている。ステアリングシャフト 9 2 の先端に設けられたピニオンギア 9 6 は、ラック軸 9 7 に噛み合っている。ラック軸 9 7 の両端には、タイロッド等を介して一对の車輪 9 8 が設けられる。運転者がハンドル 9 1 を回転させると、ハンドル 9 1 に接続されたステアリングシャフト 9 2 が回転する。ステアリングシャフト 9 2 の回転運動は、ピニオンギア 9 6 によりラック軸 9 7 の直線運動に変換され、ラック軸 9 7 の変位量に応じた角度に一对の車輪 9 8 が操舵される。

【 0 0 1 6 】

電動パワーステアリング装置 9 0 は、操舵トルクセンサ 9 3 1、9 3 2、E C U 1 0、モータ 8 0 及び減速ギア 9 4 等を含む。操舵トルクセンサ 9 3 1、9 3 2 は、ステアリングシャフト 9 2 の途中に冗長的に設けられ、運転者の操舵トルク T_{s1} 、 T_{s2} を検出する。E C U 1 0 は、操舵トルク T_{s1} 、 T_{s2} に基づいてモータ 8 0 が所望のアシストトルクを発生するようにモータ 8 0 の駆動を制御する。モータ 8 0 が出力したアシストトルクは、減速ギア 9 4 を介してステアリングシャフト 9 2 に伝達される。

【 0 0 1 7 】

モータ 8 0 の軸方向の一方側に E C U 1 0 が一体に構成された機電一体式モータ 8 0 0 の構成について、図 2、図 3 を参照して説明する。図 2 に示す形態では、E C U 1 0 は、モータ 8 0 の出力側とは反対側において、シャフト 8 7 の軸 A_x に対して同軸に配置されている。なお、他の実施形態では、E C U 1 0 は、モータ 8 0 の出力側において、モータ 8 0 と一体に構成されてもよい。モータ 8 0 は、3 相ブラシレスモータであって、ステータ 8 4 0、ロータ 8 6 0、及びそれらを収容するハウジング 8 3 0 を備えている。

【 0 0 1 8 】

ステータ 8 4 0 は、ハウジング 8 3 0 に固定されているステータコア 8 4 4 と、ステータコア 8 4 4 の各スロット 8 4 8 に巻回された二組の 3 相巻線 8 0 1、8 0 2 とを有している。以下、3 相巻線 8 0 1、8 0 2 への通電に係る一群の構成要素の単位を「系統」と定義する。本実施形態は、二系統の 3 相巻線 8 0 1、8 0 2 を有するモータ 8 0 の駆動を制御する制御装置である。第 1 系統の 3 相巻線 8 0 1 からは、リード線 8 5 1、8 5 3、8 5 5 が伸び出している。第 2 系統の 3 相巻線 8 0 2 からは、リード線 8 5 2、8 5 4、8 5 6 が伸び出している。

【 0 0 1 9 】

ロータ 8 6 0 は、リア軸受 8 3 5 及びフロント軸受 8 3 6 により支持されているシャフト 8 7 と、シャフト 8 7 が嵌入されたロータコア 8 6 4 とを有している。ロータ 8 6 0 はステータ 8 4 0 の内側に設けられており、ステータ 8 4 0 に対して相対回転可能である。本実施形態のモータ 8 0 は、複数の磁石 8 6 5 がロータコア 8 6 4 の外周部に埋め込まれた埋込磁石型の同期回転機（いわゆる I P M S M）である。シャフト 8 7 の一端には、回転角検出用の永久磁石 8 8 が設けられている。

【 0 0 2 0 】

ハウジング 8 3 0 は、リアフレームエンド 8 3 7 を含む有底筒状のケース 8 3 4 と、ケース 8 3 4 の一端に設けられているフロントフレームエンド 8 3 8 とを有している。ケー

10

20

30

40

50

ス 8 3 4 及びフロントフレームエンド 8 3 8 は、ボルト等により互いに締結されている。各 3 相巻線 8 0 1、8 0 2 のリード線 8 5 1、8 5 2 等は、リアフレームエンド 8 3 7 のリード線挿通孔 8 3 9 を挿通して E C U 1 0 側に延び、基板 2 3 0 に接続されている。

【 0 0 2 1 】

E C U 1 0 は、カバー 2 1 と、カバー 2 1 に固定されているヒートシンク 2 2 と、ヒートシンク 2 2 に固定されている基板 2 3 0 と、基板 2 3 0 に実装されている各種の電子部品とを備えている。カバー 2 1 は、外部の衝撃から電子部品を保護したり、E C U 1 0 内への埃や水等の浸入を防止したりする。カバー 2 1 は、外部からの給電ケーブルや信号ケーブルが外部接続用コネクタ部 2 1 4 と、カバー部 2 1 3 とを有している。外部接続用コネクタ部 2 1 4 の給電用端子 2 1 5、2 1 6 は、図示しない経路を經由して基板 2 3 0 に

10

【 0 0 2 2 】

基板 2 3 0 は、例えばプリント基板であり、リアフレームエンド 8 3 7 と対向する位置に設けられ、ヒートシンク 2 2 に固定されている。基板 2 3 0 には、二系統分の各電子部品が系統毎に独立して設けられている。本実施形態では基板 2 3 0 は一枚であるが、他の実施形態では、二枚以上の基板を備えるようにしてもよい。基板 2 3 0 の二つの主面のうち、リアフレームエンド 8 3 7 に対向している面をモータ面 2 3 7 とし、その反対側の面、すなわちヒートシンク 2 2 に対向している面をカバー面 2 3 8 とする。

【 0 0 2 3 】

モータ面 2 3 7 には、複数のスイッチング素子 2 4 1、2 4 2、回転角センサ 2 5 1、2 5 2、カスタム I C 2 6 1、2 6 2 等が実装されている。本実施形態では複数のスイッチング素子 2 4 1、2 4 2 は各系統について 6 個であり、モータ駆動回路の 3 相上下アームを構成する。冗長的に設けられる回転角センサ 2 5 1、2 5 2 は、シャフト 8 7 の先端に設けられた永久磁石 8 8 と対向するように配置される。カスタム I C 2 6 1、2 6 2 及びマイコン 4 0 1、4 0 2 は、E C U 1 0 の制御回路を有する。

20

【 0 0 2 4 】

カバー面 2 3 8 には、マイコン 4 0 1、4 0 2、コンデンサ 2 8 1、2 8 2、及び、インダクタ 2 7 1、2 7 2 等が実装されている。特に、第 1 マイコン 4 0 1 及び第 2 マイコン 4 0 2 は、同一の基板 2 3 0 の同一側の面であるカバー面 2 3 8 に、所定間隔を空けて配置されている。コンデンサ 2 8 1、2 8 2 は、電源から入力された電力を平滑化し、また、スイッチング素子 2 4 1、2 4 2 のスイッチング動作等に起因するノイズの流出を防止する。インダクタ 2 7 1、2 7 2 は、コンデンサ 2 8 1、2 8 2 と共にフィルタ回路を構成する。

30

【 0 0 2 5 】

図 4 に示すように、E C U 1 0 の制御対象であるモータ 8 0 は、二系統の 3 相巻線 8 0 1、8 0 2 が同軸に設けられた二重巻線ブラシレスモータである。3 相巻線 8 0 1、8 0 2 は、電気的特性が同等であり、共通のステータ 8 4 0 に互いに電気角 $30 [deg]$ 、一般化すれば、 $(30 \pm 60 \times n) [deg]$ (n は整数) ずらして配置されている。

【 0 0 2 6 】

二系統の 3 相巻線 8 0 1、8 0 2 は互いに磁氣的に結合しており、系統間の相互インダクタンスが発生する。そのため、他系統の 3 相巻線に流れる電流により自系統の 3 相巻線に発生する電圧を非干渉化する「非干渉化制御」のニーズが発生する。本明細書における「非干渉化」は、同じ系統内の dq 間干渉に対する非干渉化ではなく、系統間干渉に対する非干渉化を意味する。

40

【 0 0 2 7 】

[E C U 及びマイコンの構成]

図 5 を参照し、モータ駆動システムの全体構成について説明する。E C U 1 0 は、「二系統の演算装置」としての第 1 マイコン 4 0 1 及び第 2 マイコン 4 0 2、並びに、「二系統の電力変換器」としての第 1 インバータ 6 0 1 及び第 2 インバータ 6 0 2 等を備えている。語頭の「第 1」は第 1 系統の構成要素を示し、「第 2」は第 2 系統の構成要素を示す。

50

また、電流、電圧、電気角等の物理量を表す記号において、末尾数字「1」は第1系統の物理量を示し、末尾数字「2」は第2系統の物理量を示す。

【0028】

図5のシステム例では、各系統のインバータ601、602は、系統毎に設けられた二つのバッテリー111、112に接続される。なお、図19、21に示すように、二系統に共通の一つのバッテリー11が設けられてもよい。各インバータ601、602は、MOSFET等の6つのスイッチング素子が電源ラインLp1、Lp2とグラウンドラインLg1、Lg2との間にブリッジ接続されている。各インバータ601、602の入力部には、平滑コンデンサ161、162が設けられている。

【0029】

各インバータ601、602は、自系統のマイコン401、402からの駆動信号Dr1、Dr2によりスイッチング動作し、バッテリー111、112の直流電力を変換して3相巻線801、802に供給する。こうしてインバータ601、602は、二系統の3相巻線801、802に個別に通電可能である。

【0030】

電流検出器701、702は、各系統の3相巻線801、802に流れる相電流Iu1、Iv1、Iw1、Iu2、Iv2、Iw2を検出し、マイコン401、402に出力する。回転角センサ251、252は、モータ80の電気角 θ_1 、 θ_2 を冗長的に検出し、マイコン401、402に出力する。ここで、電気角 θ_1 、 θ_2 は30[deg]の位相差を有している。また、操舵トルクセンサ931、932が検出した操舵トルクTs1、Ts2がマイコン401、402に入力される。

【0031】

二つのマイコン401、402はハードウェア構成が物理的に分離し、互いに独立して設けられている。つまり、一つのマイコン内に設けられた複数のコアが協働して機能する構成ではない。各マイコン401、402は、図示しないCPU、ROM、RAM、I/O、及び、これらの構成を接続するバスライン等を備えている。マイコン401、402は、ROM等の実体的なメモリ装置(すなわち、読み出し可能非一時的有形記録媒体)に予め記憶されたプログラムをCPUで実行することによるソフトウェア処理や、専用の電子回路によるハードウェア処理による制御を実行する。

【0032】

各マイコン401、402には操舵トルクTs1、Ts2が入力される。第1マイコン401は、第1系統の3相巻線801に流れる電流Iu1、Iv1、Iw1のフィードバック制御により、第1インバータ601から3相巻線801に流す電流を制御する演算を行う。第2マイコン402は、第2系統の3相巻線802に流れる電流Iu2、Iv2、Iw2のフィードバック制御により、第2インバータ602から3相巻線802に流す電流を制御する演算を行う。

【0033】

第1マイコン401及び第2マイコン402は、少なくとも一種類の情報を、「系統間通信」により少なくとも一方向に、好ましくは双方向に通信する。「少なくとも一種類の情報」は、電流指令値、電流制限値、異常情報等、制御に関する何らかの情報であればよい。マイコン401、402間の系統間通信は、CAN等の車両ネットワークを經由して行われてもよく、ECU10内でシリアル通信やCAN通信により行われてもよい。特に本実施形態では、通信周期が比較的長い車両ネットワークによる通信が用いられることを想定する。

【0034】

次に図6を参照する。第1マイコン401の構成要素には符号の末尾に「1」を付し、第2マイコン402の構成要素には符号の末尾に「2」を付す。第1マイコン401は、トルク指令演算部411、電流指令値演算部421、電流制限値演算部431、フェイルセーフ部441、電圧指令値演算部451、2相3相変換部461、3相2相変換部471、及び角速度演算部481を含む。第2マイコン402は、トルク指令演算部412、

10

20

30

40

50

電流指令値演算部 4 2 2、電流制限値演算部 4 3 2、フェイルセーフ部 4 4 2、電圧指令値演算部 4 5 2、2 相 3 相変換部 4 6 2、3 相 2 相変換部 4 7 2、及び角速度演算部 4 8 2 を含む。なお、図 6 中、インバータを「I N V」と記す。

【0035】

第 1 マイコン 4 0 1 及び第 2 マイコン 4 0 2 の構成は実質的に同一であるため、一方の説明で足りる部分に関しては、代表として第 1 マイコン 4 0 1 の構成要素の符号を用いて記す。第 2 マイコン 4 0 2 については、符号及び記号の末尾の「1」を「2」に置き換えて同様に解釈する。トルク指令演算部 4 1 1 は、操舵トルク T_{s1} に基づき、トルク指令 $t_{r q 1}^*$ を演算する。

【0036】

電流指令値演算部 4 2 1 は、自系統のトルク指令 $t_{r q 1}^*$ の他、自系統及び他系統の各種情報が入力され、それらの情報に基づき $d q$ 軸電流指令値 $I_{d 1}^*$ 、 $I_{q 1}^*$ を演算する。各種情報の一つとして、電流制限値演算部 4 3 1 は、例えばインバータ 6 0 1 の温度や 3 相巻線 8 0 1 の温度等に基づき、電流指令値の上限である電流制限値 $I^*_{lim 1}$ を演算する。電流制限値 $I^*_{lim 1}$ は、電流指令値に代わる情報として使用される場合がある。

【0037】

また、各種情報の一つとして、フェイルセーフ部 4 4 1 は、「制御状態」を反映した異常信号 $d i a g 1$ を生成する。本実施形態において「異常」とは、非干渉化制御のための電流情報が正常に取得できなくなる程度の異常を意味する。その意味での異常が生じ得る制御状態をフェイルセーフ部 4 4 1 は判別する。また、系統間通信において通信途絶等の異常が発生する場合もある。そのような通信異常時にも、異常を検出した系統のフェイルセーフ部 4 4 1 は異常信号 $d i a g 1$ を生成する。

【0038】

第 1 系統のトルク指令 $t_{r q 1}^*$ 、電流制限値 $I^*_{lim 1}$ 、異常信号 $d i a g 1$ は自系統の電流指令値演算部 4 2 1 に入力されると共に、系統間通信により、他系統である第 2 系統の電流指令値演算部 4 2 2 に送信される。同様に、第 2 系統のトルク指令 $t_{r q 2}^*$ 、電流制限値 $I^*_{lim 2}$ 、異常信号 $d i a g 2$ は自系統の電流指令値演算部 4 2 2 に入力されると共に、系統間通信により、他系統である第 1 系統の電流指令値演算部 4 2 1 に送信される。

【0039】

これにより電流指令値演算部 4 2 1 は、入力される信号に基づいて電流指令値 $I_{d 1}^*$ 、 $I_{q 1}^*$ を演算し、自系統の電圧指令値演算部 4 5 1 へ出力する。また、破線矢印で示すように、自系統の電流指令値 $I_{d 1}^*$ 、 $I_{q 1}^*$ が、系統間通信により、他系統の電圧指令値演算部 4 5 2 に送信される。この場合、双方向の通信に限らず、一方の系統から他方の系統への一方向にのみ電流指令値が送信されてもよい。つまり、本実施形態では、少なくとも一方の系統のマイコンは、入力される信号に基づいて電流指令値を演算し、当該電流指令値を他系統のマイコンへ送信する。

【0040】

電圧指令値演算部 4 5 1 は、電流指令値 $I_{d 1}^*$ 、 $I_{q 1}^*$ に実電流 $I_{d 1}$ 、 $I_{q 1}$ を追従させる電流フィードバック（図中「電流 F B」）制御により $d q$ 軸電圧指令値 $V_{d 1}^*$ 、 $V_{q 1}^*$ を演算する。また、電圧指令値演算部 4 5 1 は、他系統の 3 相巻線に流れる電流により自系統の 3 相巻線に発生する電圧を非干渉化する「非干渉化制御」を行う。非干渉化制御の詳細は、実施形態毎に詳しく後述する。

【0041】

2 相 3 相変換部 4 6 1 は、 $d q$ 軸電圧指令値 $V_{d 1}^*$ 、 $V_{q 1}^*$ を 3 相電圧指令値 $V_{u 1}$ 、 $V_{v 1}$ 、 $V_{w 1}$ に座標変換する。そして、3 相電圧指令値 $V_{u 1}$ 、 $V_{v 1}$ 、 $V_{w 1}$ に基づいて生成される駆動信号 $D r 1$ によりインバータ 6 0 1 が駆動される。3 相 2 相変換部 4 7 1 は、相電流 $I_{u 1}$ 、 $I_{v 1}$ 、 $I_{w 1}$ を $d q$ 軸実電流 $I_{d 1}$ 、 $I_{q 1}$ に座標変換して電圧指令値演算部 4 5 1 にフィードバックする。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 2 】

図 6 には図示を省略するが、 d q 軸実電流 I_{d1} 、 I_{q1} は、自系統の電圧指令値演算部 4 5 1 にフィードバックされると共に、系統間通信により、他系統の電圧指令演算部 4 5 2 に送信されてもよい。この場合、双方向の通信に限らず、一方の系統から他方の系統への一方方向のみ実電流が送信されてもよい。角速度演算部 4 8 1 は、回転角センサ 2 5 1 が検出した電気角 θ を時間微分して角速度 ω を演算し、電圧指令値演算部 4 5 1 に出力する。

【 0 0 4 3 】

ところで、特許文献 1 (特許第 6 4 9 7 1 0 6 号公報) に開示された従来技術の制御装置は、二系統に共通の一つの演算装置を用いて非干渉化制御を行うものであり、他系統の電流情報の取得にあたり、演算装置間の通信負荷を考慮する必要はない。それに対し本実施形態のように二系統のマイコン 4 0 1、4 0 2 間で情報を通信する構成では、非干渉化制御のための情報取得により通信負荷が高くなるという問題が発生する。

10

【 0 0 4 4 】

そこで、本実施形態の ECU 1 0 は、二系統のマイコン 4 0 1、4 0 2 による非干渉化制御用における系統間通信の通信負荷を低減することを目的とする。そのための具体的な制御構成について実施形態毎に説明する。各実施形態の ECU の符号は、「1 0」に続く 3 桁目に実施形態の番号を付す。

【 0 0 4 5 】

(第 1 実施形態)

20

図 7 に、第 1 実施形態の ECU 1 0 1 における第 1 系統の電圧指令値演算部 4 5 1 の構成を示す。図示しない第 2 系統については、第 1 系統の説明における電流等の記号の末尾「1」が「2」に置き換えられる。電圧指令値演算部 4 5 1 の上側には d 軸電圧指令値 V_{d1}^* の演算に関する信号伝達が記され、下側には q 軸電圧指令値 V_{q1}^* の演算に関する信号伝達が記される。以下、自系統及び他系統の d 軸同士又は q 軸同士を「同相軸」という。また、自系統及び他系統を合わせて、 d 軸から見た q 軸、又は、 q 軸から見た d 軸を「相手軸」という。

【 0 0 4 6 】

図 7 以下の各図で、 R は 3 相巻線 8 0 1、8 0 2 の抵抗、 L は自己インダクタンス、 M は相互インダクタンス、 ω は回転数に換算される角速度、 K_i は逆起電圧定数である。 s はラプラス演算子であり、 K_p 及び K_i は伝達関数の定数である。 d 軸電流指令値 I_{d1}^* から d 軸電圧指令値 V_{d1}^* まで、及び、 q 軸電流指令値 I_{q1}^* から q 軸電圧指令値 V_{q1}^* までの基本的な信号伝達は、例えば特許文献 1 の図 6 に開示された周知のモータ逆モデルに準ずる。

30

【 0 0 4 7 】

d q 各軸において、電流指令値 I_{d1}^* 、 I_{q1}^* と実電流 I_{d1} 、 I_{q1} との偏差に伝達関数「 K_p / s 」が乗算され、さらに伝達関数「 $R + Ls$ 」が乗算される。図 7 の右上に示すように、「 K_p / s 」と「 $R + Ls$ 」との直列結合は、比例ゲイン K_p 及び積分ゲイン K_i を用いて表される PI 制御の伝達関数「 $K_p + (K_i / s)$ 」と等価である。そこで、 $(K_p / s) \times (R + Ls)$ 項を便宜上、「 PI 制御項」と記す。 d 軸電圧指令値 V_{d1}^* は、 PI 制御項に、 L 項、 $M s$ 項、 M 項が加算又は減算されて算出される。 q 軸電圧指令値 V_{q1}^* は、 PI 制御項、 L 項、 $M s$ 項、 M 項の他に、逆起電圧項である K_i 項が加算されて算出される。

40

【 0 0 4 8 】

ここで、相互インダクタンス M を含む $M s$ 項及び M 項は、他系統の 3 相巻線に流れる電流により自系統の 3 相巻線に発生する電圧を非干渉化するための制御量であり、以下、「非干渉化制御量」という。図中、非干渉化制御量である $M s$ 項及び M 項の枠を太線で記す。基本のモータ逆モデルでは、 $M s$ 項に他系統の同相軸電流が入力され、 M 項に他系統の相手軸電流が入力されて非干渉制御量が算出される。それに対し本実施形態では、「自系統又は他系統の電流指令値に基づいて演算された推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1}

50

「 I_{d1_est} 」が自系統の非干渉化制御量の算出に用いられる。

【0049】

図7において電流指令値 I_{d1}^* 、 I_{q1}^* の入力部から分岐した箇所に、電流指令値選択部 $S_{el d}$ 、 $S_{el q}$ が破線で示されている。 d 軸電流指令値選択部 $S_{el d}$ は、自系統及び他系統の d 軸電流指令値 I_{d1}^* 、 I_{d2}^* のいずれか一方又は両方を選択可能である。 q 軸電流指令値選択部 $S_{el q}$ は、自系統及び他系統の q 軸電流指令値 I_{q1}^* 、 I_{q2}^* のいずれか一方又は両方を選択可能である。ここで他系統の電流指令値 I_{d2}^* 、 I_{q2}^* は通信により取得される。

【0050】

ただし、常に自系統の電流指令値 I_{d1}^* 、 I_{q1}^* に基づいて推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1_est} が演算される構成では、電流指令値選択部 $S_{el d}$ 、 $S_{el q}$ は無くてもよい。電流指令値選択部 $S_{el d}$ 、 $S_{el q}$ が無い場合、又は、電流指令値選択部 $S_{el d}$ 、 $S_{el q}$ で自系統の電流指令値 I_{d1}^* 、 I_{q1}^* が選択される場合、自系統の電流指令値 I_{d1}^* 、 I_{q1}^* に伝達関数「 $K / (K + s)$ 」が乗算される。なお、伝達関数「 $K / (K + s)$ 」は、電流制御器及びモータモデルから導かれる。演算された推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1_est} は、自系統の非干渉化制御量の算出に用いられる。 M 項にはその軸の推定電流が入力され、 M 項には相手軸の推定電流が入力される。

10

【0051】

このように、電圧指令値演算部451は、電流指令値 I_{d1}^* 、 I_{q1}^* に基づいて、電流制御器及びモータモデルにより、推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1_est} を演算する。そして、電圧指令値演算部451は、その推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1_est} を用いて非干渉化制御量を算出し、電圧指令値 V_{d1}^* 、 V_{q1}^* を演算する。

20

【0052】

なお、 L 項の算出について補足する。モータ逆モデルにおいて L 項は自系統の相手軸電流が入力される dq 軸間の干渉項である。系統間の干渉項ではないため、本明細書における「非干渉化制御量」には含まれない。そのため、図7に実線で示すように電流指令値 I_{d1}^* 、 I_{q1}^* に基づく推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1_est} を用いて L 項を演算する構成に限らない。例えば破線で示すように、自系統の相手軸の実電流を用いて L 項を演算してもよい。或いは二点鎖線で示すように、自系統の電圧次元の PI 制御項にモータモデルの伝達関数「 $1 / (R + Ls)$ 」を乗算して得られた電流を用いて L 項を演算してもよい。以下の第2、第3実施形態の図11、図18では図示を省略するが、 L 項を同様に演算可能である。

30

【0053】

続いて図8のフローチャートを参照し、電流指令値選択部 $S_{el d}$ 、 $S_{el q}$ が各系統の制御状態又は通信異常の有無に応じて電流指令値を選択する処理について説明する。この説明では、電流について d 軸及び q 軸を区別せず、第1系統及び第2系統の電流指令値を「 I_1^* 、 I_2^* 」のように記す。また、電流指令値選択部を単に「 S_{el} 」と記し、電流指令値選択部 S_{el} が選択した電流指令値を「 I^*_{sel} 」と記す。以下のフローチャートの説明で、記号「 S 」はステップを意味する。

【0054】

$S11$ で電流指令値選択部 S_{el} は、各マイコンの401、402のフェイルセーフ部441、442が生成した異常信号 $diag1$ 、 $diag2$ に基づき、他系統の異常又は通信異常が発生しているか否かを判断する。「他系統の異常」には、第2マイコン402の異常、第2インバータ602のスイッチング素子等の異常、及び、回路に設けられたリレーのショート、オープン故障や3相巻線802の断線故障等が含まれる。通信異常には通信の途絶等が含まれる。異常モードについては、あらためて図22を参照して後述する。図8では、自系統を第1系統とし、他系統を第2系統として記号を記載する。また、自系統は正常であることを前提とする。

40

【0055】

$S11$ で NO の場合、他系統が正常、且つ、通信が正常である。この場合、 $S12$ で電

50

流指令値選択部 S_{e1} は、自系統の電流指令値 I_{1}^* 、又は、他系統の電流指令値 I_{2}^* を電流指令選択値 I_{sel}^* としてもよい。或いは、予め設定された優先系統の電流指令値 I_{dom}^* が両系統で共通に選択されてもよい。

【0056】

また、電流指令値選択部 S_{e1} は、自系統の電流指令値 I_{1}^* 及び他系統の電流指令値 I_{2}^* の両方から、電流指令選択値 I_{sel}^* を演算してもよい。例えば電流指令値選択部 S_{e1} は、二系統の電流指令値 I_{1}^* 、 I_{2}^* のうち小さい方の値「 $MIN(I_{1}^*, I_{2}^*)$ 」、大きい方の値「 $MAX(I_{1}^*, I_{2}^*)$ 」、平均値「 $AVG(I_{1}^*, I_{2}^*)$ 」等の値を電流指令選択値 I_{sel}^* としてもよい。

【0057】

S_{11} で YES の場合、他系統が異常、又は、通信が異常であるため、他系統の電流指令値 I_{2}^* を使用することができない。この場合、 S_{13} で電流指令値選択部 S_{e1} は、自系統の電流指令値 I_{1}^* を電流指令選択値 I_{sel}^* とする。なお、非干渉化制御とは別に電流制限値 I_{lim1}^* 、 I_{lim2}^* の変更処理やその他の異常処置が実施されてもよいが、ここでは省略する。

【0058】

電圧指令値演算部 451 は、 S_{14} で、電流指令選択値 I_{sel}^* に基づいて推定電流 I_{est} を演算し、 S_{15} で推定電流 I_{est} を用いて非干渉化制御量である M_s 項及び M 項を演算する。 S_{16} では、 PI 制御項及び L 項を含めた電圧指令値 V^* が演算される。

【0059】

このように、各系統のマイコン 401 、 402 は、各系統の異常情報を双方向に送受信する。自系統が正常であることを前提とすると、各系統のマイコン 401 、 402 は、他系統の正常時且つ通信正常時、自系統のマイコンが演算した電流指令値 I_{1}^* 、又は、他系統のマイコンが演算し系統間通信により取得した電流指令値 I_{2}^* のうち少なくとも一方に基づいて推定電流 I_{est} を演算する。特に自系統の電流指令値 I_{1}^* のみに基づき非干渉化制御を行う場合、他系統の電流情報を用いないため、通信負荷を低減することができる。

【0060】

また、各系統のマイコン 401 、 402 は、他系統の異常時又は通信異常時、自系統のマイコンが演算した電流指令値 I_{1}^* に基づいて推定電流 I_{est} を演算する。これにより、他系統の正常時には、できるだけ他系統の情報を用い、系統間ばらつきによる誤差を低減する。また、他系統の異常時には、正常な自系統の情報を用いることで、推定電流 I_{est} の演算ができなくなる状況が回避される。

【0061】

次に図9、図10のタイムチャートを参照し、各系統のマイコン 401 、 402 による電流処理周期に関する構成例について説明する。図9、図10において、例えば第1マイコン 401 はマスターとして動作し、第2マイコン 402 はスレーブとして動作する。例えば「長い周期」は「短い周期」の5倍の周期として図示されている。つまり、「長い周期」の処理が1回実施される間に「短い周期」の処理が例えば5回実施される。ただし、具体的な周期の比率はこれに限らない。

【0062】

図9に示す第1の構成例では、マスターが電流指令値を演算し、スレーブに通信する。マスターから電流指令値を受信したスレーブは、電流指令値を更新する。マスター及びスレーブによる電流フィードバック演算は、系統間通信での電流指令値の通信周期よりも短い周期で行われる。推定電流の演算は、電流フィードバック演算と同等又は電流フィードバック演算よりも短い周期で行われる。

【0063】

図10に示す第2の構成例では、マスターから電流指令値を受信したスレーブは、電流指令補正係数を算出し、マスターの電流指令値に電流指令補正係数を乗じてスレーブの電

10

20

30

40

50

流指令値を演算する。マスター及びスレーブによる電流フィードバック演算は、電流指令値の通信、及び、電流指令補正係数の演算周期よりも短い周期で行われる。推定電流の演算は、電流フィードバック演算と同等又は電流フィードバック演算よりも短い周期で行われる。

【 0 0 6 4 】

電流指令補正係数の算出について補足する。ここで、以下のように記号を定義する。

M_n : n 周期目のマスターの電流指令値

M_{n-1} : $(n - 1)$ 周期目のマスターの電流指令値

S_n : n 周期目のスレーブの電流指令値

S_{n-1} : $(n - 1)$ 周期目のスレーブの電流指令値

A_n : n 周期目の第 1 補正係数

B_n : n 周期目の第 2 補正係数

10

【 0 0 6 5 】

n 周期目及び $(n - 1)$ 周期目のマスターの電流指令値 M_n 、 M_{n-1} は、 n 周期目及び $(n - 1)$ 周期目のスレーブの電流指令値 S_n 、 S_{n-1} と、 n 周期目の第 1、第 2 補正係数 A_n 、 B_n とを用いて、式 (1 . 1)、(1 . 2) で表される。

$$M_n = A_n \times S_n + B_n \quad \dots (1.1)$$

$$M_{n-1} = A_n \times S_{n-1} + B_n \quad \dots (1.2)$$

【 0 0 6 6 】

式 (1 . 1)、(1 . 2) より、 n 周期目の第 1、第 2 補正係数 A_n 、 B_n について、式 (1 . 3)、(1 . 4) が導かれる。したがって、マスター及びスレーブの電流指令値の前回値及び今回値に基づき、電流指令補正係数が算出される。

$$A_n = (M_{n-1} - M_n) / (S_{n-1} - S_n) \quad \dots (1.3)$$

$$B_n = (M_n S_{n-1} - M_{n-1} S_n) / (S_{n-1} - S_n) \quad \dots (1.4)$$

20

【 0 0 6 7 】

上記第 1、第 2 の構成例を総じて、各系統のマイコン 4 0 1、4 0 2 は、自系統の 3 相巻線 8 0 1、8 0 2 に流れる電流についての電流フィードバック演算を相対的に短い周期で行いつつ、相対的に長い周期で系統間通信を行う。これにより、系統間通信により取得した他系統の電流情報を用いて非干渉化制御を行う場合でも、電流フィードバック演算の演算周期に対し通信周期の長い「粗い通信」を用いることで通信負荷を低減することができる。

30

【 0 0 6 8 】

(第 2 実施形態)

次に図 1 1 ~ 図 1 3 を参照し、第 2 実施形態について説明する。図 1 1 に、第 2 実施形態の E C U 1 0 2 における第 1 系統の電圧指令値演算部 4 5 1 の構成を示す。図 7 に示す第 1 実施形態の構成に加え、第 2 実施形態では各系統の d 軸及び q 軸毎に推定電流補正部 $Comp_d$ 、 $Comp_q$ が設けられている。第 1 系統の推定電流補正部 $Comp_d$ 、 $Comp_q$ は、実線矢印で示すように、自系統の 3 相巻線 8 0 1 に流れる実電流 I_{d1} 、 I_{q1} に基づいて推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1_est} を補正する。

【 0 0 6 9 】

なお、推定電流補正部 $Comp_d$ 、 $Comp_q$ の範囲について、厳密には電流指令値後の減算器への矢印先端までが含まれると考えられるが、便宜上、矢印の途中までを枠線内に表す。また、図 7 に示される電流指令値選択部 Sel_d 、 Sel_q の図示を省略する。第 2 系統の電圧指令値演算部 4 5 2 については、第 1 系統の説明における電流記号の末尾「1」、「2」を反転して読み替えることで、同様に解釈される。

40

【 0 0 7 0 】

d 軸推定電流補正部 $Comp_d$ を例として説明すると、推定電流 I_{d1_est} に対し自系統の実電流 I_{d1} がフィードバックされる。そして、推定電流 I_{d1_est} と実電流 I_{d1} との差分に伝達関数「 $G(s) \cdot (K + s) / K$ 」を乗じた値が、電流指令値 I_{d1}^* から減算される。その減算値に推定演算の伝達関数「 $K / (K + s)$ 」を乗じて得ら

50

れた推定電流 I_{d1_est} を用いて非干渉化制御量が算出される。

【0071】

このように第1マイコン401は、自系統の実電流 I_{d1} 、 I_{q1} のフィードバック演算により推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1_est} を補正し、補正された推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1_est} を用いて非干渉化制御量を算出する。同様に第2マイコン402は、自系統の実電流 I_{d2} 、 I_{q2} のフィードバック演算により推定電流 I_{d2_est} 、 I_{q2_est} を補正し、補正された推定電流 I_{d2_est} 、 I_{q2_est} を用いて非干渉化制御量を算出する。

【0072】

次に図12を参照する。図12ではd軸及びq軸の電流を区別せず、包括した記号を用いる。図12(a)には、図11の制御構成における電流指令値 I^* 、実電流 I 、及び推定電流 I_{est} の関係を等価変換したブロック線図が示される。非干渉化制御量としては、自軸の推定電流 I_{est} が関与する M_s 項のみが記載される。 M_s 項を加算した後の電圧に、モータモデルによる「 $1 / (R + Ls)$ 」が乗算されることで、実電流 I がフィードバックされる。

10

【0073】

図12(a)の一点鎖線枠内には、実電流 I に基づく補正を含む推定電流 I_{est} の演算部のブロック線図が示される。図12(b)には、推定電流演算部における電流指令値 I^* から推定電流 I_{est} までの信号伝達を等価変換したブロック線図が示される。図12(c)には、推定電流演算部における実電流 I から推定電流 I_{est} までの信号伝達を等価変換したブロック線図が示される。

20

【0074】

図12(b)では伝達関数「 $K / (K + s)$ 」と「 $G(s) \cdot (K + s) / K$ 」とがフィードバック結合している。電流指令値 I^* から推定電流 I_{est} までの伝達関数は、式(2)のように求められる。

【0075】

【数1】

$$I_{est} = \frac{K}{K+s} \times \left(\frac{-G(s) \cdot (K+s)}{K} \times I_{est} + I^* \right)$$

$$\frac{K+s}{K} \times I_{est} = \frac{-G(s) \cdot (K+s)}{K} \times I_{est} + I^*$$

$$(1+G(s)) \frac{K+s}{K} \times I_{est} = I^*$$

$$\frac{I_{est}}{I^*} = \frac{K}{(1+G(s)) \cdot (K+s)} \dots (2)$$

30

【0076】

図12(c)では伝達関数「 $G(s) \cdot (K + s) / K$ 」と「 $-K / (K + s)$ 」との直列結合とフィードバック結合とが組み合わされている。実電流 I から推定電流 I_{est} までの伝達関数は、式(3)のように求められる。

40

【0077】

【数2】

$$I_{est} = -G(s) (-I + I_{est})$$

$$(1+G(s)) I_{est} = G(s) I$$

$$\frac{I_{est}}{I} = \frac{G(s)}{1+G(s)} \dots (3)$$

50

【 0 0 7 8 】

伝達関数 $G(s)$ の具体例として「 $G(s) = g / (s)$ 」の場合、式(2)、(3)より、以下の式(4.1)、(4.2)が得られる。

【 0 0 7 9 】

【数3】

$$\frac{I_{est}}{I^*} = \frac{s}{s+g} \cdot \frac{K}{K+s} \dots (4.1)$$

$$\frac{I_{est}}{I} = \frac{g}{s+g} \dots (4.2)$$

10

【 0 0 8 0 】

式(4.1)、(4.2)をまとめると式(4.3)が得られる。式(4.3)の右辺第1項における「 $s / (s+g)$ 」はハイパスフィルタ(図中「HPF」)に相当し、右辺第2項における「 $g / (s+g)$ 」はローパスフィルタ(図中「LPF」)に相当する。したがって、推定電流 I_{est} に対して、高周波成分は電流指令値 I^* の寄与度が高くなり、低周波成分は実電流 I の寄与度が高い伝達特性となる。

【 0 0 8 1 】

【数4】

$$I_{est} = \frac{K}{K+s} \cdot I^* \cdot \underbrace{\frac{s}{s+g}}_{\text{HPF}} + I \cdot \underbrace{\frac{g}{s+g}}_{\text{LPF}} \dots (4.3)$$

20

【 0 0 8 2 】

また、伝達関数 $G(s)$ の別の例として「 $G(s) = g / (1 + Ts)$ 」の場合を想定すると、式(2)、(3)より、以下の式(5.1)、(5.2)が得られる。

【 0 0 8 3 】

【数5】

$$\frac{I_{est}}{I^*} = \frac{Ts+1}{Ts+1+g} \cdot \frac{K}{K+s} \dots (5.1)$$

$$\frac{I_{est}}{I} = \frac{g}{Ts+1+g} \dots (5.2)$$

30

【 0 0 8 4 】

次に図13を参照し、第2実施形態の開ループ特性について説明する。図13(a)には、フィードバックされる実電流 I に式(3)を適用して、図12(a)を等価変換したブロック線図が示される。 $B(s) = Ms \cdot \{G(s) / (1 + G(s))\}$ 、 $C(s) = 1 / (R + Ls)$ とすると、二点鎖線枠内における入力 $U(s)$ から出力 $I(s)$ までの伝達関数は、式(6.1)で表される。なお、図中及び以下の式中において、 $B(s)$ 、 $C(s)$ 、 $U(s)$ 、 $I(s)$ の関数表示 (s) を省略する。式(6.1)より、第2実施形態の開ループ特性は、式(6.2)で表される。

40

【 0 0 8 5 】

【数6】

50

$$\begin{aligned}
 I &= C(U + BI) \\
 (1 - BC)I &= CU \\
 \frac{I}{U} &= \frac{C}{1 - BC} \\
 \frac{I}{U} &= \frac{\frac{1}{R + Ls}}{1 - \frac{G(s)}{1 + G(s)} \times \frac{Ms}{R + Ls}} \dots (6.1)
 \end{aligned}$$

$$\frac{(K_{\omega}L + K_{\omega}\frac{R}{s}) \times \frac{1}{R + Ls}}{1 - \frac{G(s)}{1 + G(s)} \times \frac{Ms}{R + Ls}} \dots (6.2)$$

10

【 0 0 8 6 】

図 1 3 (b)、(c) には、比較例 1、2 として、他の非干渉化制御のブロック線図が示される。図 1 3 (b) に示す比較例 1 では、自系統の実電流 I をそのまま用いることで、他系統の電流を自系統の電流に置き換えて非干渉化制御量を行う。比較例 1 における入力 $U(s)$ から出力 $I(s)$ までの伝達関数は、上記の式 (6 . 1) と同様に式 (7 . 1) で表される。また、比較例 1 の開ループ特性は、式 (7 . 2) で表される。

20

【 0 0 8 7 】

【数 7】

$$\frac{I}{U} = \frac{\frac{1}{R + Ls}}{1 - \frac{Ms}{R + Ls}} \dots (7.1)$$

$$\frac{(K_{\omega}L + K_{\omega}\frac{R}{s}) \times \frac{1}{R + Ls}}{1 - \frac{Ms}{R + Ls}} \dots (7.2)$$

30

【 0 0 8 8 】

図 1 3 (c) に示す比較例 2 では、他系統の電流を自系統の電流指令値 I^* に置き換えて非干渉化制御を行う。この比較例 2 は、特許文献 1 の段落 [0 0 4 6] - [0 0 5 0]、図 8 等に記載された制御構成に相当する。比較例 2 の開ループ特性は、式 (8) で表される。

【 0 0 8 9 】

【数 8】

$$\frac{K_{\omega}(M + L) + K_{\omega}\frac{R}{s}}{R + Ls} \dots (8)$$

40

【 0 0 9 0 】

(開ループ特性、閉ループ特性の比較)

次に図 1 4 ~ 図 1 7 を参照し、第 1、第 2 実施形態、及び比較例 1、2 の開ループ特性及び閉ループ応答特性を比較する。電流制御では一般に制御周期により開ループの位相遅れが決まるため、開ループゲインが低いほど安定性が向上する。また、閉ループゲインが高いほど指令値に対する出力の応答性が優れる。すなわち、開ループゲインが低く、閉ル

50

ープゲインが高い場合に、高安定かつ高応答の特性が得られる。

【0091】

図14に開ループ特性を示す。機器定数として、抵抗 R は 10 [m]、自己インダクタンス L は 50 [μ H]、系統間の磁気結合が無い場合(すなわち $M = 0$ の場合)を除く相互インダクタンス M は 12.5 [μ H]とする。磁気結合無しの場合、又は、特許文献1の図6に開示された従来技術のように他系統の電流を使用して自系統の非干渉化制御を行った場合の開ループゲインは、実線で示すように最も低い。

【0092】

推定電流 I_{est} を補正せずに用いる第1実施形態の開ループ特性は、磁気結合無しの場合の実線にほぼ重なっており、全周波数領域で制御が安定する。一方、一点鎖線で示す比較例1、及び、二点鎖線で示す比較例2では開ループゲインが大きくなり、制御が不安定になる。

10

【0093】

推定電流 I_{est} を補正する第2実施形態について、補正の伝達関数が「 $G(s) = 100/s$ 」の場合の開ループ特性を長破線で示し、「 $G(s) = 1000/s$ 」の場合の開ループ特性を短破線で示す。第2実施形態の開ループ特性は、第1実施形態の実線と、比較例1、2の一点鎖線及び二点鎖線との間に現れる。

【0094】

詳しくは、式(4.3)に反映されるように、推定電流 I_{est} の算出に実電流 I が用いられる低周波領域では、磁気結合無しの場合や第1実施形態に比べて開ループゲインが高くなる。また、推定電流 I_{est} の算出に電流指令値 I^* が用いられる高周波領域では、開ループゲインは、磁気結合無しの場合や第1実施形態と同程度に低下する。補正の伝達関数が「 $G(s) = 100/s$ 」の場合には、「 $G(s) = 1000/s$ 」の場合に比べて低い周波数で開ループゲインが低下し、磁気結合無しの場合や第1実施形態の開ループ特性に近づく。

20

【0095】

続いて、図15~図17に閉ループ応答特性を示す。磁気結合無しの場合、実線で示すように閉ループゲインは最も低い。一点鎖線で示す比較例1、及び、二点鎖線で示す比較例2では、磁気結合無しの場合に比べ高周波領域での閉ループゲインが増加する。第2実施形態にて補正の伝達関数が「 $G(s) = 1000/s$ 」の場合、短破線で示すように、 $100 \sim 250$ [Hz]付近で比較例1、2よりも閉ループゲインが増加する。推定電流 I_{est} を補正せずに用いる場合、及び、推定電流 I_{est} の補正の伝達関数が「 $G(s) = 100/s$ 」の場合、長破線で示すように、 $50 \sim 100$ [Hz]付近で閉ループゲインが増加する。

30

【0096】

以上のように、補正無し、或いは補正後の推定電流 I_{est} を用いて非干渉化制御を行う第1、第2実施形態では、磁気結合無しの場合と同程度の開ループゲインの低さを維持しつつ、比較例1、2と同程度以上の閉ループ応答をすることができる。すなわち、第1、第2実施形態では、いずれも高安定かつ高応答の特性が得られる。ただし、推定電流 I_{est} を補正しない第1実施形態では、モータ巻線の温度上昇による抵抗の変化やモータ巻線の抵抗のばらつきによって推定値がずれてしまうことがある。それに対し第2実施形態では、推定電流 I_{est} を補正することで、温度特性やばらつきの影響を除去することができる。

40

【0097】

(第2実施形態の変形例)

第2実施形態では、通信する情報量がより少なくなる自系統の実電流を使って推定電流 I_{est} を補正する。ただし、自系統の実電流を他系統の実電流に置き換えてもよい。つまり、図11に破線矢印で示すように、第1系統の推定電流補正部Compd、Compqは、他系統の3相巻線802に流れる実電流 I_{d2} 、 I_{q2} に基づいて推定電流 $I_{d1_{est}}$ 、 $I_{q1_{est}}$ を補正してもよい。この構成でも上記の式(2)~式(5)

50

1)、(5.2)が同様に得られ、温度特性やばらつきの影響を除去することができる。

【0098】

(第3実施形態)

次に図18～図22を参照し、第3実施形態について説明する。図18に、第3実施形態のECU103における第1系統の電圧指令値演算部451の構成を示す。図11に示す第2実施形態の構成に加え、第3実施形態では各系統のd軸及びq軸毎に補正用実電流切替部SWd、SWqが設けられている。第2系統の電圧指令値演算部452については、第1系統の説明における電流記号の末尾「1」、「2」を反転して読み替えることで、同様に解釈される。

【0099】

各系統のマイコン401、402は、各系統の3相巻線801、802に流れる実電流 I_{d1} 、 I_{q1} 、 I_{d2} 、 I_{q2} を系統間通信により双方向に送受信する。また、各系統のマイコン401、402は、各系統の異常情報を双方向に送受信する。具体的には、いずれかの系統の異常時、又は、通信異常時、各マイコンの401、402のフェイルセーフ部441、442により生成された異常信号diag1、diag2が各系統の電圧指令値演算部451、452に通知される。

【0100】

第1系統の補正用d軸実電流切替部SWdには、自系統のd軸実電流 I_{d1} 、及び、通信で取得された他系統のd軸実電流 I_{d2} が入力される。補正用d軸実電流切替部SWdは、異常信号diag1、diag2に応じて、推定電流補正部Compdに入力される補正用d軸実電流として、自系統又は他系統の実電流 I_{d1} 、 I_{d2} を切り替える。第1系統の補正用q軸実電流切替部SWqには、自系統のq軸実電流 I_{q1} 、及び、通信で取得された他系統のq軸実電流 I_{q2} が入力される。補正用q軸実電流切替部SWqは、異常信号diag1、diag2に応じて、推定電流補正部Compqに入力される補正用q軸実電流として、自系統又は他系統の実電流 I_{q1} 、 I_{q2} を切り替える。

【0101】

自系統が正常であることを前提とすると、各軸の補正用実電流切替部SWd、SWqは、他系統の正常時且つ通信正常時、他系統の3相巻線802の実電流 I_{d2} 、 I_{q2} に基づいて推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1_est} を補正する。他系統の情報を使用することで、系統間のばらつきによる誤差を低減することができる。一方、各軸の補正用実電流切替部SWd、SWqは、他系統の異常時又は通信異常時、自系統の3相巻線801の実電流 I_{d1} 、 I_{q1} に基づいて推定電流 I_{d1_est} 、 I_{q1_est} を補正する。これにより、推定電流 I_est の補正演算が正しくできなくなる状況が回避される。

【0102】

図19に、自系統又は他系統の動作異常を判定するリレー後電圧監視回路の一構成例を示す。図5のシステム構成とは異なり、図19には、共通のバッテリー11に二系統が並列に接続されるシステム構成が示される。ここで「リレー後電圧」とは、電源リレー121、122に対しインバータ601、602側の電圧、すなわち、インバータ601、602の入力電圧を意味する。電源リレー121、122がオンし、バッテリー11の電圧が各系統のインバータ601、602に正常に供給されていれば、その系統は正常に動作していると判断される。

【0103】

第1系統入力部の電源ラインLp1には電源リレー121及び逆接続防止リレー141が直列接続されている。電源ラインLp1上における電源リレー121と逆接続防止リレー141との間と、グラウンドラインLg1との間に分圧抵抗Ru1、Rd1が接続されている。上側分圧抵抗Ru1と下側分圧抵抗Rd1との間の分圧は、検出端子からVr11として第1マイコン401に取得されると共に、Vr21として第2マイコン402に取得される。

【0104】

同様に、第2系統入力部の電源ラインLp2には電源リレー122及び逆接続防止リレ

10

20

30

40

50

ー 1 4 2 が直列接続されている。電源ライン L p 2 上における電源リレー 1 2 2 と逆接続防止リレー 1 4 2 との間と、グラウンドライン L g 2 との間に分圧抵抗 R u 2、R d 2 が接続されている。上側分圧抵抗 R u 2 と下側分圧抵抗 R d 2 との間の分圧は、検出端子から V r 1 2 として第 1 マイコン 4 0 1 に取得されると共に、V r 2 2 として第 2 マイコン 4 0 2 に取得される。

【 0 1 0 5 】

すなわち、分圧の記号における「V r」の後の 2 桁数字のうち、1 桁目は分圧情報を取得するマイコンの系統番号を意味し、2 桁目は検出対象系統の番号を意味する。このように各系統のマイコン 4 0 1、4 0 2 は、フェイルセーフ機能として、自系統及び他系統のリレー後電圧を相互に監視する。

10

【 0 1 0 6 】

なお、バッテリー 1 1 側に設けられる電源リレー 1 2 1、1 2 2 には、インバータ 6 0 1、6 0 2 側からバッテリー 1 1 側への電流を許容する還流ダイオードが設けられている。インバータ 6 0 1、6 0 2 側に設けられる逆接続防止リレー 1 4 1、1 4 2 には、バッテリー 1 1 側からインバータ 6 0 1、6 0 2 側への電流を許容する還流ダイオードが設けられている。周知の通り、逆接続防止リレー 1 4 1、1 4 2 は、バッテリー 1 1 が正規と逆向きに取り付けられたとき、バッテリー 1 1 からグラウンド線 L g 1、L g 2 を逆回りに経由して電流を遮断する。

【 0 1 0 7 】

図 1 9 の電圧監視回路による自他系統リレー後電圧異常判定のフローチャートを図 2 0 に示す。以下のフローチャートの説明で、記号「S」はステップを意味する。S 3 1、S 3 2 には、第 1 マイコン 4 0 1 及び第 2 マイコン 4 0 2 による判断ステップをまとめて記載する。

20

【 0 1 0 8 】

S 3 1 で、第 1 マイコン 4 0 1 は分圧 V r 1 1 について、第 2 マイコン 4 0 2 は分圧 V r 2 2 について、下限閾値 V r t h _ L 以上、上限閾値 V r t h _ H 以下であるか判断する。S 3 1 で Y E S の場合、S 3 2 に移行する。S 3 1 で N O の場合、S 3 3 で第 1 マイコン 4 0 1 又は第 2 マイコン 4 0 2 は、自系統のリレー後電圧が異常であると判定する。

【 0 1 0 9 】

S 3 2 で、第 1 マイコン 4 0 1 は分圧 V r 1 2 について、第 2 マイコン 4 0 2 は分圧 V r 2 1 について、下限閾値 V r t h _ L 以上、上限閾値 V r t h _ H 以下であるか判断する。S 3 2 で N O の場合、S 3 4 で第 1 マイコン 4 0 1 又は第 2 マイコン 4 0 2 は、他系統のリレー後電圧が異常であると判定する。S 3 2 で Y E S の場合、マイコン 4 0 1、4 0 2 は、S 3 5 で両系統のリレー後電圧が正常であると判定する。

30

【 0 1 1 0 】

図 2 1 に、リレー後電圧監視回路の別の構成例を示す。この構成例では、第 1 系統のグラウンドライン L g 1 に逆接続防止リレー 1 3 1 が接続されている。第 1 系統の分圧抵抗 R u 1、R d 1 は、電源ライン L p 1 上における電源リレー 1 2 1 のインバータ 6 0 1 側と、グラウンドライン L g 1 上における電源リレー 1 3 1 のインバータ 6 0 2 側との間に接続されている。なお、破線で示すように、電源ライン L p 1 上の逆接続防止リレー 1 4 1 は有っても無くてもよい。

40

【 0 1 1 1 】

同様に第 2 系統のグラウンドライン L g 2 に逆接続防止リレー 1 3 2 が接続されている。第 2 系統の分圧抵抗 R u 2、R d 2 は、電源ライン L p 2 上における電源リレー 1 2 2 のインバータ 6 0 1 側と、グラウンドライン L g 2 上における電源リレー 1 3 2 のインバータ 6 0 2 側との間に接続されている。破線で示すように、電源ライン L p 2 上の逆接続防止リレー 1 4 2 は有っても無くてもよい。図 2 1 の構成のリレー後電圧監視回路でも、図 1 9 の構成と同様の異常判定が可能である。

【 0 1 1 2 】

さらに図 2 1 のリレー後電圧監視回路では、両系統のグラウンドライン L g 1、L g 2 の

50

間に抵抗 R_{g-g} が接続されている。正常時に各系統の検出端子のグラウンド端は、抵抗 R_{g-g} を介して他系統のグラウンドラインと接続される。仮に検出端子のグラウンド端がオープン故障すると電位が変化するため、電位に基づき、検出端子のグラウンド端のオープン故障を検出可能である。なお、グラウンド間の抵抗 R_{g-g} は、図中の括弧内に示すように各系統の近傍に二つ設けられてもよく、或いは、一つだけ設けられてもよい。

【0113】

図22に、異常信号の有無に応じて推定電流 I_{est} の演算又は補正に用いる情報を切り替える処理のフローチャートを示す。図22の切り替え処理には、推定電流 I_{est} の演算に用いる電流指令値 I^* の選択に関しては第1実施形態の図8に示す処理が含まれる。また、推定電流 I_{est} の補正に用いる実電流の切り替えに関する処理は、第3実施形態の図18の構成に対応するものである。

10

【0114】

S41で各系統のフェイルセーフ部441、442は、以下のいずれか一つ以上の異常が検出されたか判断する。リレー後電圧異常の検出構成例は上述の通りである。他の異常は、適宜、周知技術により検出可能である。

[1] 通信異常（途絶、ローリングカウンタ、CRC異常など）

[2] 指令値不一致異常

[3] インバータ異常

[4] モータ異常

[5] 他系統の制御状態が異常

[6] 他系統のリレー後電圧が異常

20

【0115】

S41でYESの場合、S42で各系統のマイコン401、402は、自系統のみの情報に基づき推定電流 I_{est} を演算又は補正し、非干渉化制御を行う。S41でNOの場合、S43で各系統のマイコン401、402は、他系統の情報に基づき推定電流 I_{est} を演算又は補正し、非干渉化制御を行う。

【0116】

以上の第3実施形態では、他系統の異常時又は通信異常時に自系統のみの情報に基づき推定電流 I_{est} を演算又は補正し、非干渉化制御する構成とした。これに対し、他系統の正常時且つ通信正常時に自系統のみの情報に基づき推定電流 I_{est} を演算又は補正し、非干渉化制御する構成としてもよい。

30

【0117】

（その他の実施形態）

（a）本実施形態では、二系統のマイコン401、402が個別に設けられ、互いに情報を通信する構成が前提となる。ただし、二つのマイコン以外に監視用等の他の演算装置が別に設けられてもよい。また、トルクセンサや回転角センサは冗長的に設けられる構成に限らず、二系統共通の一つ設けられてもよい。

【0118】

（b）多相回転機の相の数は、3相に限らず4相以上であってもよい。3相以外の回転機において、上記実施形態の「3相巻線」は「多相巻線」に一般化される。本発明の多相回転機の制御装置は、電動パワーステアリング装置の操舵アシストモータの制御装置に限らず、他の用途のモータまたは発電機用の制御装置として適用されてもよい。

40

【0119】

（c）系統間通信の通信規格として、CAN、シリアル通信（UART）の他、LIN、FlexRay、イーサネット（登録商標）等が用いられてもよい。

【0120】

以上、本発明はこのような実施形態に限定されるものではなく、その趣旨を逸脱しない範囲において、種々の形態で実施することができる。

【0121】

本開示に記載の演算装置及びその手法は、コンピュータプログラムにより具体化された

50

一つ乃至は複数の機能を実行するようにプログラムされたプロセッサ及びメモリを構成することによって提供された専用コンピュータにより、実現されてもよい。あるいは、本開示に記載の演算装置及びその手法は、一つ以上の専用ハードウェア論理回路によってプロセッサを構成することによって提供された専用コンピュータにより、実現されてもよい。もしくは、本開示に記載の演算装置及びその手法は、一つ乃至は複数の機能を実行するようにプログラムされたプロセッサ及びメモリと一つ以上のハードウェア論理回路によって構成されたプロセッサとの組み合わせにより構成された一つ以上の専用コンピュータにより、実現されてもよい。また、コンピュータプログラムは、コンピュータにより実行されるインストラクションとして、コンピュータ読み取り可能な非遷移有形記録媒体に記憶されていてもよい。

10

【符号の説明】**【 0 1 2 2 】**

- 1 0 . . . E C U (制御装置)、
- 4 0 1、4 0 2 . . . マイコン (演算装置)、
- 6 0 1、6 0 2 . . . インバータ (電力変換器)、
- 8 0 . . . モータ (多相回転機)、
- 8 0 1、8 0 2 . . . 3 相巻線 (多相巻線)。

20

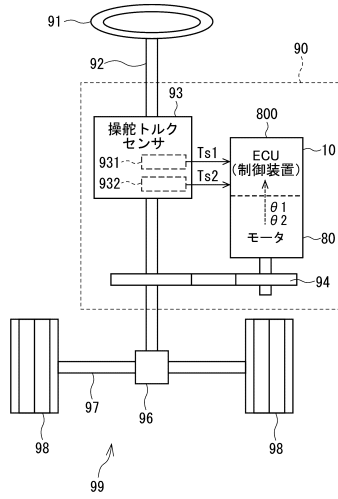
30

40

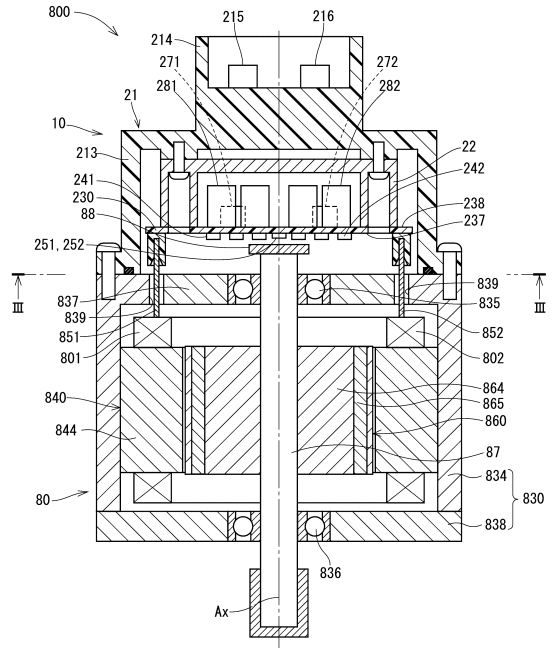
50

【図面】

【図 1】



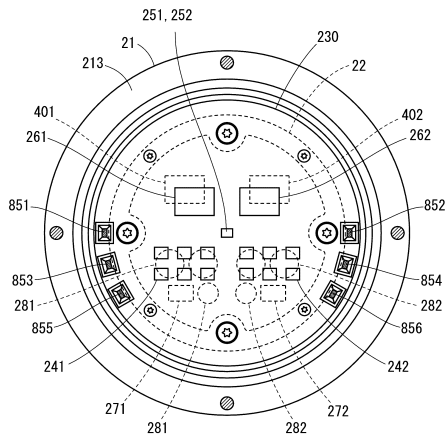
【図 2】



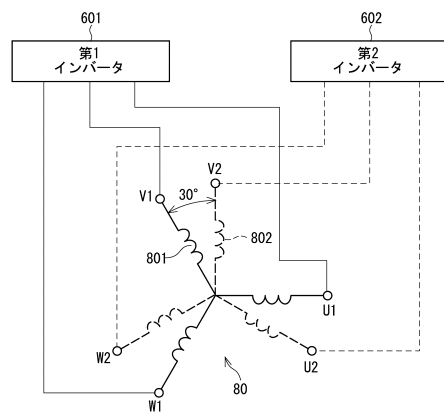
10

20

【図 3】



【図 4】

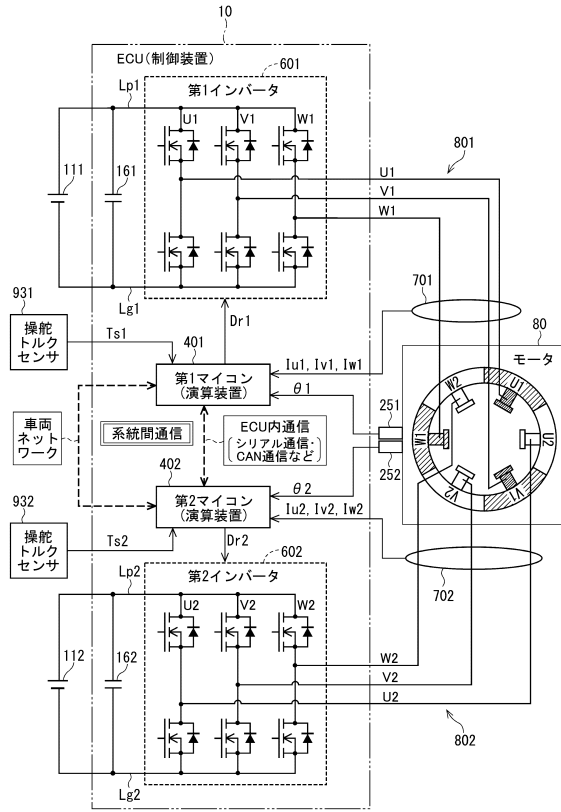


30

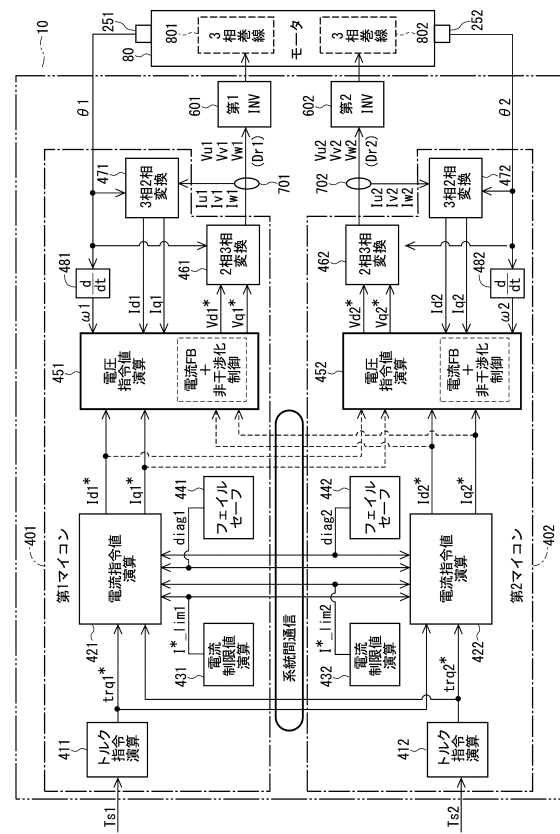
40

50

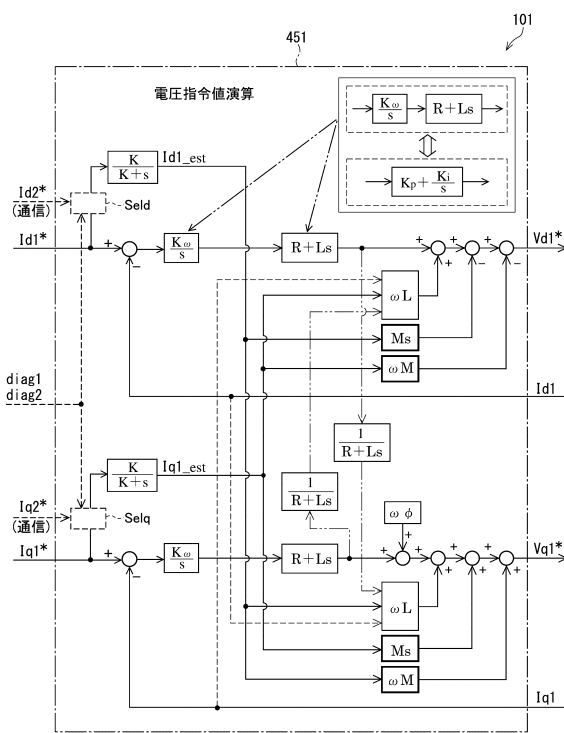
【図5】



【図6】

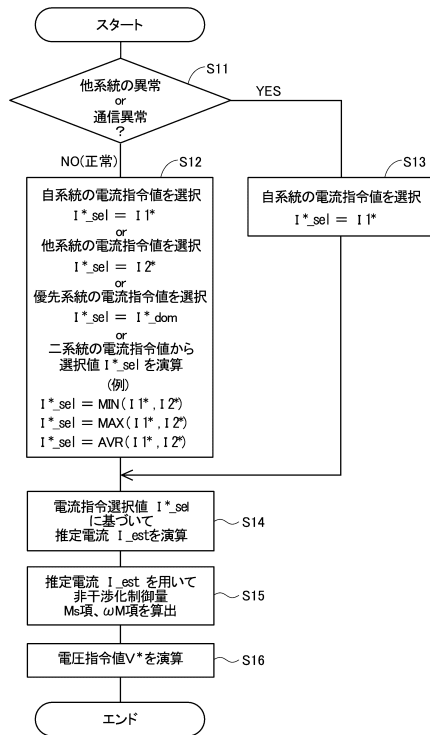


【図7】



【図8】

記号: 自系統=第1系統, 他系統=第2系統の場合



10

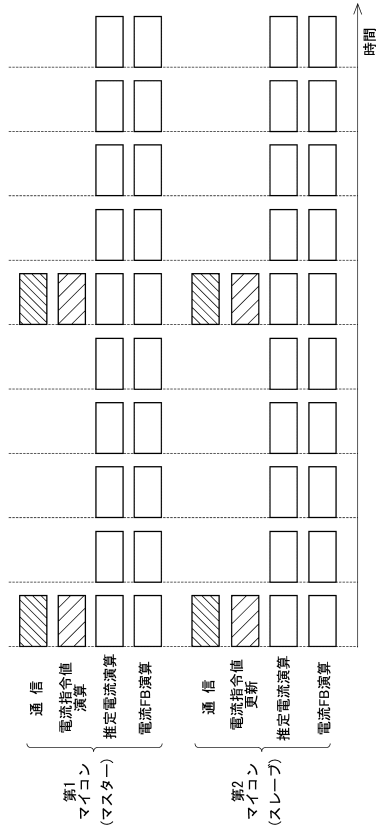
20

30

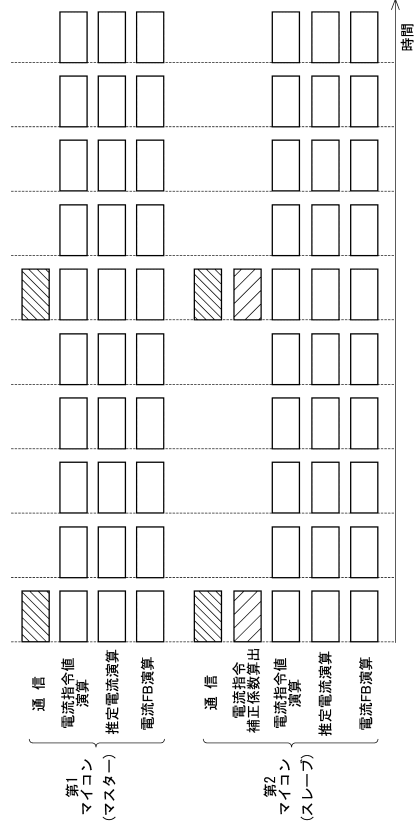
40

50

【図 9】



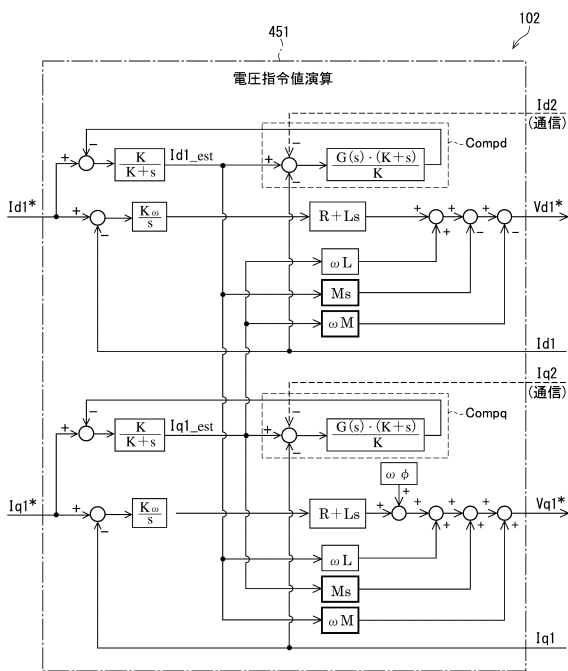
【図 10】



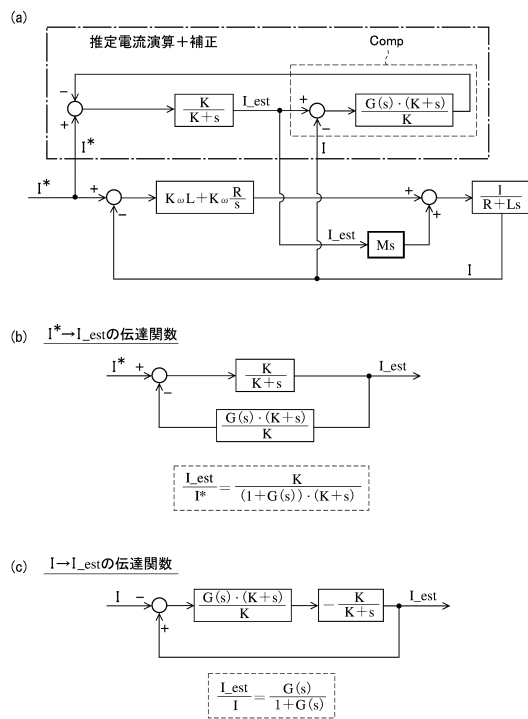
10

20

【図 11】



【図 12】

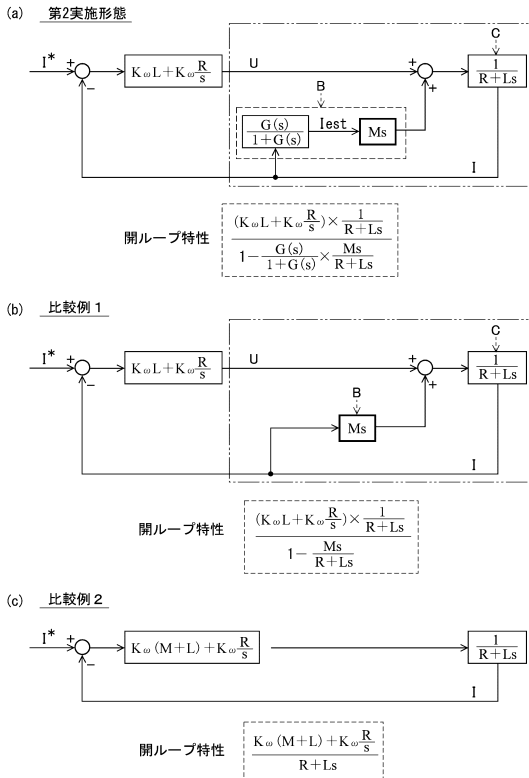


30

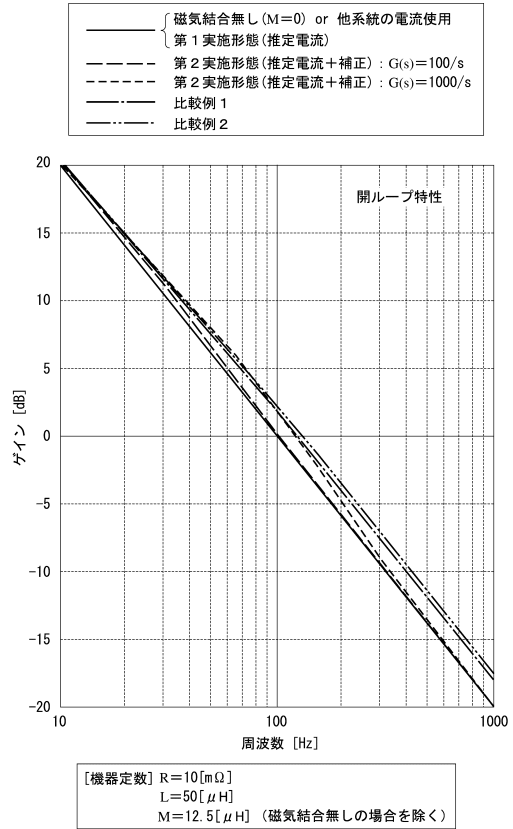
40

50

【 図 1 3 】



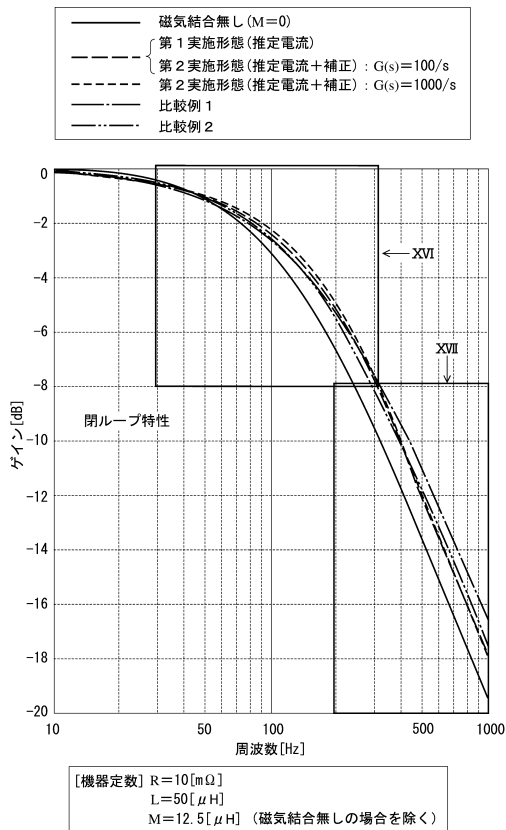
【 図 1 4 】



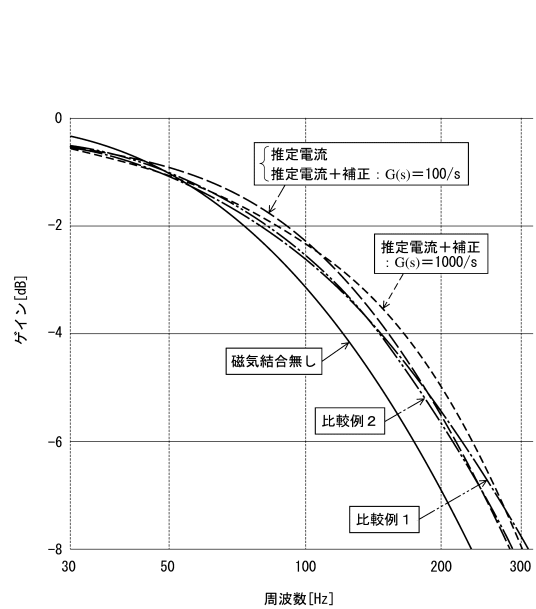
10

20

【 図 1 5 】



【 図 1 6 】

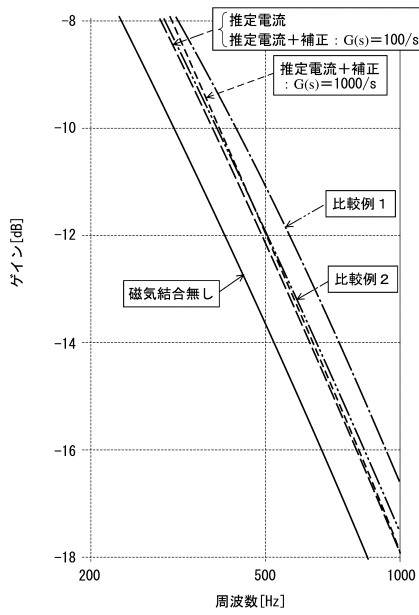


30

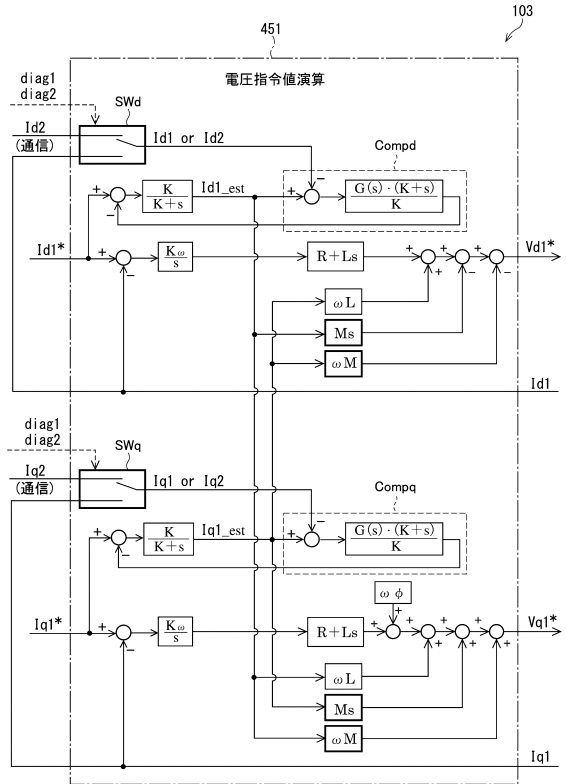
40

50

【図17】



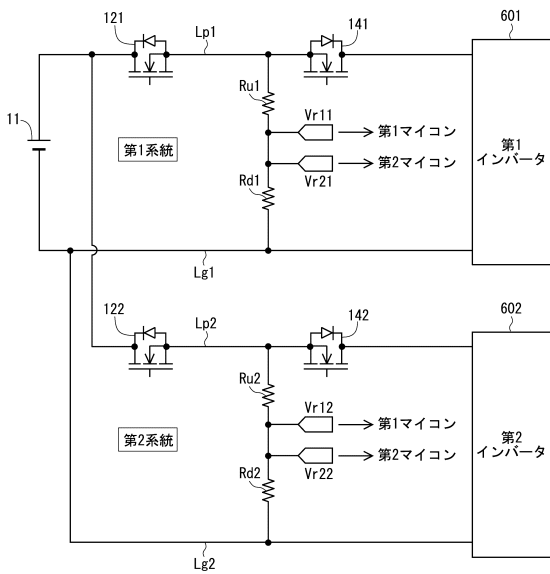
【図18】



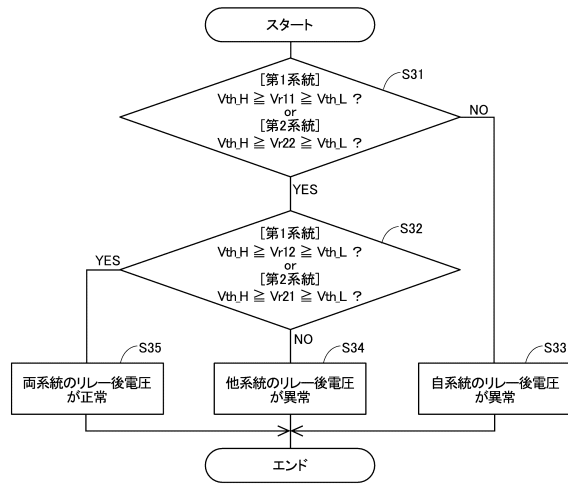
10

20

【図19】



【図20】

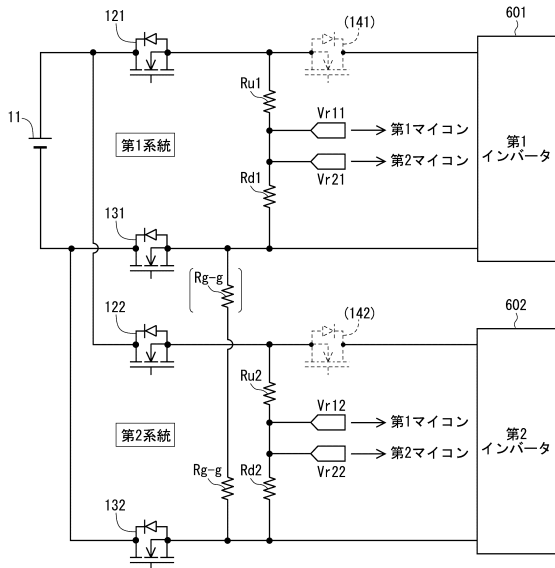


30

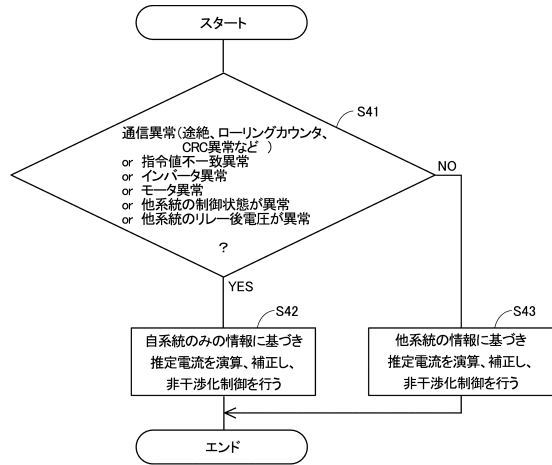
40

50

【図 2 1】



【図 2 2】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開 2 0 1 6 - 1 0 1 0 9 0 (J P , A)
特開 2 0 0 0 - 2 5 3 6 8 9 (J P , A)
特開 2 0 1 0 - 1 4 2 0 1 3 (J P , A)
特開 2 0 1 8 - 1 3 0 0 0 7 (J P , A)
特許第 6 4 9 7 1 0 6 (J P , B 2)
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)
H 0 2 P 2 5 / 2 2