

(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2019-208352
(P2019-208352A)

(43) 公開日 令和1年12月5日(2019.12.5)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO2P 27/06 (2006.01)	HO2P 27/06	5H505
HO2P 21/20 (2016.01)	HO2P 21/20	

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 23 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2019-90434 (P2019-90434)</p> <p>(22) 出願日 令和1年5月13日 (2019.5.13)</p> <p>(31) 優先権主張番号 特願2018-98626 (P2018-98626)</p> <p>(32) 優先日 平成30年5月23日 (2018.5.23)</p> <p>(33) 優先権主張国・地域又は機関 日本国 (JP)</p>	<p>(71) 出願人 000001199 株式会社神戸製鋼所 兵庫県神戸市中央区脇浜海岸通二丁目2番4号</p> <p>(74) 代理人 100067828 弁理士 小谷 悦司</p> <p>(74) 代理人 100115381 弁理士 小谷 昌崇</p> <p>(74) 代理人 100111453 弁理士 櫻井 智</p> <p>(72) 発明者 河合 宏明 兵庫県神戸市中央区脇浜海岸通二丁目2番4号 株式会社神戸製鋼所内</p>
--	---

最終頁に続く

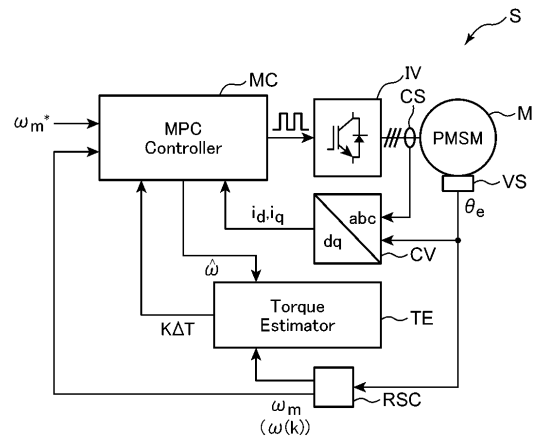
(54) 【発明の名称】 電動機駆動制御装置および該方法ならびに電動機駆動制御システム

(57) 【要約】

【課題】本発明は、より少ない情報処理量で負荷トルクを推定でき、モデル予測制御で電動機を駆動制御できる電動機駆動制御装置および該方法ならびに電動機駆動制御システムを提供する。

【解決手段】本発明の電動機駆動制御装置は、インバータ回路の出力で駆動される電動機Mを制御する装置であって、電動機Mの回転速度を回転速度現在値として求め、電動機Mに働く負荷トルクを推定し、この推定した負荷トルクに基づいてモデル予測制御で電動機Mを制御する。この負荷トルクを推定する際に、本発明の電動機駆動制御装置は、過去に予測された現在の回転速度予測値に基づいて前記負荷トルクを推定する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

インバータ回路の出力で駆動される電動機を制御する電動機駆動制御装置であって、
 前記電動機に働く負荷トルクを推定する負荷トルク推定部と、
 前記インバータ回路で出力可能な時系列な電圧パターンを、互いに異なるように複数、
 生成する電圧パターン生成部と、
 前記電圧パターン生成部で生成された複数の時系列な電圧パターンそれぞれについて、
 前記負荷トルク推定部で推定された負荷トルクが前記電動機に働いている場合であって、
 当該時系列な電圧パターンが前記電動機に入力された場合における前記電動機の回転速度
 を回転速度予測値として予測する速度予測部と、
 前記電圧パターン生成部で生成された複数の時系列な電圧パターンの中から、前記速度
 予測部で予測された前記電動機の各回転速度予測値の中で最も高い評価の回転速度予測値
 に対応する時系列な電圧パターンを選択する電圧パターン選択部と、
 前記電圧パターン選択部で選択された時系列な電圧パターンに基づいて、前記インバー
 タ回路を制御するインバータ制御部とを備え、
 前記負荷トルク推定部は、前記速度予測部で過去に予測された現在の回転速度予測値に
 基づいて前記負荷トルクを推定する、
 電動機駆動制御装置。

10

【請求項 2】

前記電動機の回転速度を回転速度現在値として求める速度出力部をさらに備え、
 前記負荷トルク推定部は、前記速度予測部で過去に予測された現在の回転速度予測値と
 前記速度出力部で求めた回転速度現在値との差分に、所定の係数を乗じた差分乗算値を、
 制御周期ごとに積算することで前記負荷トルクを推定する、
 請求項 1 に記載の電動機駆動制御装置。

20

【請求項 3】

前記負荷トルクを入力とし前記速度予測部の推定誤差を出力とする伝達関数が安定性を
 満足する範囲内に、前記所定の係数を設定する係数設定部をさらに備える、
 請求項 2 に記載の電動機駆動制御装置。

【請求項 4】

前記電圧パターン選択部は、制御目標の回転速度を含む評価関数を用いることによって
 前記評価を行い、
 現在以前の実績値に基づいて将来の制御目標の回転速度を予測する制御目標予測部をさ
 らに備える、
 請求項 1 ないし請求項 3 のいずれか 1 項に記載の電動機駆動制御装置。

30

【請求項 5】

前記制御目標予測部は、現在以前の実績値における変化量に基づいて将来の制御目標の
 回転速度を予測する、
 請求項 4 に記載の電動機駆動制御装置。

【請求項 6】

前記制御目標予測部は、現在以前の実績値を外挿することによって将来の制御目標の回
 転速度を予測する、
 請求項 4 に記載の電動機駆動制御装置。

40

【請求項 7】

インバータ回路の出力で駆動される電動機を制御する電動機駆動制御方法であって、
 前記電動機に働く負荷トルクを推定する負荷トルク推定工程と、
 前記インバータ回路で出力可能な時系列な電圧パターンを、互いに異なるように複数、
 生成する電圧パターン生成工程と、
 前記電圧パターン生成工程で生成された複数の時系列な電圧パターンそれぞれについて
 、前記負荷トルク推定工程で推定された負荷トルクが前記電動機に働いている場合であ
 っ
 て、当該時系列な電圧パターンが前記電動機に入力された場合における前記電動機の回転

50

速度を回転速度予測値として予測する速度予測工程と、

前記電圧パターン生成工程で生成された複数の時系列な電圧パターンの中から、前記速度予測工程で予測された前記電動機の各回転速度予測値の中で最も高い評価の回転速度予測値に対応する時系列な電圧パターンを選択する電圧パターン選択工程と、

前記電圧パターン選択工程で選択された時系列な電圧パターンに基づいて、前記インバータ回路を制御するインバータ制御工程とを備え、

前記負荷トルク推定工程は、前記速度予測工程で過去に予測された現在の回転速度予測値に基づいて前記負荷トルクを推定する、

電動機駆動制御方法。

【請求項 8】

電動機と、

前記電動機を駆動するインバータ回路と、

前記インバータ回路を制御することで前記電動機を制御する電動機駆動制御部とを備え、

前記電動機駆動制御部は、請求項 1 ないし請求項 6 のいずれか 1 項に記載の電動機駆動制御装置である、

電動機駆動制御システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電動機の駆動を制御する電動機駆動制御装置および電動機駆動制御方法に関する。そして、本発明は、前記電動機駆動制御装置を備える電動機駆動制御システムに関する。

【背景技術】

【0002】

電動機の駆動制御には、例えば P I 制御を用いたフィードバック制御が用いられることが多い。その速度制御では、目標速度に対する応答性は、電動機が用いられた製品の性能に影響するため、その高さが要求される。前記フィードバック制御では、フィードバックゲインを大きく設定することで、応答性を向上できるが、いわゆるオーバーシュートやハンチングが生じてしまう虞がある。

【0003】

このため、従来の前記フィードバック制御に較べて高い応答性を実現できることから、モデル予測制御 (model predictive control、MPC) が電動機の駆動制御に提案されている (例えば、特許文献 1 および特許文献 2 参照)。このモデル予測制御では、制御周期ごとに次の一連の処理が繰り返し実行されることで電動機が駆動制御される。前記一連の処理において、まず、電動機のモデルを用いることで複数の候補入力電圧ごとに、電動機における将来の挙動が予測される。次に、各予測結果 (電動機の各挙動) が評価され、最も目標に近い予測結果が選択され、この選択された予測結果を与える候補入力電圧で電動機が駆動制御される。このようなモデル予測制御では、予測結果を基に最適化した候補入力電圧を決定できることから、従来の前記フィードバック制御を超える高い応答性が期待できる。

【0004】

モデル予測制御で速度制御する場合、上述のように予測が必要であり、この予測には、電動機の場合、電動機自身の特性パラメータだけでなく、電動機に外部から働く負荷トルクの情報も必要となる。しかしながら、負荷トルクは、一般に、未知であり、事前の予測が難しい。そこで、例えば、非特許文献 1 に開示された技術がある。この非特許文献 1 に開示された、電動機をモデル予測制御で速度制御する技術では、カルマンフィルタを用いて負荷トルクが推定されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

10

20

30

40

50

【0005】

【特許文献1】特開2008-228419号公報

【特許文献2】特開2013-62949号公報

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献1】Esteban Fuentes, et al, 「Cascade - Free Predictive Speed Control for Electrical Drives」、IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 61, No. 5, MAY 2014

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

前記非特許文献1に開示された技術は、カルマンフィルタを用いて負荷トルクを推定することで、電動機をモデル予測制御で速度制御できている。しかしながら、モデル予測制御では、前記予測の情報処理に演算リソースの多くが占められ、負荷トルクの推定等のその他の情報処理に対し演算リソースを割くことが難しい。演算処理能力の比較的高い、例えばFPGA (field programmable gate array) 等を用いることによって、前記非特許文献1に開示された技術における負荷トルク推定が、モデル予測制御での速度制御の実行中に可能となり得るが、コスト高になってしまう。コストの制約から演算処理能力の比較的高くない情報処理装置を用いて非特許文献1に開示された技術を用いると、リアルタイムで速度制御することが難しい。

【0008】

本発明は、上述の事情に鑑みて為された発明であり、その目的は、より少ない情報処理量で負荷トルクを推定でき、モデル予測制御で電動機を駆動制御できる電動機駆動制御装置および電動機駆動制御方法ならびに前記電動機駆動制御装置を備える電動機駆動制御システムを提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明者は、種々検討した結果、上記目的は、以下の本発明により達成されることを見出した。すなわち、本発明の一態様にかかる電動機駆動制御装置は、インバータ回路の出力で駆動される電動機を制御する電動機駆動制御装置であって、前記電動機に働く負荷トルクを推定する負荷トルク推定部と、前記インバータ回路で出力可能な時系列な電圧パターンを、互いに異なるように複数、生成する電圧パターン生成部と、前記電圧パターン生成部で生成された複数の時系列な電圧パターンそれぞれについて、前記負荷トルク推定部で推定された負荷トルクが前記電動機に働いている場合であって、当該時系列な電圧パターンが前記電動機に入力された場合における前記電動機の回転速度を回転速度予測値として予測する速度予測部と、前記電圧パターン生成部で生成された複数の時系列な電圧パターンの中から、前記速度予測部で予測された前記電動機の各回転速度予測値の中で最も高い評価の回転速度予測値に対応する時系列な電圧パターンを選択する電圧パターン選択部と、前記電圧パターン選択部で選択された時系列な電圧パターンに基づいて、前記インバータ回路を制御するインバータ制御部とを備え、前記負荷トルク推定部は、前記速度予測部で過去に予測された現在の回転速度予測値に基づいて前記負荷トルクを推定する。好ましくは、電動機駆動制御装置は、インバータ回路の出力で駆動される電動機を制御する電動機駆動制御装置であって、前記電動機の回転速度を回転速度現在値として求める速度出力処理を実施する速度出力部と、前記電動機に働く負荷トルクを推定する負荷トルク推定処理を実施する負荷トルク推定部と、前記インバータ回路で出力可能な時系列な電圧パターンを、互いに異なるように複数、生成する電圧パターン生成部と、前記電圧パターン生成部で生成された複数の時系列な電圧パターンそれぞれについて、前記負荷トルク推定部で推定された負荷トルクが前記電動機に働いている場合であって、当該時系列な電圧パターンが前記電動機に入力された場合における前記電動機

10

20

30

40

50

の回転速度を回転速度予測値として予測する速度予測処理を実施する速度予測部と、前記電圧パターン生成部で生成された複数の時系列な電圧パターンの中から、前記速度予測部で予測された前記電動機の各回転速度予測値の中で最も高い評価の回転速度予測値に対応する時系列な電圧パターンを選択する電圧パターン選択処理を実施する電圧パターン選択部と、前記電圧パターン選択部で選択された時系列な電圧パターンに基づいて、前記インバータ回路を制御するインバータ制御処理を実施するインバータ制御部と、前記速度出力処理、前記負荷トルク推定処理、前記電圧パターン生成処理、前記速度予測処理、前記電圧パターン選択処理およびインバータ制御処理を、前記速度出力部、前記負荷トルク推定部、電圧パターン生成部、前記速度予測部、前記電圧パターン選択部および前記インバータ制御部に、所定の制御周期で繰り返し実施させる繰り返し制御部とを備え、前記前記負荷トルク推定部は、前記速度予測部で過去に予測された現在の回転速度予測値に基づいて前記負荷トルクを推定する。

10

【0010】

このような電動機駆動制御装置は、負荷トルクの推定に、過去に予測された現在の回転速度予測値を用いるので、従来のカルマンフィルタを用いる場合に較べてより少ない情報処理量で負荷トルクを推定でき、負荷トルクが働く使用条件でも、モデル予測制御で電動機を駆動制御できる。このため、演算処理能力の比較的低い、安価な演算処理装置でモデル予測制御を実現する場合でも、上記電動機駆動制御装置は、略リアルタイムで電動機を駆動制御できる。

【0011】

他の一態様では、上述の電動機駆動制御装置において、前記電動機の回転速度を回転速度現在値として求める速度出力部をさらに備え、前記負荷トルク推定部は、前記速度予測部で過去に予測された現在の回転速度予測値と前記速度出力部で求めた回転速度現在値との差分に、所定の係数を乗じた差分乗算値を、制御周期ごとに積算することで前記負荷トルクを推定する。

20

【0012】

このような電動機駆動制御装置は、速度予測部で過去に予測された現在の回転速度予測値と速度出力部で求めた回転速度現在値との差分に、所定の係数を乗じた差分乗算値を、制御周期ごとに積算することで負荷トルクを推定するので、簡便に、より少ない情報処理量で負荷トルクを推定でき、モデル予測制御で電動機を駆動制御できる。

30

【0013】

他の一態様では、上述の電動機駆動制御装置において、前記負荷トルクを入力とし前記速度予測部の推定誤差を出力とする伝達関数が、安定性を満足する範囲内に、前記所定の係数を設定する係数設定部をさらに備える。

【0014】

このような電動機駆動制御装置は、制御系が安定するように係数を適切に設定できる。このため、不適切な係数によって駆動の際に生じる発振や不安定化が事前に回避できる。

【0015】

他の一態様では、これら上述の電動機駆動制御装置において、前記電圧パターン選択部は、制御目標の回転速度を含む評価関数を用いることによって前記評価を行い、現在以前の実績値に基づいて将来の制御目標の回転速度を予測する制御目標予測部をさらに備える。好ましくは、上述の電動機駆動制御装置において、前記制御目標予測部は、現在以前の実績値における変化量に基づいて将来の制御目標の回転速度を予測する。他の一態様では、これら上述の電動機駆動制御装置において、前記制御目標予測部は、現在以前の実績値を外挿することによって将来の制御目標の回転速度を予測する。

40

【0016】

このような電動機駆動制御装置は、制御目標予測部をさらに備えるので、制御目標の回転速度が変化する場合でも、より適切に制御できる。

【0017】

本発明の他の一態様にかかる電動機駆動制御方法は、インバータ回路の出力で駆動され

50

る電動機を制御する電動機駆動制御方法であって、前記電動機に働く負荷トルクを推定する負荷トルク推定工程と、前記インバータ回路で出力可能な時系列な電圧パターンを、互いに異なるように複数、生成する電圧パターン生成工程と、前記電圧パターン生成工程で生成された複数の時系列な電圧パターンそれぞれについて、前記負荷トルク推定工程で推定された負荷トルクが前記電動機に働いている場合であって、当該時系列な電圧パターンが前記電動機に入力された場合における前記電動機の回転速度を回転速度予測値として予測する速度予測工程と、前記電圧パターン生成工程で生成された複数の時系列な電圧パターンの中から、前記速度予測工程で予測された前記電動機の各回転速度予測値の中で最も高い評価の回転速度予測値に対応する時系列な電圧パターンを選択する電圧パターン選択工程と、前記電圧パターン選択工程で選択された時系列な電圧パターンに基づいて、前記インバータ回路を制御するインバータ制御工程とを備え、前記負荷トルク推定工程は、前記速度予測工程で過去に予測された現在の回転速度予測値に基づいて前記負荷トルクを推定する。

10

【0018】

このような電動機駆動制御方法は、負荷トルクの推定に、過去に予測された現在の回転速度予測値を用いるので、従来のカルマンフィルタを用いる場合に較べてより少ない情報処理量で負荷トルクを推定でき、負荷トルクが働く使用条件でも、モデル予測制御で電動機を駆動制御できる。このため、演算処理能力の比較的低い、安価な演算処理装置でモデル予測制御を実現する場合でも、上記電動機駆動制御方法は、略リアルタイムで電動機を駆動制御できる。

20

【0019】

本発明の他の一態様にかかる電動機駆動制御システムは、電動機と、前記電動機を駆動するインバータ回路と、前記インバータ回路を制御することで前記電動機を制御する電動機駆動制御部とを備え、前記電動機駆動制御部は、これら上述のいずれかの電動機駆動制御装置である。

【0020】

これによれば、これら上述のいずれかの電動機駆動制御装置を備えた電動機駆動制御システムが提供できる。このような電動機駆動制御システムは、これら上述のいずれかの電動機駆動制御装置を備えるので、より少ない情報処理量で負荷トルクを推定でき、モデル予測制御で電動機を駆動制御できる。

30

【発明の効果】**【0021】**

本発明にかかる電動機駆動制御装置および電動機駆動制御方法は、より少ない情報処理量で負荷トルクを推定でき、モデル予測制御で電動機を駆動制御できる。そして、本発明によれば、この電動機駆動制御装置を備えた電動機駆動制御システムが提供できる。

【図面の簡単な説明】**【0022】**

【図1】実施形態における電動機駆動制御システムの構成を示すブロック図である。

【図2】前記電動機駆動制御システムにおけるMPC制御部の構成を示すブロック図である。

40

【図3】前記電動機駆動制御システムにおけるインバータ回路の構成を示す回路図である。

【図4】前記電動機駆動制御システムにおける負荷トルク推定部の構成を示すブロック図である。

【図5】前記インバータ回路で出力可能な電圧を示すベクトル図である。

【図6】前記インバータ回路で出力可能な時系列な電圧パターンの一例を説明するための図である。

【図7】負荷トルクを入力とし、回転速度予測の推定誤差を出力とする伝達関数のステップ応答を説明するための図である。

【図8】前記電動機駆動制御システムにおける動作を示すフローチャートである。

50

【図9】負荷トルクの更新量を調整するためのゲインを求めるためのフローチャートである。

【図10】速度制御のシミュレーション結果を示す図である。

【図11】前記電動機駆動制御システムの第1変形形態を説明するための図である。

【発明を実施するための形態】

【0023】

以下、図面を参照して、本発明の1または複数の実施形態が説明される。しかしながら、発明の範囲は、開示された実施形態に限定されない。なお、各図において同一の符号を付した構成は、同一の構成であることを示し、適宜、その説明を省略する。本明細書において、総称する場合には添え字を省略した参照符号で示し、個別の構成を指す場合には添え字を付した参照符号で示す。

10

【0024】

図1は、実施形態における電動機駆動制御システムの構成を示すブロック図である。図2は、前記電動機駆動制御システムにおけるMPC制御部の構成を示すブロック図である。図3は、前記電動機駆動制御システムにおけるインバータ回路の構成を示す回路図である。図4は、前記電動機駆動制御システムにおける負荷トルク推定部の構成を示すブロック図である。図5は、前記インバータ回路で出力可能な電圧を示すベクトル図である。図6は、前記インバータ回路で出力可能な時系列な電圧パターンの一例を説明するための図である。図7は、負荷トルクを入力とし、回転速度予測の推定誤差を出力とする伝達関数のステップ応答を説明するための図である。図7の横軸は、経過時間であり、その縦軸は、回転速度の推定誤差である。

20

【0025】

実施形態における電動機駆動制御システムは、電動機を、制御しつつ、駆動するシステムであり、インバータ回路の出力で駆動される電動機を制御する電動機駆動制御装置を備える。本実施形態では、電動機駆動制御システムSは、モデル予測制御を用いたベクトル制御によって、電動機を、制御しつつ、駆動する。このような電動機駆動制御システムSは、例えば、図1に示すように、電動機Mと、インバータ回路IVと、モデル予測制御部MCと、3相2相変換部CVと、負荷トルク推定部TEと、回転速度処理部RSCと、電流測定部CSと、回転角度測定部VSとを備える。

【0026】

電動機Mは、インバータ回路IVに接続され、インバータ回路IVの交流出力で駆動される電動機である。例えば、電動機Mは、インバータ回路IVから出力されるU相、V相およびW相の三相交流電流で駆動される同期電動機、より具体的には、本実施形態では永久磁石式同期電動機(permanent magnet synchronous motor、PMSM)である。なお、電動機Mは、これに限定されるものではなく、例えば、誘導電動機(induction motor、IM)やSRモータ(Switched Reluctance motor、SRM)等の他の種類であっても良い。

30

【0027】

インバータ回路IVは、モデル予測制御部MCに接続され、モデル予測制御部MCの制御に従って、直流電源Vdcの直流電力を、所定の周波数の交流電力へ変換する回路である。インバータ回路IVは、例えば、図3に示すように、直列に接続された2個のスイッチング素子Trを1組として、互いに並列に接続された3組Tr1、Tr4；Tr2、Tr5；Tr3、Tr6を備える。より具体的には、インバータ回路IVは、6個の第1ないし第6スイッチングTr1～Tr6を備える。これら第1ないし第6スイッチング素子Tr1～Tr6は、例えば絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)等の、オンオフするスイッチ機能を持つ電力用半導体素子である。第1ないし第3スイッチング素子Tr1～Tr3の各一方端子(例えば各コレクタ端子)は、それぞれ、直流電源Vdcの一方端子に接続される。第1スイッチング素子Tr1の他方端子(例えばエミッタ端子)は、第4スイッチング素子Tr4の一方端子(例えば各コレクタ端子)に接続される。第2スイッチング素子Tr2の他方端子(例えばエミッタ端子)は、第5スイッチング素子T

40

50

r 5 の一方端子（例えば各コレクタ端子）に接続される。第 3 スイッチング素子 $T r 3$ の他方端子（例えばエミッタ端子）は、第 6 スイッチング素子 $T r 6$ の一方端子（例えば各コレクタ端子）に接続される。これら第 4 ないし第 6 スイッチング素子 $T r 4 \sim T r 6$ の各他方端子（例えば各エミッタ端子）は、それぞれ、直流電源 $V d c$ の他方端子に接続される。これら第 1 ないし第 6 スイッチング素子 $T r 1 \sim T r 6$ における、スイッチング素子 $T r$ をオンオフするための制御信号が入力される各制御端子（例えばゲート端子）は、モデル予測制御部 $M C$ に接続される。これら第 1 ないし第 6 スイッチング素子 $T r 1 \sim T r 6$ それぞれにおいて、その一方端子と他方端子との各間それぞれには、他方端子にアノード端子を接続した各ダイオード $D 1 \sim D 6$ が接続される。そして、第 1 スイッチング素子 $T r 1$ と第 4 スイッチング素子 $T r 4$ とを接続する第 1 接続点は、例えば U 相の交流電流を出力し、電動機 M の U 相を接続する入力端子に接続される。第 2 スイッチング素子 $T r 2$ と第 5 スイッチング素子 $T r 5$ とを接続する第 2 接続点は、例えば V 相の交流電流を出力し、電動機 M の V 相を接続する入力端子に接続される。第 3 スイッチング素子 $T r 3$ と第 6 スイッチング素子 $T r 6$ とを接続する第 3 接続点は、例えば W 相の交流電流を出力し、電動機 M の W 相を接続する入力端子に接続される。このような構成のインバータ回路 $I V$ は、いわゆる 2 レベル 3 相インバータ回路であり、各組の一方のスイッチング素子 $T r 1$ 、 $T r 2$ 、 $T r 3$ と他方のスイッチング素子 $T r 4$ 、 $T r 5$ 、 $T r 6$ とは、互いに逆のスイッチング態様（一方がオンの場合には他方がオフで、一方がオフの場合には他方がオンである態様）となるようにモデル予測制御部 $M C$ の制御に従って制御され、U 相、V 相および W 相の 3 相の交流電流を電動機 M へ出力する。

【 0 0 2 8 】

電流測定部 $C S$ は、3 相 2 相変換部 $C V$ に接続され、インバータ回路 $I V$ から電動機 M へ流れる電流、本実施形態では、U 相電流、V 相電流および W 相電流それぞれを測定し、その各測定結果を 3 相 2 相変換部 $C V$ へ出力する装置である。電流測定部 $C S$ は、例えば交流電流計を備えて構成される。

【 0 0 2 9 】

回転角度測定部 $V S$ は、3 相 2 相変換部 $C V$ および回転速度処理部 $R S C$ それぞれに接続され、電動機 M における磁極位置を角度で測定し、その測定結果（回転角度）を 3 相 2 相変換部 $C V$ および回転速度処理部 $R S C$ それぞれに出力する装置である。回転角度測定部 $V S$ は、例えば、ロータリエンコーダ（パルスジェネレータ）や、ホール IC 等を備えて構成される。なお、センサレスの場合には、回転角度測定部 $V S$ は、電動機 M のモデルを用いて電流および電圧から電動機 M の回転角度を求めても良い。

【 0 0 3 0 】

3 相 2 相変換部 $C V$ は、モデル予測制御部 $M C$ に接続され、電流測定部 $C S$ から入力された測定結果（U 相電流、V 相電流および W 相電流）および回転角度測定部 $V S$ から入力された測定結果（回転角度）から、いわゆるクラーク（ $C l a r k e$ ）変換およびパーク（ $P a r k$ ）変換によって、励磁電流（d 軸電流） i_d およびトルク分電流（q 軸電流） i_q を求め、この求めた d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q をモデル予測制御部 $M C$ へ出力するものである。

【 0 0 3 1 】

回転速度処理部 $R S C$ は、モデル予測制御部 $M C$ および負荷トルク推定部 $T E$ それぞれに接続され、回転角度測定部 $V S$ から入力された測定結果（回転角度）から、電動機 M の回転速度 ω_m を求め、この求めた回転速度 ω_m を回転速度現在値 ω_m としてモデル予測制御部 $M C$ および負荷トルク推定部 $T E$ それぞれへ出力するものである。すなわち、回転速度処理部 $R S C$ は、回転角度測定部 $V S$ から入力された測定結果（回転角度）から、電動機 M の回転速度 ω_m を求め、この求めた回転速度 ω_m を回転速度現在値 ω_m としてモデル予測制御部 $M C$ および負荷トルク推定部 $T E$ それぞれへ出力する速度出力処理を実施する。例えば、回転角度測定部 $V S$ で測定された回転角度 θ_e を時間微分して電動機 M の極対数 p の逆数を乗じることによって回転速度 ω_m が求められる。

【 0 0 3 2 】

10

20

30

40

50

負荷トルク推定部 T E は、モデル予測制御部 M C に接続され、電動機 M に働く負荷トルクを推定するものである。すなわち、負荷トルク推定部 T E は、電動機 M に働く負荷トルクを推定する負荷トルク推定処理を実施する。モデル予測制御では、その性質上、現時点における電動機 M の回転速度を過去に予測している。回転速度の予測値は、電動機 M に負荷トルクを加えた電圧方程式および運動方程式に基づいて導出される。ここで、仮に、予測された回転速度予測値と実測された回転速度現在値との間に誤差が生じている場合、電動機 M のモデルに含まれる誤差を無視すると、そこには、回転速度の予測に用いられた負荷トルクの推定値に誤差が含まれていると考えられる。この考えから、本実施形態では、負荷トルク推定部 T E は、モデル予測制御部 M C における後述の速度予測部 1 3 で過去に予測された現在の回転速度予測値に基づいて負荷トルクを推定する。より具体的には、負荷トルク推定部 T E は、速度予測部 1 3 で過去に予測された現在の回転速度予測値と回転角度測定部 V S で測定された回転角度から求めた回転速度現在値との差分に、予め設定された所定の係数を乗じた差分乗算値を、制御周期ごとに積算することで負荷トルクを推定する。

10

【 0 0 3 3 】

すなわち、モデル予測制御部 M C が、予め設定された所定の制御周期ごとに繰り返し電動機 M をインバータ回路 I V を介して制御する場合、k 番目の制御における負荷トルク推定値を、上にハット (^) 付きの $T_1(k)$ とし、電動機 M の慣性モーメントを J とし、k 番目の制御 (現在) における回転速度予測値を、上にハット (^) 付きの $\hat{\omega}(k)$ とし、k 番目の制御 (現在) における回転速度現在値を $\omega(k)$ とし、制御周期 (モデル予測制御における繰り返し制御の時間間隔) を T_s とし、前記所定の係数として、負荷トルクのゲイン (更新量を調整するための更新量調整ゲイン) を K とする場合に、負荷トルク推定値は、次式 1 で表される。

20

【 0 0 3 4 】

【 数 1 】

$$\text{式 1 ; } \hat{T}_1(k) = \sum_{n=0}^k -\frac{J}{T_s} K (\hat{\omega}(k-n) - \omega(k-n))$$

【 0 0 3 5 】

より具体的には、本実施形態では、負荷トルク推定部 T E は、上記式 1 から、例えば、図 4 に示すように、減算部 3 1 と、ローパスフィルタ部 3 2 と、パラメータ演算部 3 3 と、ゲイン演算部 3 4 とを備える。

30

【 0 0 3 6 】

減算部 3 1 は、回転速度処理部 R S C およびモデル予測制御部 M C それぞれに接続され、モデル予測制御部 M C の速度予測部 1 3 で過去、例えば制御周期の 1 つ前に求められた現在の回転速度予測値 (上にハット (^) 付きの $\hat{\omega}(k)$) と回転速度処理部 R S C で求められた現在の回転速度現在値 $\omega(k)$ との差分を求め、この求めた差分をローパスフィルタ部 3 2 へ出力するものである。

【 0 0 3 7 】

ローパスフィルタ部 3 2 は、減算部 3 1 から出力された前記差分に含まれる、例えばノイズ等に起因する高周波成分を除去し、この高周波成分を除去した前記差分をパラメータ演算部 3 3 へ出力するものである。ローパスフィルタ部 3 2 は、例えば、次式 2 で表される 2 次のデジタルローパスフィルタ $F(z)$ を備えて構成される。ここで、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、および b_2 は、フィルタ係数であり、ローパスフィルタ部 3 2 の仕様等に応じて適宜に設定される。なお、デジタルローパスフィルタ $F(z)$ は、2 次に限られるものではなく、1 次や 3 次以上あっても良い。また、前記差分に含まれる高周波成分が無視できる場合には、ローパスフィルタ部 3 2 は、省略されても良い。

40

【 0 0 3 8 】

【数 2】

$$\text{式 2 ; } F(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

【0039】

パラメータ演算部 33 は、ローパスフィルタ部 32 の出力（前記高周波成分を除去した前記差分）に、式 1 におけるパラメータ（ $-J/T_s$ ）を乗算し、この乗算結果をゲイン演算部 34 へ出力するものである。

【0040】

ゲイン演算部 34 は、モデル予測制御部 MC に接続され、パラメータ演算部 33 の出力（パラメータ（ $-J/T_s$ ）を乗算した前記差分）に、負荷トルクのゲイン K を乗算し、この乗算結果をモデル予測制御部 MC へ出力するものである。

10

【0041】

このゲイン K は、回転速度予測値と回転速度現在値との間の差異に振動成分が生じて回転速度予測値が発散しないように、適切に設定されなければならない。このため、本実施形態では、例えば、負荷トルクを入力とし、速度予測部 13 の推定誤差を出力とする伝達関数が安定性を満足する範囲内に、前記所定の係数としてのゲイン K が、設定される。より具体的には、回転速度予測値と回転速度現在値とは、それぞれ、次式 3 および次式 4 に従う。ここで、 B は、電動機 M における回転体の摩擦係数であり、 $T_e(k)$ は、電動機 M における実際の出力トルクであり、 $T_l(k)$ は、電動機 M に働く実際の負荷トルクであり、上にハット（ $\hat{}$ ）付きの $T_e(k)$ は、電動機 M における実際の出力トルクの推定値であり、上にハット（ $\hat{}$ ）付きの $T_l(k)$ は、電動機 M に働く実際の負荷トルクの推定値であり、 $T_l(k)$ は、制御周期ごとに負荷トルク推定値をインクリメント（またはデクリメント）するための負荷トルク更新量、すなわち、 k 番目の制御で、 $(k-1)$ 番目の制御における負荷トルク推定値に積算される前記差分であり、次式 5 で表される。なお、上にハット（ $\hat{}$ ）付きの $(k|k-1)$ は、 $(k-1)$ 番目の制御（過去）で求められた k 番目の制御（現在）における回転速度予測値である。

20

【0042】

【数 3】

$$\text{式 3 ; } \omega(k+1) = \frac{J - T_s B}{J} \omega(k) + \frac{T_s}{J} (T_e(k) - T_l(k))$$

30

【0043】

【数 4】

$$\text{式 4 ; } \hat{\omega}(k+1) = \frac{J - T_s B}{J} \omega(k) + \frac{T_s}{J} (\hat{T}_e(k) - \hat{T}_l(k-1) + \Delta T_l(k))$$

【0044】

【数 5】

$$\text{式 5 ; } \Delta T_l(k) = -K \frac{J}{T_s} (\hat{\omega}(k|k-1) - \omega(k))$$

40

【0045】

式 5 から、現在の制御で求められる、過去に予測された現在の回転速度予測値と回転速度現在値との差分に基づき更新量を求めて制御周期ごとに積算することで、負荷トルクが、推定されている。

【0046】

これら式 1 ないし式 5 から、前記伝達関数 $H(z)$ は、次式 6 となる。

【0047】

【数 6】

$$\text{式 6 ; } H[z] = \frac{\Delta\omega}{T_l} = \frac{T_s a_0 z^3 + T_s (a_1 - a_0) z^2 + T_s (a_2 - a_1) z - T_s a_2}{J a_0 z^4 + J (k b_0 + a_1 - a_0) z^3 + J (k b_1 + a_2 - a_1) z^2 + J (k b_2 - a_2) z}$$

【 0 0 4 8 】

この式 6 から、ゲイン K が負荷トルクと回転速度推定誤差との間における応答特性に寄与していることが分かる。負荷トルクが加わった際に、式 5 に基づく更新量で負荷トルク推定値が更新されることによってモデル予測制御における回転速度推定誤差の推移が図 7 に示されている。ゲイン K の大きさによってステップ応答の過渡特性が異なっている。式 6 で表される伝達関数 $H(z)$ が安定となるためには、式 6 で表される伝達関数 $H(z)$ の全ての極 p_i で、その大きさが 1 以内となる必要がある。すなわち、 $p_i = c_i + d_i$ (式 6 では極数 $i = 1, 2, 3, 4$)、 $|c_i + j d_i| < 1$ である。ここで、 j は、虚数単位である ($j^2 = -1$)。このようなゲイン K は、ユーザによって予め求められて負荷トルク推定部 TE のゲイン演算部 34 に設定されて良く、あるいは、負荷トルク推定部 TE は、前記負荷トルクを入力とし、前記速度予測部の推定誤差を出力とする伝達関数が安定性を満足する範囲内に前記所定の係数を設定する係数設定部 (不図示) をさらに備え、後述のフローチャートに従って前記係数設定部によって求められても良い。

10

【 0 0 4 9 】

モデル予測制御部 MC は、モデル予測制御を用いたベクトル制御によって、電動機 M をインバータ回路 IV を介して駆動制御するものである。モデル予測制御部 MC は、より具体的には、例えば、図 2 に示すように、制御部 11 と、電圧パターン生成部 12 と、速度予測部 13 と、電圧パターン選択部 14 と、インバータ制御部 15 とを備える。

20

【 0 0 5 0 】

制御部 11 は、電動機駆動制御システム S の各部を当該各部の機能に応じて制御し、電動機駆動制御システム S 全体の制御を司るものである。

【 0 0 5 1 】

電圧パターン生成部 12 は、インバータ回路 IV で出力可能な時系列な電圧パターンを、互いに異なるように複数、生成するものである。すなわち、電圧パターン生成部 12 は、インバータ回路 IV で出力可能な時系列な電圧パターンを、互いに異なるように複数、生成する電圧パターン生成処理を実施する。インバータ回路 IV は、本実施形態では、上述のように、2 レベル 3 相インバータであるので、第 1 ないし第 6 スイッチング素子 $Tr_1 \sim Tr_6$ のスイッチング態様に応じて、図 5 に示すように、 $2^3 = 8$ 通りの電圧を出力できる。なお、電圧ベクトル V_0 は、第 1 ないし第 3 スイッチング素子 $Tr_1 \sim Tr_3$ がオフであって第 4 ないし第 6 スイッチング素子 $Tr_4 \sim Tr_6$ がオンであり、電動機 M に給電されない場合 ($V_0 = (0, 0, 0)$) である。電圧ベクトル V_7 は、第 1 ないし第 3 スイッチング素子 $Tr_1 \sim Tr_3$ がオンであって第 4 ないし第 6 スイッチング素子 $Tr_4 \sim Tr_6$ がオフであり、電動機 M に給電されない場合 ($V_7 = (0, 0, 0)$) である。時系列な電圧パターンは、予測する制御周期数である予測ホライズン、および、制御入力である電圧を可変とする制御周期数である制御ホライズンによって決定される。このため、モデル予測制御部 MC には、予め予測ホライズンの数値および制御ホライズンの数値が、モデル予測制御の仕様等に応じて適宜に予め設定され、電圧パターン生成部 12 は、インバータ回路 IV で出力可能な電圧 (上述では 8 通り)、予測ホライズンの数値および制御ホライズンの数値に応じて互いに異なる複数の時系列な電圧パターンを生成する。図 6 には、一例として、予測ホライズンが 2 であり、制御ホライズンが 1 である場合のインバータ回路 IV で出力可能な全ての時系列な電圧パターンが樹形図で図示されている。図 6 では、現在の N 番目の制御における電圧に対し、予測ホライズンが 2 であるので、次の (N + 1) 番目の制御における電圧と、さらに次の (N + 2) 番目の制御における電圧とが予測され、制御ホライズンが 1 であるので、インバータ回路 IV で出力可能な全ての時系列な電圧パターンは、現在の N 番目の制御における電圧から、次の (N + 1) 番目の制御では、8 通りの電圧 $V_0 \sim V_8$ に分岐し、さらに次の (N + 2) 番目の制御では、各電

30

40

50

圧 $V_0 \sim V_8$ から、それぞれ当該電圧 $V_0 \sim V_8$ に維持された 8 組の時系列な電圧パターンである。なお、他の一例として、予測ホライズンが 2 であり、制御ホライズンが 2 である場合、現在の N 番目の制御における電圧に対し、予測ホライズンが 2 であるので、次の $(N+1)$ 番目の制御における電圧と、さらに次の $(N+2)$ 番目の制御における電圧とが予測され、制御ホライズンが 2 であるので、インバータ回路 IV で出力可能な全ての時系列な電圧パターンは、 $(N+1)$ 番目の制御および $(N+2)$ 番目の制御それぞれで 8 通りの電圧 $V_0 \sim V_8$ に分岐し、64 組の時系列な電圧パターンである。

【0052】

速度予測部 13 は、電圧パターン生成部 12 で生成された複数の時系列な電圧パターンそれぞれについて、負荷トルク推定部 TE で推定された負荷トルクが電動機 M に働いている場合であって、当該時系列な電圧パターンが電動機 M に入力された場合における電動機 M の回転速度を回転速度予測値として予測するものである。すなわち、速度予測部 13 は、電圧パターン生成部 12 で生成された複数の時系列な電圧パターンそれぞれについて、負荷トルク推定部 TE で推定された負荷トルクが電動機 M に働いている場合であって、当該時系列な電圧パターンが電動機 M に入力された場合における電動機 M の回転速度を回転速度予測値として予測する速度予測処理を実施する。より具体的には、速度予測部 13 は、次式 7 によって d 軸電流 i_d を求め、次式 8 によって q 軸電流 i_q を求める。そして、速度予測部 13 は、次式 9 によって電動機 M の出力トルク T_e を求め、次式 10 によって回転速度予測値（上にハット（ \wedge ）付きの ω_m ）を求める。ここで、 $i_d(k)$ は、 k 番目の制御における d 軸電流であり、 $i_q(k)$ は、 k 番目の制御における q 軸電流であり、 L_d は、 d 軸インダクタンスであり、 L_q は、 q 軸インダクタンスである。なお、本実施形態では、電動機 M が永久磁石同期電動機であるので、 $L_d = L_q = L$ となる。 R は、電動機 M の巻線抵抗であり、 $\omega_e(k)$ は、 k 番目の制御における電動機 M の電気角速度であり、 $v_d(k)$ は、 k 番目の制御における d 軸電圧であり、 $v_q(k)$ は、 k 番目の制御における q 軸電圧であり、 ψ は、電動機 M における永久磁石の鎖交磁束であり、 D は、電動機 M における回転子の動摩擦抵抗である。

10

20

【0053】

【数 7】

$$\text{式 7 ; } i_d(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R}{L_d}\right) i_d(k) + \frac{T_s L_q}{L_d} \omega_e(k) i_q(k) + \frac{T_s}{L_d} v_d(k)$$

30

【0054】

【数 8】

$$\text{式 8 ; } i_q(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R}{L_q}\right) i_q(k) - \frac{T_s L_d}{L_q} \omega_e(k) i_d(k) - \frac{T_s \psi}{L_q} \omega_e(k) + \frac{T_s}{L_q} v_q(k)$$

【0055】

【数 9】

$$\text{式 9 ; } T_e(k+1) = \frac{3}{2} p(\psi i_q(k) + (L_d - L_q) i_d(k) i_q(k))$$

40

【0056】

【数 10】

$$\begin{aligned} \text{式 10 ; } \hat{\omega}(k+1) &= \frac{J - T_s D}{J} \hat{\omega}(k) + \frac{T_s}{J} (T_e(k) - \hat{T}_l(k)) \\ &= \frac{J - T_s D}{J} \hat{\omega}(k) + \frac{T_s}{J} (T_e(k) - (\hat{T}_l(k-1) + \Delta T_l(k))) \end{aligned}$$

50

【0057】

上述の例では、予測ホライズンが2であるので、速度予測部13は、8組の時系列な電圧パターンそれぞれについて、現在のk番目の制御に対し、2制御周期先までの、dq軸での電流予測値 $[i_{dq}(k+1), i_{dq}(k+2)]$ および回転速度予測値 $[\hat{\omega}(k+1), \hat{\omega}(k+2)]$ を求める。なお、電流ベクトル $i_{dq}(k)$ は、 $[i_d(k), i_q(k)]^T$ である($i_{dq}(k) = [i_d(k), i_q(k)]^T$)。

【0058】

電圧パターン選択部14は、電圧パターン生成部12で生成された複数の時系列な電圧パターンの中から、速度予測部13で予測された電動機Mの各回転速度予測値の中で最も高い評価の回転速度予測値に対応する時系列な電圧パターンを選択するものである。すなわち、電圧パターン選択部14は、電圧パターン生成部12で生成された複数の時系列な電圧パターンの中から、速度予測部13で予測された電動機Mの各回転速度予測値の中で最も高い評価の回転速度予測値に対応する時系列な電圧パターンを選択する電圧パターン選択処理を実施する。より具体的には、電圧パターン選択部14は、電圧パターン生成部12で生成された複数の時系列な電圧パターンそれぞれについて、速度予測部13で予測された電動機Mの電流予測値および回転速度予測値を、例えば次式11の評価式gに用いることによって、前記時系列な電圧パターン定量的に評価し、前記複数の時系列な電圧パターンの中から、最も高い評価の電流予測値および回転速度予測値に対応する時系列な電圧パターンを選択する。式11の評価式gでは、評価値が小さいほど、評価が高い。したがって、前記複数の時系列な電圧パターンの中から、最も小さい評価値を与える電流予測値および回転速度予測値に対応する時系列な電圧パターンが最適な時系列な電圧パターンとして選択される。なお、モデル予測制御部MCには、外部から制御目標の回転速度 ω_m^* が入力され、設定される。

10

20

【0059】

【数11】

$$\text{式 11 ; } g = a \sum_{i=1}^{N_p} g_s(k+i) + b \sum_{i=1}^{N_p} g_c(k+i)$$

30

$$\text{式 11a ; } g_s(k) = (\omega_m^*(k) - \hat{\omega}(k))^2$$

$$\text{式 11b ; } g_c(k) = (0.0 - i_d(k))^2$$

【0060】

上記式11の評価式gは、速度制御の上で重要となることから、速度偏差を第1項とし、永久磁石同期電動機の場合、無駄な給電を防止するために、トルクの発生に寄与しないd軸電流 i_d を0に保持することが重要であることから、電流偏差を第2項とし、これら第1項および第2項を係数a、bで線形結合することで構成されている。したがって、第1項と第2項とにおける相対的な重要度に応じて係数a、bが予め適宜に決定される。言い換えれば、係数a、bで第1項と第2項とにおける相対的な重要度が調整できる。すなわち、電動機Mの制御で、速度偏差が電流偏差より相対的に重要である場合には、評価式g中の第1項と係数aを乗じた値が、第2項と係数bを乗じた値よりも十分大きい値となるよう係数a、係数bを設定し、逆に、電動機Mの制御で、電流偏差が速度偏差より相対的に重要である場合には、評価式g中の第2項と係数bを乗じた値が、第1項と係数aを乗じた値よりも十分大きい値となるよう係数a、係数bを設定する。

40

【0061】

インバータ制御部15は、電圧パターン選択部14で選択された時系列な電圧パターン

50

に基づいて、インバータ回路 I V を制御するものである。すなわち、インバータ制御部 1 5 は、電圧パターン選択部 1 4 で選択された時系列な電圧パターンに基づいて、インバータ回路 I V を制御するインバータ制御処理を実施する。より具体的には、インバータ制御部 1 5 は、現在、k 番目の制御である場合に、電圧パターン選択部 1 4 で選択された時系列な電圧パターンにおける次の (k + 1) 番目の制御での電圧を目標電圧として、この目標電圧に対応する目標の U 相電流、V 相電流および W 相電流をインバータ回路 I V から出力するように、インバータ回路 I V における第 1 ないし第 6 スイッチング素子 T r 1 ~ T r 6 の各制御端子へ制御信号を出力する。

【 0 0 6 2 】

そして、制御部 1 1 は、前記速度出力処理、前記負荷トルク推定処理、前記電圧パターン生成処理、前記速度予測処理、前記電圧パターン選択処理およびインバータ制御処理を、回転速度処理部 R S C、負荷トルク推定部 T E、電圧パターン生成部 1 2、速度予測部 1 3、電圧パターン選択部 1 4 およびインバータ制御部 1 5 に、所定の制御周期で繰り返し実施させる。

10

【 0 0 6 3 】

このようなモデル予測制御部 M C、3 相 2 相変換部 C V、負荷トルク推定部 T E および回転速度処理部 R S C は、C P U (C e n t r a l P r o c e s s i n g U n i t)、メモリおよびその周辺回路を備えて構成されるマイクロプロセッサで構成可能であり、モデル予測制御部 M C における制御部 1 1、電圧パターン生成部 1 2、速度予測部 1 3、電圧パターン選択部 1 4 およびインバータ制御部、3 相 2 相変換部 C V、負荷トルク推定部 T E における減算部 3 1、ローパスフィルタ部 3 2、パラメータ演算部 3 3 およびゲイン演算部 3 4、ならびに、回転速度処理部 R S C は、所定のプログラムの実行により、前記 C P U に機能的に構成される。

20

【 0 0 6 4 】

本実施形態では、回転角度測定部 V S および回転速度処理部 R S C が、電動機の回転速度を回転速度現在値として求める速度出力部の一例に相当し、モデル予測制御部 M C、電流測定部 C S、回転角度測定部 V S、3 相 2 相変換部 C V、負荷トルク推定部 T E および回転速度処理部 R S C が、インバータ回路の出力で駆動される電動機を制御する電動機駆動制御部の一例に相当する。

【 0 0 6 5 】

次に、本実施形態の動作について説明する。図 8 は、前記電動機駆動制御システムにおける動作を示すフローチャートである。図 9 は、負荷トルクの更新量を調整するためのゲインを求めるためのフローチャートである。図 1 0 は、速度制御のシミュレーション結果を示す図である。

30

【 0 0 6 6 】

まず、負荷トルクのゲイン K の設定について説明する。この負荷トルクのゲイン K の設定では、図 9 において、前記ゲイン K が適当な値に初期設定される (S 3 1)。次に、式 6 の伝達関数 H (z) における極 p_i が求められる (S 3 2、上述の例では、 $i = 1、2、3、4$)。次に、全ての極 p_i で、その大きさが 1 以内であるか否かが判定される (S 3 3)。

40

【 0 0 6 7 】

この判定の結果、全ての極 p_i で、その大きさが 1 以内である場合 (Y e s) には、次に、処理 S 3 4 が実施され、少なくとも 1 つの極 p_i で、その大きさが 1 以内ではない場合 (N o) には、次に、処理 S 3 6 が実施される。

【 0 0 6 8 】

この処理 S 3 6 では、前記ゲイン K が、予め設定された所定値 K_1 だけ減算され ($K - K_1$)、処理が処理 S 3 2 に戻される。

【 0 0 6 9 】

一方、前記処理 S 3 4 では、式 6 の伝達関数 H (z) におけるステップ応答の収束時間が、予め設定された所定値 T c o 以内か否かが判定される。前記所定値 T c o は、当該電

50

動機駆動制御システム S の仕様で許容される応答時間等に応じて適宜に設定される。

【 0 0 7 0 】

この判定の結果、前記収束時間が前記所定値 T_{co} 以内である (Yes) には、次に、処理 S 3 5 が実施され、前記収束時間が前記所定値 T_{co} 以内ではない (No) には、次に、処理 S 3 7 が実施される。

【 0 0 7 1 】

この処理 S 3 7 では、前記ゲイン K が、予め設定された所定値 K_2 だけ加算され ($K + K_2$)、処理が処理 S 3 2 に戻される。なお、前記所定値 K_1 と前記所定値 K_2 とは、同値でも異値でも良い。

【 0 0 7 2 】

一方、前記処理 S 3 5 では、式 6 の伝達関数 $H(z)$ におけるステップ応答のオーバーシュート量 (減衰振動におけるオーバーシュートの最大振幅幅) およびアンダーシュート量 (前記減衰振動におけるアンダーシュートの最大振幅幅) が、予め設定された所定値 O_U 以内か否かが判定される。前記所定値 O_U は、当該電動機駆動制御システム S の仕様で許容される減衰振動幅等に応じて適宜に設定される。

【 0 0 7 3 】

この判定の結果、前記オーバーシュート量およびアンダーシュート量が前記所定値 O_U 以内である (Yes) には、このときの値で前記ゲイン K が決定され、処理が終了され、前記オーバーシュート量およびアンダーシュート量が前記所定値 O_U 以内ではない (No) には、次に、処理 S 3 6 が実施された後に、処理が処理 S 3 2 に戻される。

【 0 0 7 4 】

このような負荷トルクの更新量を調整するためのゲイン K の設定処理は、例えばユーザーによって実施され、電動機駆動制御システム S に設定されて良く、あるいは、前記 CPU に機能的に構成される前記係数設定部 (不図示) によって自動的に実行され、電動機駆動制御システム S に設定されて良い。

【 0 0 7 5 】

次に、モデル予測制御による電動機駆動制御システム S の動作について説明する。このような電動機駆動制御システム S では、電源が投入されると、必要な各部の初期化を実行し、その稼働を始める。そして、例えば、プログラムの実行によって、前記 CPU には、モデル予測制御部 MC、3 相 2 相変換部 CV、負荷トルク推定部 TE および回転速度処理部 RSC が機能的に構成され、モデル予測制御部 MC には、制御部 1 1、電圧パターン生成部 1 2、速度予測部 1 3、電圧パターン選択部 1 4 およびインバータ制御部 1 5 が機能的に構成され、負荷トルク推定部 TE には、減算部 3 1、ローパスフィルタ部 3 2、パラメータ演算部 3 3 およびゲイン演算部 3 4 が機能的に構成される。

【 0 0 7 6 】

そして、図 8 に示す処理 S 1 1 ないし処理 S 1 7 の各処理が、電動機 M の駆動が停止されるまで、制御部 1 1 によって所定の制御周期ごとに繰り返し実行される。

【 0 0 7 7 】

図 8 において、まず、今回 (k 番目) において、電流測定部 CS によって測定された各相の電流値が取得され、回転角度測定部 VS によって測定された回転角度の値が取得される (S 1 1)。電流測定部 CS は、この取得した各相の電流値を、3 相 2 相変換部 CV へ出力し、回転角度測定部 VS は、この取得した回転角度値を、3 相 2 相変換部 CV および回転速度処理部 RSC それぞれへ出力する。

【 0 0 7 8 】

続いて、3 相 2 相変換部 CV は、処理 S 1 1 で取得された各相の電流値および回転角度値から、 d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q を求め、この求めた d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q をモデル予測制御部 MC へ出力し、回転速度処理部 RSC は、処理 S 1 1 で取得された各相の電流値および回転角度値から、回転速度 ω_m を求め、この求めた回転速度 ω_m を、回転速度現在値 $\omega_m (= \omega_m(k))$ としてモデル予測制御部 MC および負荷トルク推定部 TE それぞれへ出力する (S 1 2、速度出力処理)。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 9 】

続いて、負荷トルク推定部 T E は、モデル予測制御部 M C の速度予測部 1 3 で過去に予測された現在の回転速度予測値（上にハット付きの $\omega_m =$ 上にハット付きの (k) ）に基づいて負荷トルクを推定する（S 1 3、負荷トルク推定処理）。本実施形態では、負荷トルク推定部 T E は、減算部 3 1 によって、制御周期の 1 つ前に処理 S 1 5 で求められた現在の回転速度予測値（上にハット付きの (k) ）と処理 S 1 2 で回転速度処理部 R S C によって求められた現在の回転速度現在値 (k) との差分を求め、この求めた差分を、ローパスフィルタ部 3 2 でフィルタリング（濾波）し、このフィルタリングした前記差分に、パラメータ演算部 3 3 によって、パラメータ $(-J/T_s)$ を乗算し、このパラメータ $(-J/T_s)$ を乗算した前記差分、上述のように設定された負荷トルクの更新量を調整するためのゲイン K を乗算し、この乗算結果をモデル予測制御部 M C へ出力する。

10

【 0 0 8 0 】

続いて、モデル予測制御部 M C は、電圧パターン生成部 1 2 によって、予め設定された予測ホライズンの値および制御ホライズンの値に応じて、インバータ回路 I V で出力可能な時系列な電圧パターンを、互いに異なるように複数、生成する（S 1 4、電圧パターン生成処理）。

【 0 0 8 1 】

続いて、モデル予測制御部 M C は、速度予測部 1 3 によって、電圧パターン生成部 1 2 で生成された複数の時系列な電圧パターンそれぞれについて、負荷トルク推定部 T E で推定された負荷トルクが電動機 M に働いている場合であって、当該時系列な電圧パターンが電動機 M に入力された場合における電動機 M の回転速度を回転速度予測値として予測する（S 1 5、速度予測処理）。より具体的には、速度予測部 1 3 は、次式 7 によって d 軸電流 i_d を求め、次式 8 によって q 軸電流 i_q を求め、次式 9 によって電動機 M の出力トルク T_e を求め、次式 1 0 によって回転速度予測値（上にハット付きの ω_m ）を求める。上述の例では、速度予測部 1 3 は、8 組の時系列な電圧パターンそれぞれについて、現在の k 番目の制御に対し、2 制御周期先までの、d q 軸での電流予測値 $[i_{dq}(k+1), i_{dq}(k+2)]$ および回転速度予測値 $[$ 上にハット (^) 付きの $(k+1)$ 、上にハット (^) 付きの $(k+2)$] を求める。

20

【 0 0 8 2 】

続いて、モデル予測制御部 M C は、電圧パターン選択部 1 4 によって、式 1 1 の評価式 g を用いることで、電圧パターン生成部 1 2 で生成された複数の時系列な電圧パターンの中から、処理 S 1 5 で速度予測部 1 3 によって予測された電動機 M の各回転速度予測値の中で最も高い評価の回転速度予測値に対応する時系列な電圧パターンを選択する（S 1 6、電圧パターン選択処理）。

30

【 0 0 8 3 】

続いて、モデル予測制御部 M C は、インバータ制御部 1 5 によって、インバータ回路 I V における第 1 ないし第 6 スイッチング素子 $T_{r1} \sim T_{r6}$ の各制御端子へ制御信号を出力することで、電圧パターン選択部 1 4 で選択された時系列な電圧パターンに基づいて、インバータ回路 I V を制御して電動機 M を駆動する（S 1 7、インバータ制御処理）。

40

【 0 0 8 4 】

このように電動機 M が、目標速度 ω_m^* となるように、モデル予測制御で制御され、駆動される。

【 0 0 8 5 】

シミュレーション（数値実験）によって、本実施形態における電動機駆動制御システム S、電動機駆動制御装置およびこれに実装された電動機駆動制御方法の効果が検証された。その一実施例の速度制御のシミュレーション結果がその比較例と共に図 1 0 に示されている。図 1 0 A は、本実施形態における電動機駆動制御システム S による速度制御のシミュレーション結果を示し、図 1 0 B は、比較例による速度制御のシミュレーション結果を示す。図 1 0 A および図 1 0 B における各横軸は、経過時間であり、それら各縦軸は、回転速度である。

50

【 0 0 8 6 】

比較例では、負荷トルクは、推定されず、負荷トルクの項は0とした。比較例では、図10Bに示すように、負荷トルクが印加されると、回転速度は、目標速度より低下してしまうが、本実施形態では、図10Aに示すように、負荷トルクが印加されても、回転速度は、略目標速度となっている。したがって、本実施形態では、負荷トルクが適切に推定されており、回転速度を予測する式10に用いることで、回転速度予測値がより精度高く予測できている。この結果、本実施形態では、適切な時系列な電圧パターンが選択でき、回転速度が目標速度の追従できている。

【 0 0 8 7 】

以上説明したように、本実施形態における電動機駆動制御システムS、電動機駆動制御装置およびこれに実装された電動機駆動制御方法は、負荷トルクの推定に、過去に予測された現在の回転速度予測値を用いるので、従来のカルマンフィルタを用いる場合に較べてより少ない情報処理量で負荷トルクを推定でき、負荷トルクが働く使用条件でも、モデル予測制御で電動機を駆動制御できる。このため、演算処理能力の比較的低い、安価な演算処理装置でモデル予測制御を実現する場合でも、上記電動機駆動制御システムS、電動機駆動制御装置および電動機駆動制御方法は、略リアルタイムで電動機を駆動制御できる。

10

【 0 0 8 8 】

上記電動機駆動制御システムS、電動機駆動制御装置および電動機駆動制御方法は、速度予測部13で過去に予測された現在の回転速度予測値と回転速度現在値との差分に、所定の係数を乗じた差分乗算値を、制御周期ごとに積算することで負荷トルクを推定するので、簡便に、より少ない情報処理量で負荷トルクを推定でき、モデル予測制御で電動機Mを駆動制御できる。

20

【 0 0 8 9 】

上記電動機駆動制御システムS、電動機駆動制御装置および電動機駆動制御方法は、図9を用いて説明したように、制御系が安定するように負荷トルクの更新量を調整するためのゲインKを適切に設定できる。このため、不適切な前記ゲインKによって駆動の際に生じる発振や不安定化が事前に回避できる。

【 0 0 9 0 】

なお、上述の実施形態では、電圧パターン選択部14は、例えば式11に示すように、制御目標の回転速度 ω_m^* を含む評価関数の評価式gを用いることによって前記評価を行い、モデル予測制御部MCには、制御目標の回転速度 ω_m^* が外部から入力され設定されたが、これに限定されるものではなく、例えば、電動機駆動制御システムSおよび電動機駆動制御装置は、現在以前の実績値に基づいて将来の制御目標の回転速度を予測する制御目標予測部をさらに備えても良い。このような制御目標予測部16は、例えば、図2に破線で示すように、モデル予測制御部MCにさらに備えられ、例えば前記CPUに機能的に構成される。制御目標の回転速度 ω_m^* が、例えば固定値(一定値)であったり、例えば操作スイッチでオペレータによって指示入力された所定値であったりする場合、上述の実施形態でも対処可能であるが、制御目標の回転速度 ω_m^* が、変化するようにオペレータによって指示入力された可変値である場合、制御目標の回転速度 ω_m^* の変化を検知してからこれに対応することになるので、応答遅れが生じる虞がある。このような電動機駆動制御システムSおよび電動機駆動制御装置は、前記制御目標予測部をさらに備えるので、制御目標の回転速度が変化する場合でも、前記応答遅れを低減でき、より適切に制御できる。

30

40

【 0 0 9 1 】

この制御目標予測部16は、例えば、現在以前の実績値における変化量に基づいて将来の制御目標の回転速度を予測するものである(第1変形形態)。

【 0 0 9 2 】

図11は、前記電動機駆動制御システムの第1変形形態を説明するための図である。図11の横軸は、前記所定の制御周期で繰り返し制御される制御回数を示し、k番目が現在の制御回数である。図11の縦軸は、制御目標の回転速度 ω_m^* である。黒丸()は、

50

現在以前の実績値である制御目標の回転速度 ω_m^* を示し（ここでは k 番目および $(k - 1)$ 番目の各制御における制御目標の各回転速度 $\omega_m^*(k)$ 、 $\omega_m^*(k - 1)$ ）、白丸（○）は、将来における制御目標の各回転速度 ω_m^* を示す（ここでは $(k + 1)$ 番目および $(k + 2)$ 番目の各制御における制御目標の各回転速度 $\omega_m^*(k + 1)$ 、 $\omega_m^*(k + 2)$ ）。

【0093】

この制御目標予測部 16 では、現在以前の実績値である制御目標の回転速度 $\omega_m^*(k)$ 、 $\omega_m^*(k - 1)$ 、・・・は、将来の制御目標の回転速度 ω_m^* を演算するために必要なデータ分だけ少なくとも記憶される。そして、制御目標予測部 16 は、現在以前の実績値である制御目標の回転速度 $\omega_m^*(k)$ 、 $\omega_m^*(k - 1)$ 、・・・から、1 制御回数当たりの、制御目標の回転速度 ω_m^* における変化量を求め、この求めた変化量だけ制御目標の回転速度 ω_m^* を変化させることで、将来における制御目標の各回転速度 ω_m^* を求める。より具体的には、例えば、図 11 に示すように、現在以前の実績値における変化量は、一定値であり、将来もこの一定値で、将来における制御目標の各回転速度 ω_m^* も変化する場合、制御目標予測部 16 は、次式 12 によって将来における制御目標の各回転速度 ω_m^* を求める。

10

【0094】

【数 12】

$$\text{式 12 ; } \omega_m^*(k+i) = \omega_m^*(k) + iT_s \left(\frac{\omega_m^*(k) - \omega_m^*(k-1)}{T_s} \right)$$

20

【0095】

電圧パターン選択部 14 は、上述のように式 11 の評価式 g を用いて評価する場合、前記式 12 で求めた ω_m^* を用いる。

【0096】

あるいは、例えば、制御目標予測部 16 は、現在以前の実績値を外挿することによって将来の制御目標の回転速度を予測するものである（第 2 変形形態）。より具体的には、制御目標予測部 16 は、例えば、次式 13 で示すラグランジュ外挿を用いることによって、将来における制御目標の各回転速度 ω_m^* を求める。

30

【0097】

【数 13】

$$\text{式 13 ; } \omega_m^*(k+i) = \sum_{m=0}^N (-1)^{N-m} \frac{(N+1)!}{m!(N-m+1)!} \omega_m^*(k+i+m-N)$$

【0098】

ここで、 N は、次数を示す。例えば、次数が 2 であり、2 制御周期先まで予測する場合、前記式 13 を用いることによって、次式 14-1、14-2 のように、 $(k + 1)$ 番目および $(k + 2)$ 番目における制御目標の各回転速度 $\omega_m^*(k + 1)$ 、 $\omega_m^*(k + 2)$ が求められる。なお、次数 N は、2 に限定されるものではなく、前記 CPU の演算能力に応じて適宜に設定されてよい。

40

【0099】

【数 14】

$$\text{式 14-1 ; } \omega_m^*(k+1) = 3\omega_m^*(k) - 3\omega_m^*(k-1) + \omega_m^*(k-2)$$

$$\text{式 14-2 ; } \omega_m^*(k+2) = 6\omega_m^*(k) - 8\omega_m^*(k-1) + 3\omega_m^*(k-2)$$

【0100】

50

電圧パターン選択部 14 は、上述のように式 11 の評価式 g を用いて評価する場合、前記式 13 で求めた m^* を用いる。

【0101】

本発明を表現するために、上述において図面を参照しながら実施形態を通して本発明を適切且つ十分に説明したが、当業者であれば上述の実施形態を変更および/または改良することは容易に為し得ることであると認識すべきである。したがって、当業者が実施する変更形態または改良形態が、請求の範囲に記載された請求項の権利範囲を離脱するレベルのものでない限り、当該変更形態または当該改良形態は、当該請求項の権利範囲に包括されると解釈される。

【符号の説明】

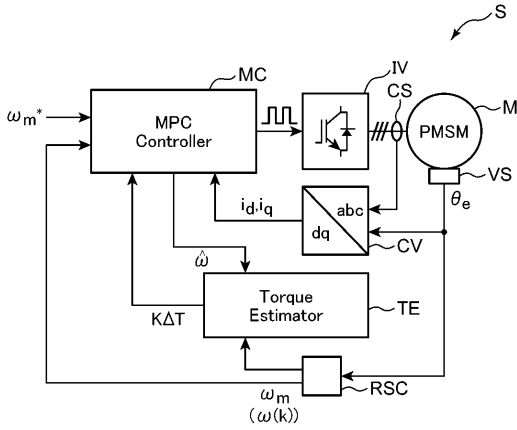
【0102】

S 電動機駆動制御システム
M 電動機
IV インバータ回路
MC モデル予測制御部
CS 電流測定部
VS 回転角度測定部
CV 3相2相変換部
TE 負荷トルク推定部
RSC 回転速度処理部
11 制御部
12 電圧パターン生成部
13 速度予測部
14 電圧パターン選択部
15 インバータ制御部
31 減算部
32 ローパスフィルタ部
33 パラメータ演算部
34 ゲイン演算部

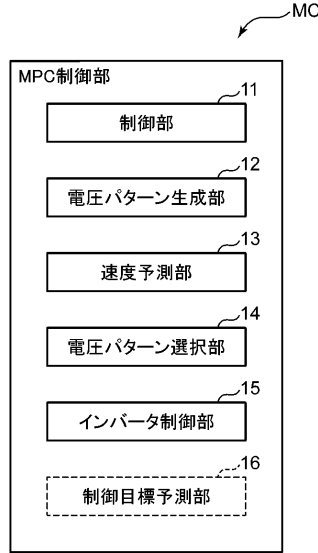
10

20

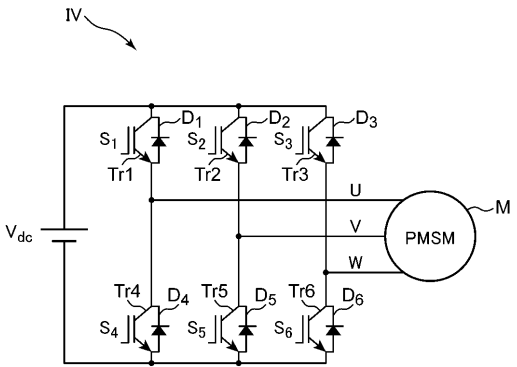
【図1】



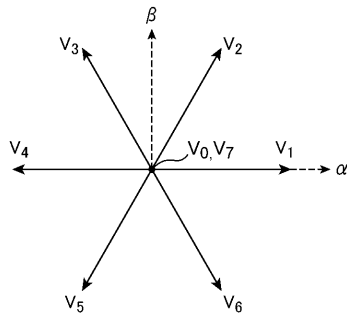
【図2】



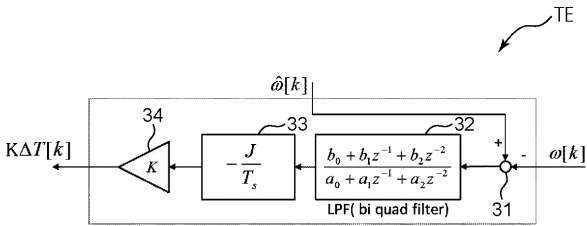
【図3】



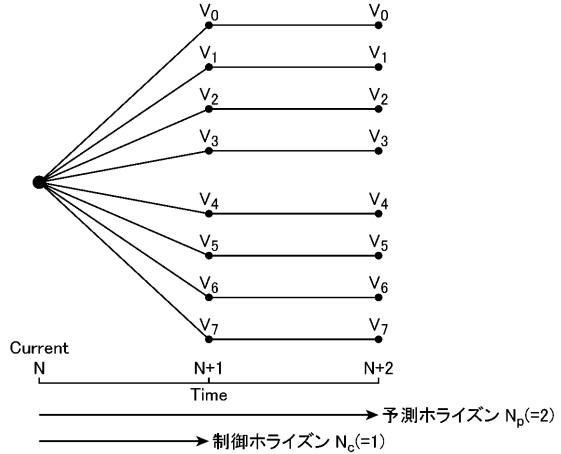
【図5】



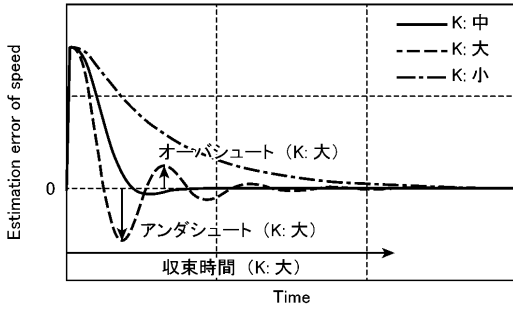
【図4】



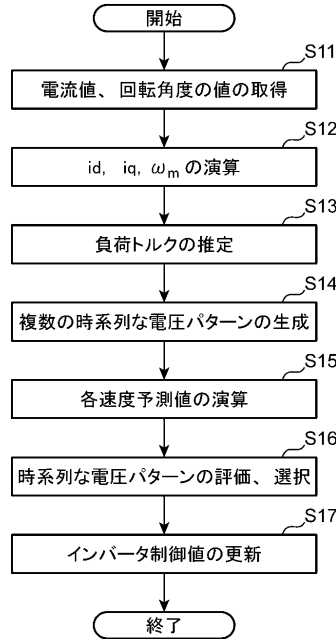
【図6】



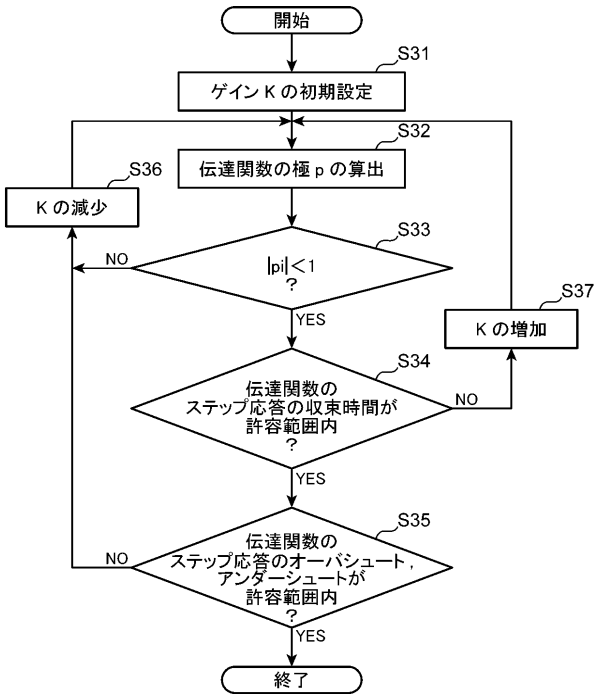
【 図 7 】



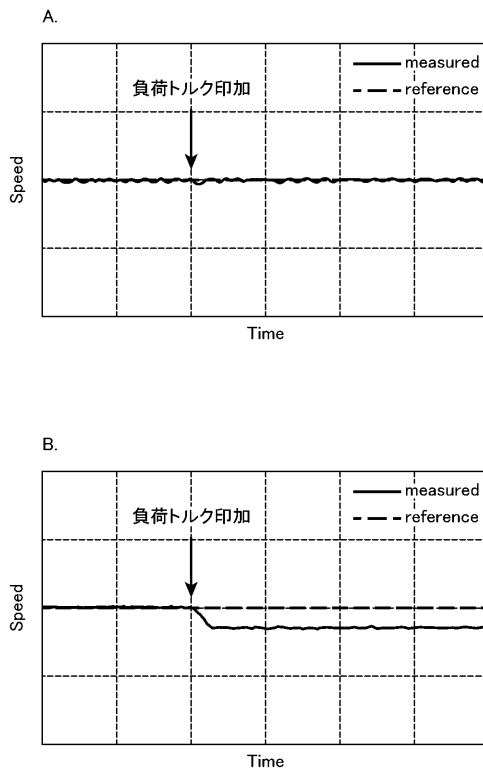
【 図 8 】

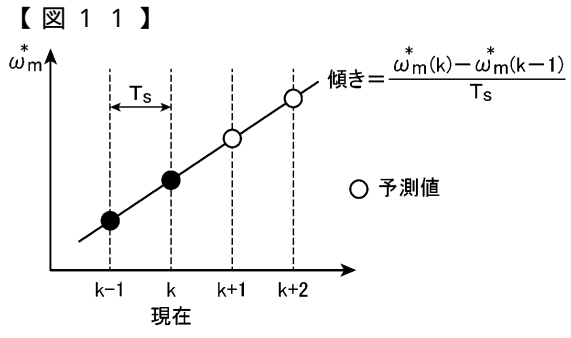


【 図 9 】



【 図 10 】





フロントページの続き

Fターム(参考) 5H505 BB09 DD08 EE41 EE53 GG02 GG04 HA10 HA16 JJ03 JJ04
JJ22 JJ23 JJ26 LL07 LL22 LL41