

(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2012-228063

(P2012-228063A)

(43) 公開日 平成24年11月15日(2012.11.15)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
H02P 6/10 (2006.01)	H02P 6/02 351G	3D232
B62D 6/00 (2006.01)	B62D 6/00	3D233
B62D 5/04 (2006.01)	B62D 5/04	5H560
B62D 101/00 (2006.01)	B62D 101:00	
B62D 113/00 (2006.01)	B62D 113:00	

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 23 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2011-93228 (P2011-93228)
 (22) 出願日 平成23年4月19日 (2011.4.19)

(71) 出願人 000001247
 株式会社ジェイテクト
 大阪府大阪市中央区南船場3丁目5番8号
 (74) 代理人 100068755
 弁理士 恩田 博宣
 (74) 代理人 100105957
 弁理士 恩田 誠
 (72) 発明者 並河 勲
 大阪府大阪市中央区南船場3丁目5番8号
 株式会社ジェイテクト内
 (72) 発明者 玉泉 晴天
 大阪府大阪市中央区南船場3丁目5番8号
 株式会社ジェイテクト内

最終頁に続く

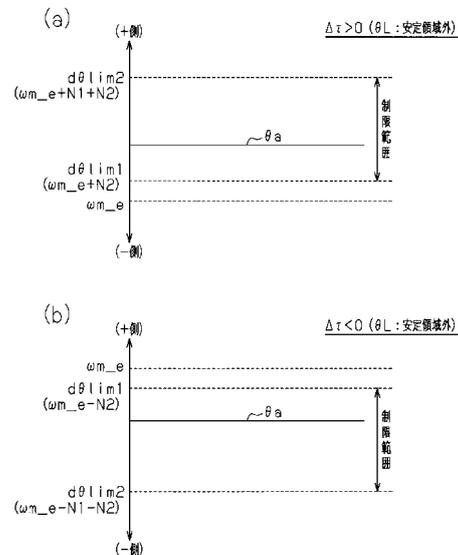
(54) 【発明の名称】 モータ制御装置及び電動パワーステアリング装置

(57) 【要約】

【課題】トルク変動の発生を抑えつつ、加算角に含まれるモータ回転角速度の推定誤差を補正して、安定的にレゾルバレス制御を実行することのできるモータ制御装置を提供すること。

【解決手段】加算角調整演算部は、トルク偏差に基づき第1変化成分が演算される方向に応じて、推定モータ回転角速度 (ω_{m_e}) に対応する第1の閾値 d_lim1 、及び当該第1の閾値 d_lim1 よりも推定モータ回転角速度 (ω_{m_e}) から離れた値を有した第2の閾値 d_lim2 を設定する。そして、これら二つの閾値 (d_lim1 , d_lim2) により規定される制限範囲内に加算角 a を制限する。更に、加算角調整演算部は、制御角と実回転角との乖離を示す負荷角を推定する。そして、その負荷角が安定領域外にある場合には、上記第1の閾値 d_lim1 を、推定モータ回転角速度 (ω_{m_e}) から、その想定される推定誤差の最大値に対応する所定値 $N2$ 離れた値に変更する。

【選択図】 図12



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

モータ制御信号を出力するモータ制御信号出力手段と、前記モータ制御信号に基づいて三相の駆動電力をモータに供給する駆動回路とを備え、前記モータ制御信号出力手段は、前記モータが発生すべき目標トルクと実トルクとの間のトルク偏差に基づいてトルクフィードバック制御を実行することにより得られる第 1 変化成分及び推定モータ回転角速度に基づく第 2 変化成分の加算値を演算周期毎のモータ回転角変化量に相当する加算角とし、該加算角を積算することにより得られる制御上のモータ回転角に従う回転座標系において電流フィードバック制御を実行することにより、前記モータ制御信号を出力するモータ制御装置において、

10

前記モータ制御信号出力手段は、前記トルク偏差に基づき前記第 1 変化成分が演算される方向に応じて、前記推定モータ回転角速度に対応する第 1 の閾値と該第 1 の閾値よりも前記推定モータ回転角速度から離れた値を有した第 2 の閾値とを設定し、これら第 1 及び第 2 の閾値により規定される制限範囲内に前記加算角を制限するとともに、

前記制御上のモータ回転角と実回転角との乖離を示す負荷角を推定し、該負荷角が安定領域を超えて拡大した場合には、前記制限範囲の設定方向において、前記第 1 の閾値を前記負荷角が前記安定領域にある場合よりも前記推定モータ回転角速度から離れた値に変更すること、を特徴とするモータ制御装置。

【請求項 2】

請求項 1 に記載のモータ制御装置を備えた電動パワーステアリング装置。

20

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、モータ制御装置及び電動パワーステアリング装置に関するものである。

【背景技術】**【0002】**

従来、モータを駆動源として操舵系にアシスト力を付与する電動パワーステアリング装置 (EPS) には、そのモータ回転角を検出することなくブラシレスモータを制御可能なモータ制御装置を備えたものがある。そして、このような回転角センサ (モータレゾルバ) を用いないセンサレス (レゾルバレス) 駆動制御の態様として、演算周期毎のモータ回転角変化量に相当する加算角を演算し、その加算角を積算することにより得られる制御上のモータ回転角に従う回転座標系において電流フィードバック制御を実行する方法が提案されている。

30

【0003】

例えば、特許文献 1 に記載のモータ制御装置は、モータが発生すべき目標トルクと実トルクとの間の偏差に基づいて、上記演算周期毎のモータ回転角変化量に相当した加算角を演算する。また、特許文献 2 に記載のモータ制御装置は、モータ電流及びモータ電圧に基づいてモータ回転角速度を推定する。そして、そのモータ回転角速度を上記演算周期毎の変化成分として上記加算角を演算することができる。

【0004】

40

即ち、実際のモータ回転角 (実回転角) と上記制御上のモータ回転角 (制御角) とが厳密に一致しなくとも、その乖離が一定範囲内に留まる限りにおいて、ブラシレスモータは制御可能である。そして、上記の各方法により加算角を演算し、その加算角を積算することにより得られる制御角を用いて電流フィードバック制御を実行することにより、その実回転角と制御角との乖離を上記モータ制御可能な範囲に留めおくことができる。

【先行技術文献】**【特許文献】****【0005】**

【特許文献 1】特開 2010 - 11709 号公報

【特許文献 2】特開 2010 - 29031 号公報

50

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ところで、モータ回転角速度を推定する場合、比較的高精度にその値を推定可能な高速回転領域であっても、その推定値には、モータの個体差（公差等の影響等、主に物理構成に起因するもの）に応じた誤差が含まれる。そして、推定モータ回転角速度に基づいて加算角を演算する構成では、モータ制御が不安定化しやすい状態にある場合、その加算角に含まれる推定誤差が、より一層の不安定化を助長するおそれがある。このため、そのモータ制御の安定性を確保する観点から、こうした推定誤差は補正することが望ましい。

【0007】

しかしながら、各モータの個体差を考慮して、その想定される最大誤差により加算角を補正するとすれば、多くの場合、その補正は過剰なものとなる。そして、これにより生ずる新たな誤差がトルク変動の発生要因となるおそれがあり、この点において、なお改善の余地を残すものとなっていた。

【0008】

本発明は、上記問題点を解決するためになされたものであって、その目的は、トルク変動の発生を抑えつつ、加算角に含まれるモータ回転角速度の推定誤差を補正して、安定的にレゾルバレス制御を実行することのできるモータ制御装置及び電動パワーステアリング装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記問題点を解決するために、請求項1に記載の発明は、モータ制御信号を出力するモータ制御信号出力手段と、前記モータ制御信号に基づいて三相の駆動電力をモータに供給する駆動回路とを備え、前記モータ制御信号出力手段は、前記モータが発生すべき目標トルクと実トルクとの間のトルク偏差に基づいてトルクフィードバック制御を実行することにより得られる第1変化成分及び推定モータ回転角速度に基づく第2変化成分の加算値を演算周期毎のモータ回転角変化量に相当する加算角とし、該加算角を積算することにより得られる制御上のモータ回転角に従う回転座標系において電流フィードバック制御を実行することにより、前記モータ制御信号を出力するモータ制御装置において、前記モータ制御信号出力手段は、前記トルク偏差に基づき前記第1変化成分が演算される方向に応じて、前記推定モータ回転角速度に対応する第1の閾値と該第1の閾値よりも前記推定モータ回転角速度から離れた値を有した第2の閾値とを設定し、これら第1及び第2の閾値により規定される制限範囲内に前記加算角を制限するとともに、前記制御上のモータ回転角と実回転角との乖離を示す負荷角を推定し、該負荷角が安定領域を超えて拡大した場合には、前記制限範囲の設定方向において、前記第1の閾値を前記負荷角が前記安定領域にある場合よりも前記推定モータ回転角速度から離れた値に変更すること、を要旨とする。

【0010】

即ち、拡大しようとする負荷角を縮小させるようなトルク偏差に基づく第1変化成分が演算される状況では、加算角制限における制限範囲の設定方向もまた、その第1変化成分が演算される方向と同じく、推定モータ回転角速度の発生方向とは逆向きになる。そして、推定モータ回転角速度を制限範囲における第1の閾値とした場合、例えば、応答遅れ等により上記トルク偏差に基づく第1変化成分が「0」となる最悪条件では、加算角に含まれる推定モータ回転角速度の推定誤差分だけ、負荷角の拡大が進むことになる。

【0011】

しかしながら、上記構成によれば、負荷角が安定領域を超えて拡大した場合には、その制限範囲を規定する第1の閾値の値が、当該制限範囲の設定方向において、負荷角が安定領域にある場合よりも推定モータ回転角速度から離れた値に変更される。そして、これにより、そのモータ回転角速度の推定誤差による負荷角の拡大を抑えることができ、特に、その想定される推定誤差の最大値に対応して第1の閾値を変更することで、少なくとも負荷角が縮小する方向に、その誤差を補正することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 2 】

つまり、モータ制御の状態が安定的に維持された状況では、その加算角に含まれるモータ回転角速度の推定誤差を許容することで、当該推定誤差の補正により生ずるトルク変動が回避される。そして、負荷角が安定領域を超えて拡大した場合には、その推定誤差を補正することにより、当該負荷角の拡大によるモータ制御の不安定化が回避される。その結果、トルク変動の発生を抑えつつ、加算角に含まれるモータ回転角速度の推定誤差を補正して、安定的にレゾルバレス制御を実行することができる。

【 0 0 1 3 】

また、特に、このような加算角の制限処理によって、その加算角に含まれるモータ回転角速度の推定誤差を補正することで、その補正を最小限度に抑えることができる。即ち、加算角が上記第1の閾値及び第2の閾値により規定される制限範囲内にある場合には、その誤差補正が行われない。これにより、モータの個体差に起因した「誤差補正の実行により生ずる新たな誤差」の発生を抑制することができる。その結果、効果的にトルク変動の発生を抑えることができる。

10

【 0 0 1 4 】

請求項2に記載の発明は、請求項1に記載のモータ制御装置を備えた電動パワーステアリング装置であること、を要旨とする。

上記構成によれば、トルク変動の発生を抑えつつ、加算角に含まれるモータ回転角速度の推定誤差を補正して、安定的にレゾルバレス制御を実行することができる。

【 発明の効果 】

20

【 0 0 1 5 】

本発明によれば、トルク変動の発生を抑えつつ、加算角に含まれるモータ回転角速度の推定誤差を補正して、安定的にレゾルバレス制御を実行することが可能なモータ制御装置及び電動パワーステアリング装置を提供することができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 6 】

【 図 1 】 電動パワーステアリング装置 (EPS) の概略構成図。

【 図 2 】 EPS の電氣的構成を示すブロック図。

【 図 3 】 第 1 制御部の概略構成図。

【 図 4 】 第 2 制御部の概略構成図。

30

【 図 5 】 外乱オブザーバの概略構成を示すブロック線図。

【 図 6 】 回転角速度推定の処理手順を示すフローチャート。

【 図 7 】 加算角調整演算の処理手順を示すフローチャート。

【 図 8 】 (a) (b) 加算角制限の態様を示す説明図。

【 図 9 】 第 2 制御部側の電流指令値演算部の概略構成図。

【 図 1 0 】 制御角と実際のモータ回転角との乖離 (負荷角) 及び各軸電流値の関係を示す説明図。

【 図 1 1 】 モータ回転角速度の実際値及び推定値間の大小関係に応じた負荷角の拡張を示す説明図。

【 図 1 2 】 (a) (b) 負荷角が安定領域外にある場合における加算角制限の態様を示す説明図。

40

【 図 1 3 】 制限範囲設定の処理手順を示すフローチャート。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 7 】

以下、本発明を具体化した一実施形態を図面に従って説明する。

図 1 に示すように、本実施形態の電動パワーステアリング装置 (EPS) 1 において、ステアリング 2 が固定されたステアリングシャフト 3 は、ラックアンドピニオン機構 4 を介してラック軸 5 と連結されている。そして、ステアリング操作に伴うステアリングシャフト 3 の回転は、ラックアンドピニオン機構 4 によりラック軸 5 の往復直線運動に変換される。尚、本実施形態のステアリングシャフト 3 は、コラムシャフト 3 a、インターミデ

50

イエイトシャフト 3 b、及びピニオンシャフト 3 c を連結してなる。そして、このステアリングシャフト 3 の回転に伴うラック軸 5 の往復直線運動が、同ラック軸 5 の両端に連結されたタイロッド 6 を介して図示しないナックルに伝達されることにより、転舵輪 7 の舵角、即ち車両の進行方向が変更される。

【 0 0 1 8 】

また、EPS 1 は、操舵系にステアリング操作を補助するためのアシスト力を付与する操舵力補助装置としての EPS アクチュエータ 1 0 と、該 EPS アクチュエータ 1 0 の作動を制御する制御手段としての ECU 1 1 とを備えている。

【 0 0 1 9 】

本実施形態の EPS アクチュエータ 1 0 は、駆動源であるモータ 1 2 が減速機構 1 3 を介してコラムシャフト 3 a と駆動連結された所謂コラム型の EPS アクチュエータとして構成されている。尚、本実施形態では、モータ 1 2 には、三相 (U , V , W) の駆動電力に基づき回転するブラシレスモータが採用されている。そして、EPS アクチュエータ 1 0 は、このモータ 1 2 の回転を減速してコラムシャフト 3 a に伝達することにより、そのモータトルクに基づくアシスト力を操舵系に付与する構成となっている。

10

【 0 0 2 0 】

一方、ECU 1 1 には、トルクセンサ 1 4 が接続されており、同 ECU 1 1 は、そのトルクセンサ 1 4 の出力信号に基づいて、ステアリングシャフト 3 に伝達される操舵トルクを検出する。また、本実施形態の ECU 1 1 には、車速センサ 1 5 により検出される車速 V 及びステアリングセンサ (操舵角センサ) 1 6 により検出される操舵角 δ が入力される。そして、ECU 1 1 は、これらの各状態量に基づいて、操舵系に付与すべき目標アシスト力を演算し、これに相当するモータトルクを発生させるべく駆動電力を供給することにより、そのモータ 1 2 を駆動源とする EPS アクチュエータ 1 0 の作動、即ち操舵系に付与するアシスト力を制御する (パワーアシスト制御) 。

20

【 0 0 2 1 】

次に、本実施形態の EPS の電氣的構成について説明する。

図 2 は、本実施形態の EPS の制御ブロック図である。同図に示すように、ECU 1 1 は、モータ制御信号を出力するモータ制御信号出力手段としてのマイコン 1 7 と、同マイコン 1 7 の出力するモータ制御信号に基づいてモータ 1 2 に三相の駆動電力を供給する駆動回路 1 8 とを備えている。

30

【 0 0 2 2 】

尚、以下に示す各制御ブロックは、マイコン 1 7 が実行するコンピュータプログラムにより実現されるものである。そして、同マイコン 1 7 は、所定のサンプリング周期で上記各状態量を検出し、所定周期毎に以下の各制御ブロックに示される各演算処理を実行することにより、モータ制御信号を生成する。

【 0 0 2 3 】

詳述すると、本実施形態の駆動回路 1 8 には、直列に接続された一対のスイッチング素子を基本単位 (スwitching アーム) として、各相モータコイル 1 2 u , 1 2 v , 1 2 w に対応する 3 つのスイッチングアームを並列に接続してなる周知の PWM インバータが採用されている。即ち、マイコン 1 7 の出力するモータ制御信号は、この駆動回路を構成する各相スイッチング素子のオン / オフ状態 (各相スイッチングアームの Duty) を規定するものとなっている。そして、駆動回路 1 8 は、このモータ制御信号の入力により作動して、その印加される電源電圧 V_{pigg} に基づく三相の駆動電力をモータに供給する構成となっている。

40

【 0 0 2 4 】

さらに詳述すると、ECU 1 1 には、モータ 1 2 の各相電流値 I_u , I_v , I_w を検出するための電流センサ 2 1 が設けられている。尚、本実施形態の電流センサ 2 1 は、上記駆動回路 1 8 を構成する各スイッチングアームの低電位側 (接地側) に、それぞれ、シャント抵抗を接続してなる周知の構成を有している。そして、本実施形態のマイコン 1 7 は、この電流センサ 2 1 の出力信号 (シャント抵抗の端子間電圧) に基づいて、各相モータコ

50

イル $12u$, $12v$, $12w$ に流れる相電流値 Iu , Iv , Iw を検出する。

【0025】

また、本実施形態のマイコン 17 は、モータレゾルバ 23 の出力信号に基づいて、モータ 12 の回転角 (電気角) θ_m を検出する。尚、本実施形態では、モータレゾルバ 23 には、そのセンサ信号として、モータ 12 の実回転角 (電気角) に応じて振幅が変化する二相の正弦波状信号 (正弦信号 S_{\sin} 及び余弦信号 S_{\cos}) を出力する巻線型のレゾルバが採用されている。そして、本実施形態のマイコン 17 は、これらモータ 12 の各相電流値 Iu , Iv , Iw 及び回転角 θ_m に基づいて、電流フィードバック制御を実行することにより、その駆動回路 18 に出力するモータ制御信号を生成する。

【0026】

さらに詳述すると、本実施形態では、マイコン 17 のモータ制御部 24 には、回転座標系における電流制御の実行によりモータ 12 の各相に印加すべき相電圧指令値 Vu^* , Vv^* , Vw^* (Vu^{**} , Vv^{**} , Vw^{**}) を演算する第 1 制御部 25 及び第 2 制御部 26、並びに、その相電圧指令値をモータ制御信号に変換する PWM 変換部 27 が設けられている。そして、本実施形態のマイコン 17 は、このモータ制御部 24 において生成されたモータ制御信号を駆動回路 18 に出力する構成となっている。

【0027】

図 3 に示すように、第 1 制御部 25 は、上記のように検出される操舵トルク T 及び車速 V に基づいて目標アシスト力に対応した電流指令値を演算する電流指令値演算部 31 を備えている。また、第 1 制御部 25 は、 d/q 変換部 32 を備えており、同 d/q 変換部 32 は、モータレゾルバ 23 により検出される上記回転角 θ_m に基づいて、各相電流値 Iu , Iv , Iw を d/q 座標上に写像することにより、 d 軸電流値 Id 及び q 軸電流値 Iq を演算する。そして、第 1 制御部 25 は、このモータ 12 の実回転角 (θ_m) に従う回転座標系 (d/q 座標系) において電流フィードバック制御を実行することにより、モータ 12 の各相に印加すべき電圧を示す相電圧指令値 Vu^* , Vv^* , Vw^* を演算する構成となっている。

【0028】

即ち、上記電流指令値演算部 31 は、電流指令値として q 軸電流指令値 Iq^* を演算する。具体的には、同電流指令値演算部 31 は、入力される操舵トルク T が大きいほど、また車速 V が小さいほど、より大きなアシスト力を発生させるような q 軸電流指令値 Iq^* を演算する。尚、 d 軸電流指令値 Id^* は「0」に固定される ($Id^* = 0$)。そして、これら d 軸電流指令値 Id^* 及び q 軸電流指令値 Iq^* は、 d/q 変換部 32 の出力する d 軸電流値 Id 及び q 軸電流値 Iq とともに、その対応する減算器 33 d , 33 q に入力される。

【0029】

次に、これら各減算器 33 d , 33 q が演算する各軸の電流偏差 ΔId , ΔIq は、それぞれ、対応する F/B 制御部 (フィードバック制御部) 34 d , 34 q に入力される。そして、各 F/B 制御部 34 d , 34 q は、その入力される電流偏差 ΔId , ΔIq 及び所定のフィードバックゲイン (比例: P、積分: I) に基づくフィードバック制御演算を実行することにより、 d/q 座標系の電圧指令値である d 軸電圧指令値 Vd^* 及び q 軸電圧指令値 Vq^* を演算する。

【0030】

具体的には、各 F/B 制御部 34 d , 34 q は、それぞれ、その入力される電流偏差 ΔId , ΔIq に比例ゲインを乗ずることにより得られる比例成分、及び当該電流偏差 ΔId , ΔIq の積分値に積分ゲインを乗ずることにより得られる積分成分を演算する。そして、これらの比例成分及び積分成分を加算することにより、 d 軸電圧指令値 Vd^* 及び q 軸電圧指令値 Vq^* を生成する。

【0031】

次に、これらの d 軸電圧指令値 Vd^* 及び q 軸電圧指令値 Vq^* は、 d/q 逆変換部 35 において、三相 (U, V, W) の交流座標上に写像される。そして、第 1 制御部 25 は、この d/q 逆変換部 35 が実行する逆変換により得られる相電圧指令値 Vu^* , Vv^* , Vw^* を

10

20

30

40

50

、上記PWM変換部27に出力する構成となっている。

【0032】

一方、図4に示すように、第2制御部26は、演算周期毎のモータ回転角変化量に相当する加算角 a (a') を演算する加算角演算部41と、その加算角 a (a') を演算周期毎に積算することにより制御上の仮想的なモータ回転角としての制御角 c を演算する制御角演算部42とを備えている。そして、第2制御部26は、その制御角 c に従う回転座標系 (θ / ω 座標系) において電流フィードバック制御を実行することにより、相電圧指令値 Vu^{**} , Vv^{**} , Vw^{**} を演算する構成となっている。

【0033】

詳述すると、本実施形態の加算角演算部41には、上記のように検出される操舵トルク T 、車速 V 、及び操舵角 δ が入力される。また、加算角演算部41は、ステアリング2に生じた操舵角 δ 及び車速 V に基づいて、操舵トルク T の目標値に対応した目標操舵トルク T^* を演算する目標操舵トルク演算部45を備えており、同目標操舵トルク演算部45において演算された目標操舵トルク T^* は、操舵トルク T とともに減算器46に入力される。そして、本実施形態の加算角演算部41は、トルクセンサ14により検出される実際の操舵トルク T から目標操舵トルク T^* を減算することにより得られるトルク偏差に基づいて上記加算角 a を演算する。

10

【0034】

即ち、モータトルクに基づくアシスト力を操舵系に付与するEPSにおいて、目標操舵トルク T^* は、モータ12が発生すべきモータトルク(目標トルク)に対応するパラメータ T_{ref} であり、操舵トルク T は、モータ12の実トルクに対応するパラメータである。つまり、これら目標操舵トルク T^* と実際の操舵トルク T との間の差分(トルク偏差 ΔT) は、目標トルクに対する実トルクの過不足を示す状態量となっている。そして、本実施形態の加算角演算部41は、その目標操舵トルク T^* に実際の操舵トルク T を追従させるべく、トルクフィードバック制御を実行することにより加算角 a を演算する。

20

【0035】

具体的には、減算器46において演算されたトルク偏差 ΔT は、F/B制御部47に入力される。そして、F/B制御部47は、そのトルク偏差 ΔT に比例ゲインを乗ずることにより得られる比例成分、及び当該トルク偏差 ΔT の積分値に積分ゲインを乗ずることにより得られる積分成分の加算値を、各演算周期におけるモータ回転角の第1変化成分 $d\theta$ として演算する。

30

【0036】

また、本実施形態では、第2制御部26には、モータ回転角速度を推定するモータ回転角速度推定手段としての回転角速度推定演算部50が設けられており、上記加算角演算部41には、この回転角速度推定演算部50の推定するモータ回転角速度 m_e が、各演算周期におけるモータ回転角の第2変化成分 $d\omega$ として入力される。そして、本実施形態の加算角演算部41は、上記トルク偏差 ΔT に基づく第1変化成分 $d\theta$ とともに、このモータ回転角速度 m_e に基づく第2変化成分 $d\omega$ を用いて、上記加算角 a を演算する。

【0037】

詳述すると、第2制御部26には、上記PWM変換部27がモータ制御信号を生成する際に用いる相電圧指令値 Vu^* , Vv^* , Vw^* (Vu^{**} , Vv^{**} , Vw^{**}) に対応した内部指令値、即ち $Duty$ が入力される。また、本実施形態のECU11は、電圧センサ51によって、その駆動回路18に印加される電源電圧 V_{pig} を検出する(図2参照)。そして、第2制御部26には、その検出される電源電圧 V_{pig} 及び上記 $Duty$ に基づいて、モータ12の各相電圧値 Vu , Vv , Vw を演算する相電圧演算部52が設けられている。

40

【0038】

また、これらの各相電圧値 Vu , Vv , Vw 、及び上記電流センサ21により検出されたモータ12の各相電流値 Iu , Iv , Iw は、 θ / ω 変換部53において、それぞれ、二相固定座標系 (d / q 座標系) の d 軸電圧値 V_d 及び q 軸電圧値 V_q 並びに d 軸電流値 I_d

50

及び軸電流値 I に変換される。そして、本実施形態の回転角速度推定演算部 50 は、これら軸電圧値 V 及び軸電流値 I 並びに軸電流値 I 及び軸電流値 I に示されるモータ電圧及びモータ電流に基づいて、モータ回転角速度 m_e を推定する。

【0039】

さらに詳述すると、本実施形態の回転角速度推定演算部 50 は、モータモデルに基づいて、そのモータ 12 に生ずる誘起電圧を外乱として推定する外乱オブザーバ 54 を備えている。

【0040】

即ち、図 5 に示すブロック線図において、モータ 12 は、モータ電圧 (V , V) 及び誘起電圧 (E , E) に基づいてモータ電流 (I , I) を生じせしめるモータモデル M1 に表される。従って、そのモータ電流 (I , I) を入力とする逆モータモデル M2、及び当該逆モータモデル M2 の出力及びモータ電圧 (V , V) を入力とする差分器 55 によって、上記のような誘起電圧推定値 (E_e , E_e) を出力する外乱オブザーバ 54 を形成することができる。尚、例えば、モータモデル M1 を「 $1 / (R + pL)$ 」とすると、逆モータモデル M2 は「 $R + pL$ 」となる (但し、 R : 電機子巻線抵抗、 L : インダクタンス、 p : 微分演算子)。そして、本実施形態の回転角速度推定演算部 50 は、この外乱オブザーバ 54 が出力する誘起電圧推定値 (E_e , E_e) に基づいて、モータ回転角速度 m_e を推定する。

【0041】

即ち、座標系の誘起電圧 (E , E) は、それぞれ、次の (1) (2) 式に表される。尚、各式中、「 K_e 」は誘起電圧定数、「 m 」はモータ回転角速度である。

$$E = -K_e x_m \sin \dots (1)$$

$$E = K_e x_m \cos \dots (2)$$

更に、これら (1) (2) 式を角度「 θ 」について解くことにより、次の (3) 式を得る。尚、同式中、「 \arctan 」は「アークタンジェント」である。

【0042】

$$\theta = \arctan(-E_e / E_e) \dots (3)$$

従って、外乱オブザーバ 54 が出力する誘起電圧推定値 (E_e , E_e) からモータ回転角 (m_e) を推定することができる。そして、本実施形態の回転角速度推定演算部 50 は、そのモータ回転角の推定値 (m_e) を微分することにより、モータ回転角速度 (の推定値) m_e を演算する。

【0043】

具体的には、図 6 のフローチャートに示すように、回転角速度推定演算部 50 は、上記外乱オブザーバ 54 によりモータ 12 の誘起電圧を推定すると (E_e , E_e 、ステップ 101)、先ず、その誘起電圧推定値 (E_e , E_e) にフィルタ処理を施す (LPF: ローパスフィルタ、ステップ 102)。次に、回転角速度推定演算部 50 は、上記 (3) 式を用いることにより、その誘起電圧推定値 (E_e , E_e) から、モータ回転角 (m_e) を推定する (回転角推定、ステップ 103)。そして、そのモータ回転角 (m_e) を微分することによりモータ回転角速度 (の推定値) m_e を演算する (回転角度推定、ステップ 104)。

【0044】

そして、本実施形態の回転角速度推定演算部 50 は、そのモータ回転角速度 m_e を、各演算周期におけるモータ回転角の第 2 変化成分 d として、上記加算角演算部 41 に出力する構成になっている (ステップ 105)。

【0045】

図 4 に示すように、本実施形態の加算角演算部 41 において、上記 F/B 制御部 47 の演算するトルク偏差 d に基づくモータ回転角の第 1 変化成分 d 、及び上記回転角速度推定演算部 50 の演算するモータ回転角速度 m_e に基づくモータ回転角の第 2 変化成分 d は、ともに加算角調整演算部 58 に入力される。また、本実施形態では、上記回転角速度推定演算部 50 は、その外乱オブザーバ 54 が出力する誘起電圧推定値 (E_e

10

20

30

40

50

、 E_{sq_e} の二乗和を演算し ($E_{sq_} = (E_{sq_e})^2 + (E_{sq_e})^2$ 、但し「 $\wedge 2$ 」は二乗を示す)、その誘起電圧二乗和 $E_{sq_}$ を加算角調整演算部 58 に出力する。そして、本実施形態の加算角演算部 41 は、この誘起電圧二乗和 $E_{sq_}$ の値に基づいて、その加算角 α の演算形態を変更する。

【0046】

詳述すると、本実施形態の加算角調整演算部 58 は、その入力される誘起電圧二乗和 $E_{sq_}$ を所定の閾値 (E_0) と比較する。そして、当該誘起電圧二乗和 $E_{sq_}$ が閾値 (E_0) を超える場合には、上記トルク偏差 τ に基づく第 1 変化成分 d 及びモータ回転角速度 m_e に基づく第 2 変化成分 d の加算値を加算角 α とし、閾値 (E_0) 以下である場合には、そのトルク偏差 τ に基づく第 1 変化成分 d を加算角 α とする構成になっている。

10

【0047】

即ち、一演算周期を基本単位とするモータ回転角速度 m_e は、その一演算周期あたりのモータ回転角変化量と等価的な意味を有する。そして、上記のような外乱オブザーバ 54 を用いたモータ電流及びモータ電圧に基づく誘起電圧の推定は、当該誘起電圧が増大する高速回転領域において、より高い精度が確保される。

【0048】

この点を踏まえ、本実施形態の加算角調整演算部 58 は、上記誘起電圧二乗和 $E_{sq_}$ と閾値 (E_0) との比較により、モータ 12 の回転状態 (回転速度) が、その推定されるモータ回転角速度 m_e をモータ回転角の第 2 変化成分 d として利用可能な推定精度が担保される高速回転領域にあるか否かを判定する。そして、その要求される推定精度が担保される高速回転領域にある場合にのみ、上記モータ回転角速度 m_e に基づく第 2 変化成分 d を用いる構成となっている。

20

【0049】

具体的には、図 7 のフローチャートに示すように、加算角調整演算部 58 は、先ず、上記トルク偏差 τ に基づく第 1 変化成分 d 、及び上記モータ回転角速度 m_e に基づく第 2 変化成分 d 、並びに上記誘起電圧二乗和 $E_{sq_}$ を取得する (ステップ 201 ~ ステップ 203)。

【0050】

次に、加算角調整演算部 58 は、誘起電圧二乗和 $E_{sq_}$ が閾値 E_0 を超えるか否かを判定し (ステップ 204)、閾値 E_0 を超える場合 (ステップ 204: YES) には、続いて、既に当該誘起電圧二乗和 $E_{sq_}$ が閾値 E_0 を超える状態にあったことを示す超過フラグがセットされているか否かを判定する (ステップ 205)。そして、当該超過フラグがセットされていない場合 (ステップ 205: NO) には、当該超過フラグをセットし (ステップ 206)、上記ステップ 201 において取得した第 1 変化成分 d の値をクリアする ($d = 0$ 、ステップ 207)。

30

【0051】

尚、上記ステップ 205 において、既に超過フラグがセットされている場合 (ステップ 205: YES) には、上記ステップ 206 及びステップ 207 の処理は実行されない。そして、これら上記ステップ 204 において誘起電圧二乗和 $E_{sq_}$ が閾値 E_0 を超えると判定された場合 (ステップ 204: YES) には、その超過フラグの如何にかかわらず、そのトルク偏差 τ に基づく第 1 変化成分 d 及びモータ回転角速度 m_e に基づく第 2 変化成分 d を加算することにより加算角 α を演算する (ステップ 208)。

40

【0052】

一方、上記ステップ 204 において、誘起電圧二乗和 $E_{sq_}$ が閾値 E_0 以下であると判定した場合 (ステップ 204: NO) もまた、加算角調整演算部 58 は、超過フラグがセットされているか否かを判定する (ステップ 209)。そして、当該超過フラグがセットされている場合 (ステップ 209: YES) には、当該超過フラグをリセットする (ステップ 210)。尚、超過フラグがセットされていない場合 (ステップ 209: NO) には、このステップ 210 の処理は実行されない。そして、その上記ステップ 201 にお

50

いて取得した第 1 変化成分 d を加算角 a として演算する (ステップ 2 1 1)。

【0053】

そして、本実施形態の加算角調整演算部 5 8 は、このように上記ステップ 2 0 8 又はステップ 2 1 1 において演算した加算角 a を外部に出力する構成となっている (ステップ 2 1 2)。

【0054】

即ち、上記トルク偏差 に基づく第 1 変化成分 d は、モータ 1 2 の実回転角と制御上の仮想的なモータ回転角との乖離の大きさに応じた値となる。従って、上記モータ回転角速度 m_e に基づく第 2 変化成分 d よりも、その値がモータ回転状態に左右されにくい。この点を踏まえ、本実施形態では、上記のように、モータ回転状態が低速領域にある場合には、当該第 1 変化成分 d を加算角 a とする。尚、モータ回転角速度 m_e に基づく第 2 変化成分 d を用いて加算角 a を演算する最初の演算周期 (ステップ 2 0 4 : YES、及びステップ 2 0 5 : NO) において、第 1 変化成分 d をクリアするのは (ステップ 2 0 7)、当該第 1 変化成分 d が、第 2 変化成分 d を用いなかった前回演算周期の状態を反映するものだからである。そして、本実施形態では、これにより、そのモータ回転状態に依らず、高精度な加算角演算が可能となっている。

【0055】

ここで、本実施形態の加算角調整演算部 5 8 は、上記のようにトルク偏差 に基づく第 1 変化成分 d 及び推定されるモータ回転角速度 m_e に基づく第 2 変化成分 d の加算値を加算角 a とする場合 ($E_{sq} > E_0$ 、 $a = d + d$)、トルク偏差 の符号に基づいて、その加算角 a の制限処理 (補正) を実行する。

【0056】

詳述すると、加算角調整演算部 5 8 は、図 8 (a) (b) に示すように、トルク偏差 の符号、即ち当該トルク偏差 に基づき上記第 1 変化成分 d が演算される方向に対応する制限範囲を設定する。具体的には、本実施形態の加算角調整演算部 5 8 は、上記推定されるモータ回転角速度 (推定モータ回転角速度) m_e に対応する第 1 の閾値 d_{lim1} 、及び当該第 1 の閾値 d_{lim1} よりも推定モータ回転角速度 (m_e) から離れた値を有した第 2 の閾値 d_{lim2} を設定する。そして、その出力する制限処理後の加算角 a' が、これら第 1 の閾値 d_{lim1} と第 2 の閾値 d_{lim2} とにより規定される制限範囲内の値となるように、その加算角 a を制限 (補正) する。

【0057】

さらに詳述すると、図 8 (a) に示すように、トルク偏差 の符号が「正」である場合 (> 0)、加算角調整演算部 5 8 は、推定モータ回転角速度 (m_e) を第 1 の閾値 d_{lim1} として設定する ($d_{lim1} = m_e$)。また、当該推定モータ回転角速度 (m_e) から「+側 (正方向)」に所定値 N_1 離れた値を第 2 の閾値 d_{lim2} として設定する ($d_{lim2} = m_e + N_1$)。

【0058】

そして、加算角調整演算部 5 8 は、加算角 a の値が第 2 の閾値 d_{lim2} よりも「+側」にある場合 ($a > d_{lim2}$) には、その制限処理後の値が第 2 の閾値 d_{lim2} となるように、同加算角 a を補正する ($a' = d_{lim2}$)。また、加算角 a の値が第 1 の閾値 d_{lim1} よりも「-側」にある場合 ($a < d_{lim1}$) には、その制限処理後の値が第 1 の閾値 d_{lim1} となるように同加算角 a を補正する ($a' = d_{lim1}$)、

一方、図 8 (b) に示すように、トルク偏差 の符号が「負」である場合 (< 0)、加算角調整演算部 5 8 は、推定モータ回転角速度 (m_e) を第 1 の閾値 d_{lim1} として設定する ($d_{lim1} = m_e$)。また、当該推定モータ回転角速度 (m_e) から「-側 (負方向)」に所定値 N_1 離れた値を第 2 の閾値 d_{lim2} として設定する ($d_{lim2} = m_e - N_1$)。

【0059】

そして、加算角調整演算部 5 8 は、加算角 a の値が第 2 の閾値 d_{lim2} よりも「-側」にある場合 ($a < d_{lim2}$) には、その制限処理後の値が第 2 の閾値 d_{lim2} となる

ように、同加算角 a を補正する ($a' = d \lim 2$)。また、加算角 a の値が第 1 の閾値 $d \lim 1$ よりも「+側」にある場合 ($a > d \lim 1$) には、その制限処理後の値が第 1 の閾値 $d \lim 1$ となるように同加算角 a を補正する ($a' = d \lim 1$)。

【0060】

即ち、制限範囲は、第 2 の閾値 $d \lim 2$ を設定した方向に設定される。尚、トルク偏差が「0」である場合には、その直前の符号が用いられる。また、上記の所定値 $N 1$ には、電流応答の限界に対応する値 (例えば、 5° 程度) が設定される。そして、トルク偏差に基づく第 1 変化成分 d を加算角 a とする場合 ($E_{sq} \leq E 0$ 、 $a = d$) には、このような加算角 a についての制限処理は実行されない。

【0061】

図 4 に示すように、加算角演算部 4 1 は、このようにして演算した加算角 a (a') を制御角演算部 4 2 に出力する。また、制御角演算部 4 2 は、前回の演算周期において演算した制御角 c の前回値を記憶領域 (図示略) に保持するとともに、当該前回値に上記加算角 a を加算することにより新たな制御角 c を演算する。そして、同制御角演算部 4 2 は、その当該新たな制御角 c にて、上記記憶領域に保持する前回値を更新することにより、その演算周期毎に、加算角 a の積算による制御角 c の演算を実行する構成となっている。

【0062】

第 2 制御部 2 6 において、このようにして演算された制御上の仮想的なモータ回転角としての制御角 c は、上記 / 変換部 5 3 が出力する二相固定座標系 (/ 座標系) の軸電流値 I 及び軸電流値 I とともに、 / 変換部 6 0 に入力される。そして、 / 変換部 6 0 は、当該軸電流値 I 及び軸電流値 I を、その制御角 c に従う回転座標系、即ち / 座標系の直交座標上に写像することにより、 / 座標系の実電流値としての軸電流値 I 及び軸電流値 I を演算する。

【0063】

また、第 2 制御部 2 6 は、その / 座標系の電流指令値として、軸電流指令値 I^* 及び軸電流指令値 I^* を演算する電流指令値演算部 6 1 を備えている。そして、電流指令値演算部 6 1 は、上記加算角演算部 4 1 において演算されたトルク偏差、及び目標操舵トルク T^* に基づいて、軸電流指令値 I^* 及び軸電流指令値 I^* を演算する。

【0064】

詳述すると、図 9 に示すように、本実施形態の電流指令値演算部 6 1 は、目標操舵トルク T^* と実際の操舵トルク T との間のトルク偏差に基づいて各演算周期における軸電流指令値 I^* の増減値 (軸電流増減値) を演算する軸電流増減値演算部 7 1 と、入力される軸電流増減値を演算周期毎に積算する積算制御部 7 2 とを備えている。

【0065】

本実施形態の軸電流増減値演算部 7 1 は、トルク偏差と軸電流増減値が関連付けられた二つのマップ (7 1 a, 7 1 b) を備えている。具体的には、第 1 マップ 7 1 a は、目標操舵トルク T^* の符号 (方向) が「正である場合 ($T^* > 0$)」に対応して形成される一方、第 2 マップ 7 1 b は、目標操舵トルク T^* の符号が「負である場合 ($T^* < 0$)」に対応して形成されている。尚、目標操舵トルク T^* が「0」である場合には、その直前の符号が用いられる。そして、軸電流増減値演算部 7 1 は、入力される目標操舵トルク T^* の符号に応じて参照するマップを切り替えつつ、そのトルク偏差に基づいて、各演算周期における軸電流増減値を演算する。

【0066】

即ち、目標操舵トルク T^* が「正の値」である場合にトルク偏差が「正の値」、又は目標操舵トルク T^* の符号が「負の値」である場合にトルク偏差が「負の値」にある状態は、モータ 1 2 が発生すべき目標トルクに対して実トルクが「不足」していることを示している。一方、目標操舵トルク T^* が「正の値」である場合にトルク偏差が「負の値」、又は目標操舵トルク T^* の符号が「負の値」である場合にトルク偏差が「

10

20

30

40

50

「正の値」にある状態は、モータ 1 2 が発生すべき目標トルクに対して実トルクが「過剰」であることを示している。そして、本実施形態の軸電流増減値演算部 7 1 は、そのトルク偏差に示されるモータ 1 2 が発生すべき目標トルクに対する実トルクの過不足に基づいて、各演算周期における軸電流増減値を演算する。

【0067】

具体的には、第 1 マップ 7 1 a において、軸電流増減値は、トルク偏差が「正の値」を有する所定値 A 1 以上、且つ同じく「正の値」を有する所定値 A 2 より小さい場合 ($A 1 < A 2$) には、当該トルク偏差が大きな値となる程、より大きな絶対値を有する「正の値」となるように設定されている。また、トルク偏差が所定値 A 1 より小さく、且つ同じく「正の値」を有する所定値 A 3 以上である場合 ($A 3 < A 1$) には、当該トルク偏差が小さな値となるほど、より大きな絶対値を有する「負の値」となるように設定されている。そして、トルク偏差が所定値 A 2 以上である場合 ($A 2$) には、軸電流増減値が、一定の「正の値 (最大増加値 1)」となり、トルク偏差が所定値 A 3 より小さい場合 ($< A 3$) には、同軸電流増減値が、一定の「負の値 (最大減少値 2)」となるように設定されている。

10

【0068】

一方、第 2 マップ 7 1 b において、軸電流増減値は、トルク偏差が「負の値」を有する所定値 A 4 以下、且つ同じく「負の値」を有する所定値 A 5 より大きい範囲にある場合 ($A 5 < A 4$) には、当該トルク偏差が小さな値となる程、より大きな絶対値を有する「正の値」となるように設定されている。また、トルク偏差が所定値 A 4 より大きく、且つ同じく「負の値」を有する所定値 A 6 以下である場合 ($A 4 < A 6$) には、当該トルク偏差が大きな値 (絶対値小) となるほど、より大きな絶対値を有する「負の値」となるように設定されている。そして、トルク偏差が所定値 A 5 以下である場合 ($A 5$) には、軸電流増減値が、一定の「正の値 (最大増加値 1)」となり、トルク偏差が所定値 A 6 より大きい場合 ($A 6 <$) には、同軸電流増減値が、一定の「負の値 (最大減少値 2)」となるように設定されている。

20

【0069】

本実施形態の軸電流増減値演算部 7 1 は、これら二つのマップ (7 1 a, 7 1 b) を参照することにより、モータ 1 2 が発生すべき目標トルクに対して実トルクが「過剰」である場合 ($* > 0$ において < 0 、又は $* < 0$ において > 0) には、軸電流指令値 I^* を低減するような「負の値」を有した軸電流増減値を演算する。

30

【0070】

更に、本実施形態では、モータ 1 2 が発生すべき目標トルクに対して実トルクが「不足」することを示す領域についても、その「実トルクの不足」を許容する範囲が設定されている ($* > 0$ において $0 < A 1$ 、又は $* < 0$ において $A 4 < 0$)。そして、軸電流増減値演算部 7 1 は、そのトルク偏差に示される「実トルクの不足」が上記許容範囲内にある場合にも、軸電流指令値 I^* を低減するような「負の値」を有した軸電流増減値を演算する。

【0071】

そして、本実施形態の軸電流増減値演算部 7 1 は、そのトルク偏差に示される「実トルクの不足」が上記許容範囲を超える場合 ($* > 0$ において $A 1$ 、又は $* < 0$ において $A 4$) には、軸電流指令値 I^* を増大させるような「正の値」を有した軸電流増減値を演算する構成となっている。

40

【0072】

一方、本実施形態の積算制御部 7 2 は、前回の演算周期における制御出力、即ち軸電流指令値 I^* の前回値を記憶領域 (図示略) に保持する。そして、積算制御部 7 2 は、入力される軸電流増減値を当該前回値に加算することにより新たな軸電流指令値 I^* を演算するとともに、当該新たな軸電流指令値 I^* によって、その記憶領域に保持する前回値を更新する。

50

【0073】

そして、本実施形態の電流指令値演算部61は、この積算制御部72の制御出力、即ち軸電流増減値の積算値を軸電流指令値 I^* とする構成になっている。

図4に示すように、このようにして電流指令値演算部61により演算された軸電流指令値 I^* は、上記軸電流値 I とともに、その対応する減算器74aに入力される。同様に、軸電流指令値 I^* もまた、軸電流値 I とともに、その対応する減算器74bに入力される。尚、本実施形態では、軸電流指令値 I^* は「0」に固定される($I^* = 0$)。そして、これら各減算器74a, 74bにおいて演算される電流偏差 I_e , I_b は、それぞれ、その対応する各F/B制御部75a, 75bに入力される。

【0074】

次に、各F/B制御部75a, 75bは、その電流偏差 I_e , I_b 及び所定のフィードバックゲイン(比例:P、積分:I)に基づくフィードバック制御演算を実行することにより、座標系の電圧指令値である軸電圧指令値 V^* 及び軸電圧指令値 V_b^* を演算する。尚、これら各F/B制御部75a, 75bの実行するフィードバック制御演算の態様については、上記第1制御部25側の各F/B制御部34d, 34qと同様であるため、その詳細な説明は省略する。

【0075】

更に、これらの軸電圧指令値 V^* 及び軸電圧指令値 V_b^* は、2相/3相変換部76において、三相(U, V, W)の交流座標上に写像される。そして、第2制御部26は、この2相/3相変換部76において生成された相電圧指令値 V_u^{**} , V_v^{**} , V_w^{**} を、上記PWM変換部27に出力する構成となっている。尚、このように、第2制御部26が実行するレゾルパレス制御の原理についての詳細は、例えば、上記特許文献1及び特許文献2等の記載を参照されたい。

【0076】

また、図2に示すように、本実施形態のマイコン17は、上記モータレゾルバ23により検出される上記回転角 θ_m の異常を検出する回転角異常検出部78を備えている。具体的には、本実施形態の回転角異常検出部78は、そのモータレゾルバ23が出力する正弦信号 S_{\sin} 及び余弦信号 S_{\cos} の二乗和が適正範囲内にあるか否かを判定する。そして、その判定結果に基づいて、モータ12の実回転角として回転角 θ_m の異常を検出する。尚、このような回転角異常検出の詳細については、例えば、特開2006-177750号公報等の記載を参照されたい。

【0077】

更に、本実施形態では、この回転角異常検出部78による異常検出の結果は、回転角異常検出信号 S_{rsf} として上記モータ制御部24に入力される。そして、本実施形態のモータ制御部24は、回転角 θ_m に異常のない場合には、上記第1制御部25が演算する相電圧指令値 V_u^* , V_v^* , V_w^* に基づいてモータ制御信号を出力し、回転角 θ_m に異常が生じた場合には、上記第2制御部26が演算する相電圧指令値 V_u^{**} , V_v^{**} , V_w^{**} に基づいて、そのモータ制御信号の出力を実行する。

【0078】

即ち、第2制御部26は、モータ12の実回転角であるモータレゾルバ23により検出される回転角 θ_m を用いることなく、制御上の仮想的なモータ回転角である制御角 θ_c を用いて、その相電圧指令値 V_u^{**} , V_v^{**} , V_w^{**} を演算する。そして、本実施形態のECU11は、その第2制御部26が演算する相電圧指令値 V_u^{**} , V_v^{**} , V_w^{**} に基づいてモータ制御信号を生成することにより、回転角 θ_m に異常が検出された後においても、安定的に、そのモータ制御を継続することが可能となっている。

【0079】

(加算角制限による誤差補正)

次に、本実施形態の加算角調整演算部58が実行する加算角制限による誤差補正の態様について説明する。

【0080】

10

20

30

40

50

図10に示すように、本実施形態では、三相固定座標の「U軸」に対して実回転座標（d/q座標）の「d軸」のなす角を実回転角（ θ_m ）とした場合において、当該実回転角（ θ_m ）と上記制御角 θ_c とが一致する場合に、その「 θ_c 軸」と上記「d軸」とが一致するように同制御角 θ_c に従う仮想座標としての d/q 座標が定義されている。そして、本実施形態のECU11（第2制御部26）は、その制御角 θ_c と実回転角（ θ_m ）との乖離を示す負荷角 L の大きさ（正の値）が「 $0 \sim 90^\circ$ 」の範囲に留まる限りにおいて、安定的に、そのモータ制御を実行することが可能となっている。

【0081】

即ち、図4に示すように、第2制御部26は、トルクフィードバック制御を実行することにより、モータ12が発生すべき目標トルクに対する実トルクの過不足を示すトルク偏差 T_{err} に基づいて制御角 θ_c を演算する。そして、図10に示すように、 d 軸電流値 I_d が一定であるとすれば、上記安定的にモータ制御可能な範囲内において、負荷角 L が拡大するほど、より大きなq軸電流が流れ、そのq軸電流値 I_q に対応したモータトルクが発生することになる（ $I_q = I_d \cdot \sin L$ ）。

10

【0082】

つまり、本実施形態では、目標トルクに対する実トルクの不足によりトルク偏差 T_{err} が拡大した状況にあるほど、当該トルク偏差 T_{err} に従って、より大きな加算角 θ_a が演算される。そして、その加算角 θ_a に応じた制御角 θ_c の変化により負荷角 L が拡大し、当該負荷角 L に応じたq軸電流値 I_q の変化によってモータトルクが増大することにより、その実トルクが目標トルクに追従する。

20

【0083】

一方、その負荷角 L が、上記安定的にモータ制御可能な範囲を超えた場合、即ち、その大きさが「 90° 」を超える領域においては、上記負荷角 L の変化とq軸電流値 I_q の変化との関係が逆転する。つまり、トルク偏差 T_{err} が大きくなるほどモータトルクが減少し、その負荷角 L の拡大が助長されることになる。そして、当該負荷角 L の大きさが「 180° 」を超えた瞬間、そのモータ回転方向とは逆向きのモータトルクが発生することになる。従って、負荷角 L が上記安定的にモータ制御可能な範囲を超えることにより、モータ制御の状態は不安定化することになる。

【0084】

また、上記のように、本実施形態の加算角演算部41（加算角調整演算部58）は、モータ12が高速回転状態にある場合（図7参照、 $E_{sq_} > \text{閾値 } E_0$ 、ステップ204：YES）には、トルク偏差 T_{err} に基づく第1変化成分 d_{err} 及び推定モータ回転角速度（ ω_{me} ）に基づく第2変化成分 d_{ω} の加算値を加算角 θ_a とする（同図中、ステップ208）。つまり、本実施形態の加算角演算部41は、一演算周期あたりのモータ回転角変化量と等価的な意味を有するモータ回転角速度（推定値） ω_{me} を基礎（ベース）としてトルクフィードバック制御を実行することにより加算角 θ_a を演算する。そして、これにより、その高速回転領域におけるモータ制御の安定性を、より一層、高めることが可能となっている。

30

【0085】

ここで、図11に示すように、推定モータ回転角速度（ ω_{me} ）と実モータ回転角速度（ ω_{mr} ）との間に乖離、即ち推定誤差がある場合、当該推定モータ回転角速度（ ω_{me} ）に基づく第2変化成分 d_{ω} に注目すると、負荷角 L は、実モータ回転角速度（ ω_{mr} ）よりも推定モータ回転角速度（ ω_{me} ）の方が遅い場合に縮小する。そして、実モータ回転角速度（ ω_{mr} ）よりも推定モータ回転角速度（ ω_{me} ）の方が速い場合に拡大することになる。

40

【0086】

尚、同図に示すように、回転方向を「正」とした場合、推定モータ回転角速度（ ω_{me} ）の方が遅い場合には「 $\omega_{mr} - \omega_{me} > 0$ 」、当該推定モータ回転角速度（ ω_{me} ）の方が速い場合には「 $\omega_{mr} - \omega_{me} < 0$ 」となる。

【0087】

50

上記構成では、理論上、こうした加算角 a に含まれるモータ回転角速度 m_e の推定誤差の問題も、そのトルク偏差 ΔT に基づくトルクフィードバック制御の実行により演算される上記第 1 変化成分 d によって打ち消すことが可能である。ところが、現実のトルクフィードバック制御には応答性の問題が存在する。このため、モータ制御の安定性を確保する観点からは、やはり、少なくとも負荷角 L が縮小する方向に、その加算角 a に含まれるモータ回転角速度 m_e の推定誤差を補正することが望まれる。

【0088】

しかしながら、上述のように、モータ 12 の個体差を考慮し、その想定される最大誤差により加算角 a を補正するとすれば、その補正により生ずる新たな誤差がトルク変動の発生要因となるおそれがある。

【0089】

この点を踏まえ、本実施形態の加算角調整演算部 58 は、その制御上の仮想的なモータ回転角としての制御角 c と実回転角 (m) との乖離を示す負荷角 (誤差角) L を推定し、当該負荷角 L に基づいて、モータ制御の状態、詳しくはその安定性を判定する。そして、その判定結果に基づいて、図 8 (a) (b) に示される加算角制限の制限範囲 ($d_{lim1} \sim d_{lim2}$) を移動 (シフト) させる。

【0090】

詳述すると、本実施形態の加算角調整演算部 58 には、制御角演算部 42 により演算された制御角 c 及び回転角速度推定演算部 50 により推定されたモータ回転角 (m_e 、図 6 参照、ステップ 103) が入力されるようになっている。そして、同加算角調整演算部 58 は、当該制御角 c 及び推定モータ回転角 (m_e) に基づいて、上記負荷角 L を推定する ($L = c - m_e$)。

【0091】

また、本実施形態では、モータ制御の状態が安定的に維持された状態において、負荷角 L が推移すべき値の範囲に対応する「安定領域」として、その大きさ (絶対値) が所定角度 (θ_0) 以下の領域が設定されている。そして、本実施形態の加算角調整演算部 58 は、その推定された負荷角 L が、当該安定領域を超えて拡大した場合 ($|L| > \theta_0$) には、図 12 (a) (b) に示すように、その想定される推定モータ回転角速度 (m_e) の最大誤差に対応する所定値 $N2$ (例えば、 1° 程度) の分だけ、その加算角制限の制限範囲 ($d_{lim1} \sim d_{lim2}$) を移動 (シフト) させる。

【0092】

さらに詳述すると、図 12 (a) (b) に示すように、加算角調整演算部 58 は、負荷角 L が、安定領域外にある場合、上記トルク偏差 ΔT に基づき第 1 変化成分 d が演算される方向に対応する制限範囲の設定方向において、第 1 の閾値 d_{lim1} を、上記所定値 $N2$ の分だけ、推定モータ回転角速度 (m_e) から離れた値に変更する。そして、この第 1 の閾値 d_{lim1} の変更 (移動) に合わせて第 2 の閾値 d_{lim2} を当該方向に移動させることにより、その加算角制限の制限範囲を移動 (シフト) させる。

【0093】

具体的には、図 12 (a) に示すように、負荷角 L が安定領域外にある場合において、トルク偏差 ΔT の符号が「正」である場合 ($\Delta T > 0$)、加算角調整演算部 58 は、第 1 の閾値 d_{lim1} として、推定モータ回転角速度 (m_e) から「+側 (正方向)」に所定値 $N2$ 離れた値を設定する ($d_{lim1} = m_e + N2$)。そして、第 2 の閾値 d_{lim2} についても、同じく「+側」に所定値 $N2$ 離れた値に変更する ($d_{lim2} = m_e + N1 + N2$)。

【0094】

一方、図 12 (b) に示すように、負荷角 L が安定領域外にあり、且つトルク偏差 ΔT の符号が「負」である場合 ($\Delta T < 0$)、加算角調整演算部 58 は、第 1 の閾値 d_{lim1} として、推定モータ回転角速度 (m_e) から「-側 (負方向)」に所定値 $N2$ 離れた値を設定する ($d_{lim1} = m_e - N2$)。そして、第 2 の閾値 d_{lim2} についても、同じく「-側」に所定値 $N2$ 離れた値に変更する ($d_{lim2} = m_e - N1 - N2$)。

10

20

30

40

50

【 0 0 9 5 】

そして、本実施形態では、これにより、トルク変動の発生を抑えつつ、加算角 a に含まれるモータ回転角速度 m_e の推定誤差を補正して、安定的に、そのレゾルバレス制御を実行することが可能となっている。

【 0 0 9 6 】

即ち、拡大しようとする負荷角 L を縮小させるような上記トルク偏差 d に基づく第 1 変化成分 d が演算される状況では、加算角制限における制限範囲の設定方向もまた、その第 1 変化成分 d が演算される方向と同じく、推定モータ回転角速度 (m_e) の発生方向とは逆向きになる。具体的には、例えば、図 1 1 に示すように、推定モータ回転角速度 (m_e) の発生方向が「正」である場合において、その負荷角 L を縮小させる「負」方向の上記第 1 変化成分 d が演算される状況 ($d < 0$) では、その加算角制限における制限範囲の設定方向もまた「負」となる。

10

【 0 0 9 7 】

ここで、その推定誤差を「 N 」とすると、推定モータ回転角速度 (m_e) は、実モータ回転角速度 (m_r) に当該推定誤差「 N 」を加算した値となる ($m_e = m_r + N$)。そして、上記トルク偏差 d に基づく第 1 変化成分 d が「 0 」となる最悪条件を仮定すると、図 8 (b) に示すように、推定モータ回転角速度 (m_e) を上記制限範囲における第 1 の閾値 d_{lim1} とした場合 ($d_{lim1} = m_e$)、その推定誤差「 N 」の分だけ、負荷角 L の拡大が進むことになる ($m_r - (m_r + N) < 0$)。

20

【 0 0 9 8 】

しかしながら、本実施形態では、上記のように、負荷角 L が安定領域外にある場合、図 1 2 (b) に示すように、その制限範囲における第 1 の閾値 d_{lim1} の値が、推定モータ回転角速度 (m_e) から「 $-$ 側 (負方向)」に、その想定される推定誤差「 N 」の最大値に対応する所定値 N_2 離れた値に変更される。そして、これにより、その加算角 a に含まれるモータ回転角速度 m_e の推定誤差「 N 」は、少なくとも、その負荷角 L が縮小する方向に補正される ($m_r - ((m_r + N) - N_2) > 0$)。

【 0 0 9 9 】

つまり、本実施形態の加算角調整演算部 5 8 は、モータ制御の状態が安定的に維持された状況で、負荷角 L が推移する「安定領域」にある場合 ($|L| = 0$) には、その加算角 a に含まれるモータ回転角速度 m_e の推定誤差「 N 」を許容することで、当該推定誤差「 N 」の補正により生ずるトルク変動を回避する。そして、負荷角 L が安定領域を超えて拡大した場合 ($|L| > 0$) には、上記加算角制限における制限範囲の移動 (シフト) により、その推定誤差「 N 」を少なくとも負荷角 L が縮小する方向に補正することにより、当該負荷角 L の拡大によるモータ制御の不安定化を回避する構成となっている。

30

【 0 1 0 0 】

次に、本実施形態の加算角調整演算部 5 8 による加算角制限における制限範囲設定の処理手順について説明する。

図 1 3 のフローチャートに示すように、加算角調整演算部 5 8 は、制御角演算部 4 2 により演算された制御角 c 及び回転角速度推定演算部 5 0 により推定されたモータ回転角 (m_e) を取得すると (ステップ 3 0 1)、先ず、これらの制御角 c 及び推定モータ回転角 (m_e) に基づいて負荷角 L を推定する ($L = c - m_e$ 、ステップ 3 0 2)。

40

【 0 1 0 1 】

次に、加算角調整演算部 5 8 は、その演算された負荷角 L の正弦成分 (の絶対値「 $|\sin L|$ 」) を上記「安定領域」を規定する所定角度 (θ_0) に対応する所定の閾値 B_0 と比較する (ステップ 3 0 3)。尚、この場合において、閾値 B_0 は、例えば「 0.8 」程度に設定される。そして、その負荷角 L の正弦成分 (の絶対値) が、閾値 B_0 以下である場合 ($|\sin L| \leq B_0$ 、ステップ 3 0 3 : NO) には、当該負荷角 L は、安定領域にあると判定して、図 8 (a) (b) に示されるように、その推定モータ回転角速度 (m_e) を第 1 の閾値 d_{lim1} とする通常の制限範囲を設定する (ステップ 3 0 4)。

50

【 0 1 0 2 】

一方、上記ステップ 3 0 3 において、負荷角 L の正弦成分（の絶対値）が、閾値 $B 0$ を超える場合（ $|\sin L| > B 0$ 、ステップ 3 0 3 : Y E S）には、安定領域外にあると判定する。そして、図 1 2 (a) (b) に示されるように、その第 1 の閾値 $d \text{ lim}1$ を、推定モータ回転角速度（ m_e ）から、想定される推定誤差「 N 」の最大値に対応する所定値 $N 2$ 離れた値に変更することにより、その制限範囲の移動（シフト）を実行する（ステップ 3 0 5 ）。

【 0 1 0 3 】

以上、本実施形態によれば、以下のような効果を得ることができる。

(1) 加算角調整演算部 5 8 は、トルク偏差 に基づく第 1 変化成分 d 及び推定モータ回転角速度（ m_e ）に基づく第 2 変化成分 d の加算値を加算角 a とする。また、加算角調整演算部 5 8 は、トルク偏差 に基づき上記第 1 変化成分 d が演算される方向に応じて、推定モータ回転角速度（ m_e ）に対応する第 1 の閾値 $d \text{ lim}1$ 、及び当該第 1 の閾値 $d \text{ lim}1$ よりも推定モータ回転角速度（ m_e ）から離れた値を有した第 2 の閾値 $d \text{ lim}2$ を設定する。そして、これら第 1 の閾値 $d \text{ lim}1$ と第 2 の閾値 $d \text{ lim}2$ とにより規定される制限範囲内に加算角 a を制限（補正）する。更に、加算角調整演算部 5 8 は、制御上の仮想的なモータ回転角としての制御角 c と実回転角（ m ）との乖離を示す負荷角 L を推定する。そして、その推定される負荷角 L が安定領域を超えて拡大した場合には、上記第 1 の閾値 $d \text{ lim}1$ を、推定モータ回転角速度（ m_e ）から、その想定される推定誤差「 N 」の最大値に対応する所定値 $N 2$ 離れた値に変更する。

【 0 1 0 4 】

即ち、拡大しようとする負荷角 L を縮小させるような上記トルク偏差 に基づく第 1 変化成分 d が演算される状況では、加算角制限における制限範囲の設定方向もまた、その第 1 変化成分 d が演算される方向と同じく、推定モータ回転角速度（ m_e ）の発生方向とは逆向きになる。そして、推定モータ回転角速度（ m_e ）を上記制限範囲における第 1 の閾値 $d \text{ lim}1$ とした場合、例えば、応答遅れ等により上記トルク偏差 に基づく第 1 変化成分 d が「 0 」となる最悪条件では、加算角 a に含まれる推定モータ回転角速度（ m_e ）の推定誤差「 N 」分だけ、負荷角 L の拡大が進むことになる。

【 0 1 0 5 】

しかしながら、上記構成によれば、負荷角 L が安定領域外にある場合には、その制限範囲を規定する第 1 の閾値 $d \text{ lim}1$ の値が、推定モータ回転角速度（ m_e ）から、その想定される推定誤差「 N 」の最大値に対応する所定値 $N 2$ 離れた値に変更される。そして、これにより、その加算角 a に含まれるモータ回転角速度 m_e の推定誤差「 N 」は、少なくとも、その負荷角 L が縮小する方向に補正される。

【 0 1 0 6 】

つまり、モータ制御の状態が安定的に維持された状況では、その加算角 a に含まれるモータ回転角速度 m_e の推定誤差「 N 」を許容することで、当該推定誤差「 N 」の補正により生ずるトルク変動が回避される。そして、負荷角 L が安定領域を超えて拡大した場合には、その推定誤差「 N 」を少なくとも負荷角 L が縮小する方向に補正することにより、当該負荷角 L の拡大によるモータ制御の不安定化が回避される。その結果、トルク変動の発生を抑えつつ、加算角に含まれるモータ回転角速度の推定誤差を補正して、安定的にレゾルパレス制御を実行することができる。

【 0 1 0 7 】

(2) 特に、上記のような加算角 a の制限処理によって、その加算角 a に含まれるモータ回転角速度 m_e の推定誤差「 N 」を補正することで、その補正を最小限度に抑えることができる。即ち、加算角 a が上記第 1 の閾値 $d \text{ lim}1$ 及び第 2 の閾値 $d \text{ lim}2$ により規定される制限範囲内にある場合には、その誤差補正が行われない。これにより、モータ 1 2 の個体差に起因した「誤差補正の実行により生ずる新たな誤差」の発生を抑制することができる。その結果、効果的にトルク変動の発生を抑えることができる。

【 0 1 0 8 】

10

20

30

40

50

なお、上記実施形態は以下のように変更してもよい。

・上記実施形態では、本発明を所謂コラム型の電動パワーステアリング装置（EPS）1に具体化した。しかし、これに限らず、所謂ピニオン型やラックアシスト型等のEPSに適用してもよい。

【0109】

・また、本発明は、EPS以外の用途に用いられるモータ制御装置に適用してもよい。尚、上記実施形態では、目標操舵トルク T^* と実際の操舵トルク T との間のトルク偏差を、「モータが発生すべき目標トルクと実トルクとの間のトルク偏差」として用いることとしたが、EPS以外の用途に適用する場合には、実際の「目標トルクと実トルクとの間のトルク偏差」を用いるとよい。

10

【0110】

・上記実施形態では、第1の閾値 d_{lim1} の変更（移動）に合わせて第2の閾値 d_{lim2} を当該方向に移動させることにより、その加算角制限の制限範囲を移動（シフト）させることとした。しかし、これに限らず、第2の閾値 d_{lim2} は、変更しなくともよく、また、第1の閾値 d_{lim1} とは異なる移動量を設定してもよい。

【0111】

・上記実施形態では、負荷角 L が安定領域内にある場合には、推定モータ回転角速度（ m_e ）を第1の閾値 d_{lim1} とすることとしたが、必ずしも厳密に両者が一致するものでなくともよい。

【0112】

・上記実施形態では、制御角 c から推定モータ回転角（ m_e ）を減算することにより負荷角 L を推定し（図13参照、 $L = c - m_e$ 、ステップ302）、その正弦成分（の絶対値 $|\sin L|$ ）に基づいて、当該負荷角 L が安定領域にあるか否かを判定した。

20

【0113】

しかし、これに限らず、以下の電圧方程式に基づいて、直接的に、負荷角 L の正弦成分を推定する構成であってもよい。

$$\sin L = (-V + R \cdot I + L \cdot (d/dt) \cdot I - m \cdot L \cdot I) / E \quad \dots (4)$$

但し、「 R 」はモータ抵抗、「 L 」はモータインダクタンス、そして、「 E 」は誘起電圧である。尚、誘起電圧「 E 」は、上記誘起電圧二乗和 E_{sq} の平方根（ $\sqrt{E_{sq}}$ ）から求めることができる。そして、式中のモータ回転角速度（ m ）には、推定モータ回転角速度（ m_e ）が代入される。

30

【0114】

尚、上記実施形態では、「 θ 軸」に対して「 90° 」位相を進めた位置に「 ϕ 軸」を定義したが、 θ 軸電流指令値 I^* を「 0 」に固定する場合（ $I^* = 0$ ）には、「 ϕ 軸」から「 90° 」位相が遅れた位置に「 θ 軸」を定義してもよく、その場合、これに合わせた電圧方程式を用いて、負荷角 L を推定すればよい。

【0115】

・また、より直接的に、負荷角 L を上記「安定領域」を規定する所定角度（ θ_0 ）と比較する構成としてもよい。尚、この場合、所定角度（ θ_0 ）は、例えば「 60° 」程度に設定するとよい。

40

【0116】

次に、以上の実施形態から把握することのできる技術的思想を効果とともに記載する。

（イ）前記モータ制御信号出力手段は、前記推定モータ回転角速度の推定誤差に対応する所定値分、前記第1の閾値を前記推定モータ回転角速度から離れた値に変更すること、を特徴とする。これにより、その加算角に含まれる推定誤差を補正して、負荷角の拡大によるモータ制御の不安定化を抑制することができる。

【0117】

（ロ）前記所定値は、前記モータの個体差に基づき想定される最大値であること、を特

50

徴とする。これにより、その加算角に含まれる推定誤差を少なくとも負荷角が縮小する方向に補正することができる。

【0118】

(八) 前記第1の閾値に合わせて前記第2の閾値を変更すること、を特徴とする。

【符号の説明】

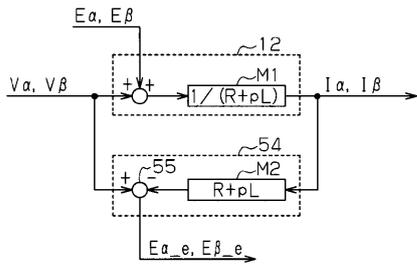
【0119】

1...電動パワーステアリング装置(EPS)、10...EPSアクチュエータ、11...ECU、12...モータ、12u, 12v, 12w...モータコイル、14...トルクセンサ、15...車速センサ、16...ステアリングセンサ、17...マイコン、18...駆動回路、21...電流センサ、23...モータレゾルバ、24...モータ制御部、25...第1制御部、26...第2制御部、27...PWM変換部、41...加算角演算部、42...制御角演算部、45...目標操舵トルク演算部、46...減算器、47...F/B制御部、50...回転角速度推定演算部、52...相電圧演算部、53... / 変換部、54...外乱オブザーバ、58...加算角調整演算部、60... / 変換部、61...電流指令値演算部、71... 軸電流増減値演算部、71a...第1マップ、71b...第2マップ、72...積算制御部、75a, 75b...F/B制御部、76...2相/3相変換部、78...回転角異常検出部、 I_u, I_v, I_w ...相電流値、 m ...回転角、 I_d ...d軸電流値、 I_q ...q軸電流値、 I_d^* ...d軸電流指令値、 I_q^* ...q軸電流指令値、 I_d , I_q ...電流偏差、 V_u^*, V_v^*, V_w^* ...相電圧指令値、...操舵トルク、*...目標操舵トルク、...トルク偏差、A1~A6...所定値、...軸電流増減値、 d ...第1変化成分、 I ...軸電流値、 I ...軸電流値、 V ...軸電圧値、 V ...軸電圧値、 E , E ...誘起電圧、 E_{e} , E_{e} ...誘起電圧推定値、 E_{sq} ...誘起電圧二乗和、 E_0 ...閾値、 m_e ...モータ回転角速度(推定モータ回転角速度)、 d ...第2変化成分、 a, a' ...加算角、 c ...制御角、 I ...軸電流値、 I ...軸電流値、 I^* ...軸電流指令値、 I^* ...軸電流指令値、 I , I ...電流偏差、 $V_u^{**}, V_v^{**}, V_w^{**}$...相電圧指令値、 s ...操舵角、 V ...車速、 m_e ...モータ回転角(推定モータ回転角)、 L ...負荷角、 B_0 ...閾値、 d_{lim1} ...第1の閾値、 d_{lim2} ...第2の閾値、 N_1 ...所定値、 m_r ...実モータ回転角速度、 N ...推定誤差、 N_2 ...所定値、 S_{rsf} ...回転角異常検出信号。

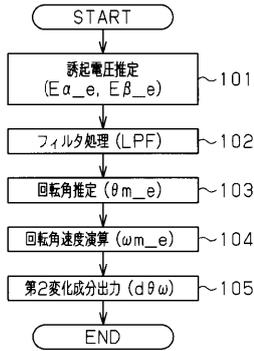
10

20

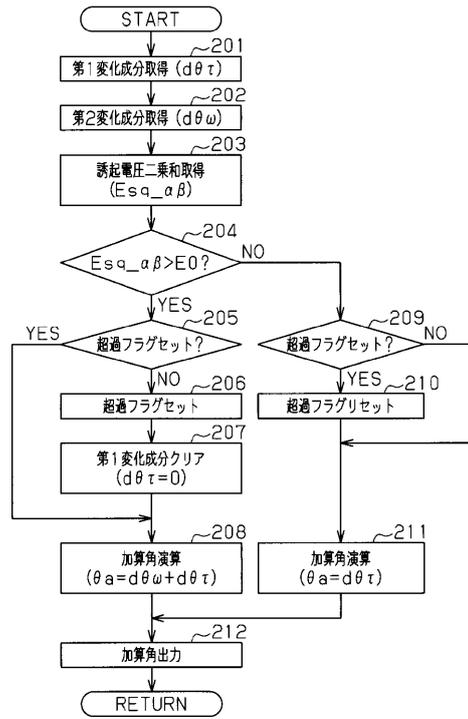
【 図 5 】



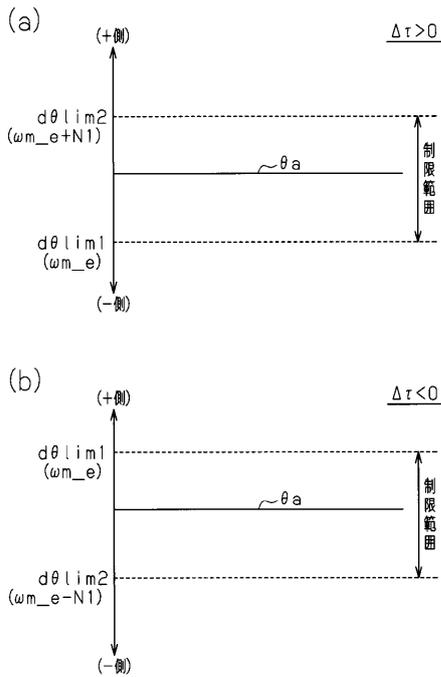
【 図 6 】



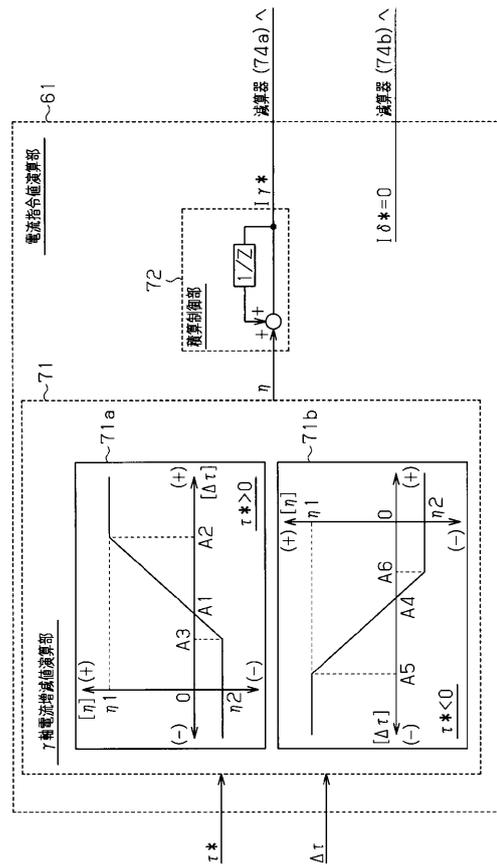
【 図 7 】



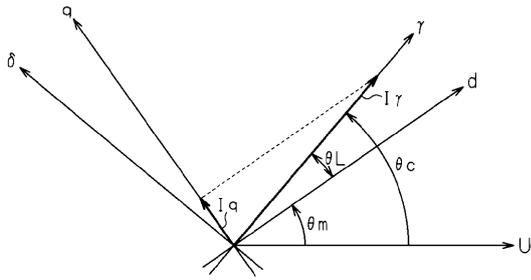
【 図 8 】



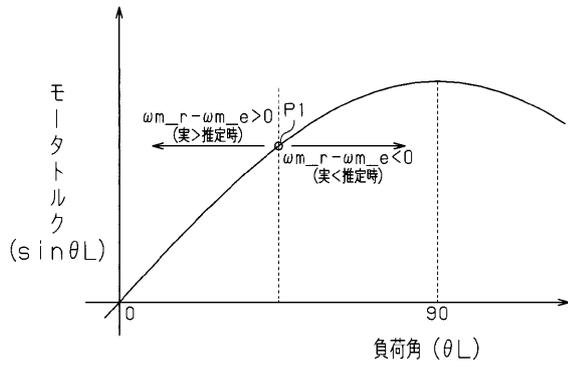
【 図 9 】



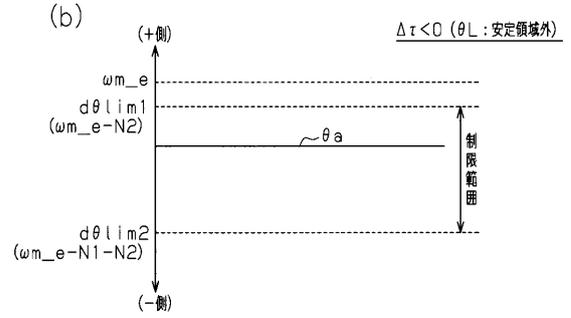
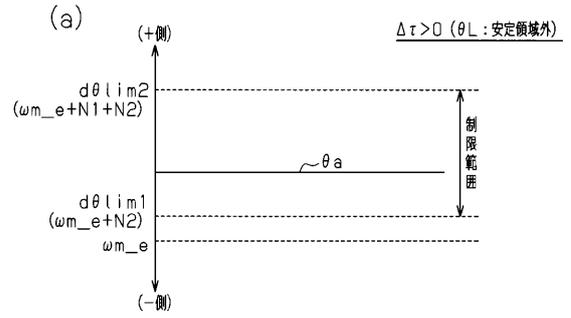
【 図 1 0 】



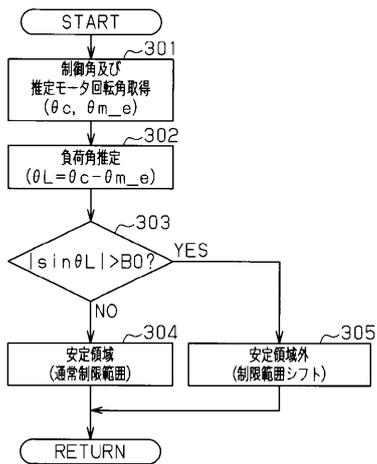
【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I テーマコード(参考)
B 6 2 D 119/00 (2006.01) B 6 2 D 119:00

Fターム(参考) 3D232 CC01 CC30 DA03 DA15 DA23 DA63 DA64 DC01 DC02 DC08
DC12 DD01 DD02 DD10 DD17 EB11 EC23 GG01
3D233 CA03 CA13 CA16 CA17 CA20 CA21
5H560 AA10 BB04 BB07 BB12 DA10 DA14 DB14 DB20 DC03 DC12
DC13 DC20 EB01 RR01 TT08 TT15 UA10 XA02 XA12 XA13