

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年1月2日(02.01.2020)



(10) 国際公開番号

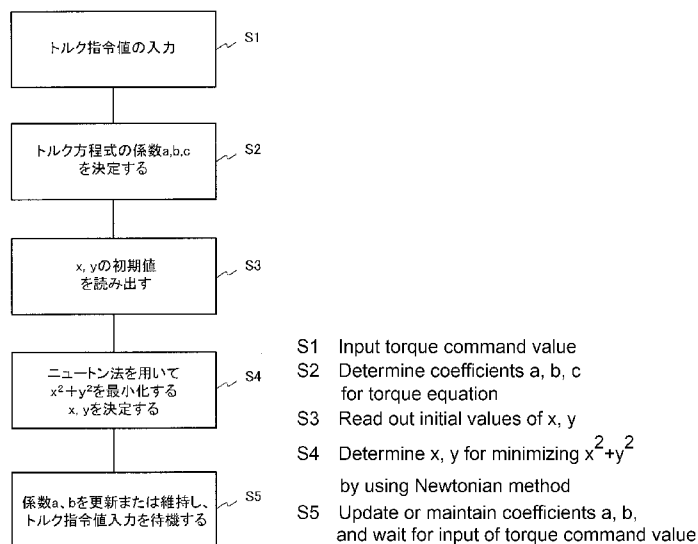
WO 2020/003772 A1

- (51) 国際特許分類:
H02P 21/22 (2016.01) *H02P 21/14* (2016.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/018905
- (22) 国際出願日: 2019年5月13日(13.05.2019)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2018-123968 2018年6月29日(29.06.2018) JP
- (71) 出願人: 日本電産株式会社 (**NIDEC CORPORATION**) [JP/JP]; 〒6018205 京都府京都市南区久世殿城町 3 3 8 番地 Kyoto (JP).
- (72) 発明者: 高野 祐一 (**TAKANO, Yuichi**); 〒6018205 京都府京都市南区久世殿城町 3 3 8 番地 日本電産株式会社内 Kyoto (JP). 福村 友博(**FUKUMURA, Tomohiro**); 〒6018205 京都府京都市南区久世殿城町 3 3 8 番地 日本電産株式会社内 Kyoto (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,

(54) **Title:** MOTOR CONTROL DEVICE, MOTOR CONTROL METHOD, AND MOTOR SYSTEM

(54) 発明の名称: モータ制御装置、モータ制御方法、およびモータシステム

[図3]



(57) **Abstract:** In an embodiment, the motor control device according to the present disclosure determines, on the basis of a torque command value, a command value for a current vector in a dq coordinate system which rotates in synchronization with a rotor. The motor control device is provided with: a processor; and a memory that stores a coefficient a which is defined according to the magnet interlinkage flux Ψ_a of a motor, a coefficient b which is defined according to the difference between a d-axis inductance L_d and a q-axis inductance L_q , and the number

QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第21条(3))

N_{pp} of pole pairs. When the torque command value is received, the processor executes (a) obtainment of a coefficient c which is defined according to the ratio of the torque command value to the number N_{pp} of pole pairs, (b) calculation of the values of x and y which satisfy a torque equation: $ax+2bxy-c=0$ and with which x^2+y^2 is minimized, and (c) determination of, as the command value for the current vector, a vector having x as a q -axis component and y as a d -axis component.

(57) 要約: 本開示のモータ制御装置は、実施形態において、ロータに同期して回転する d q 座標系における電流ベクトルの指令値をトルク指令値に基づいて決定するモータ制御装置であって、プロセッサと、モータの磁石鎖交磁束 Ψ_a によって規定される係数 a 、 d 軸インダクタンス L_d および q 軸インダクタンス L_q の差異によって規定される係数 b 、および極対数 N_{pp} を記録しているメモリとを備える。プロセッサは、トルク指令値を受け取ると、(a) 極対数 N_{pp} に対するトルク指令値の比によって規定される係数 c を求めること、(b) トルク方程式である $ax+2bxy-c=0$ を満足し、かつ x^2+y^2 を最小化する x および y の値を算出すること、(c) q 軸成分として x 、 d 軸成分として y を有するベクトルを電流ベクトルの指令値として決定することを実行する。

明 細 書

発明の名称：

モータ制御装置、モータ制御方法、およびモータシステム

技術分野

[0001] 本開示は、同期モータのためのモータ制御装置、モータ制御方法およびモータシステムに関する。

背景技術

[0002] 永久磁石同期モータなどの同期モータを制御するためにベクトル制御のアルゴリズムが用いられている。ベクトル制御では、速度指令値またはトルク指令値から、ロータの回転に同期して回転する $d-q$ 座標系における電流ベクトルを決定することが必要である。電流ベクトルを決定するに際して、電流に対するトルクを最大化する最大トルク／電流（MTPA：Maximum Torque Per Ampere）制御が実用化されている。MTPA 制御は、同一のトルクを発生させる電流ベクトルのなかで、大きさが最小となる電流ベクトルを選択する制御である。以下、本明細書において電流ベクトルの大きさを「ノルム」と称する。同一トルクで電流ベクトルのノルムを最小にするためには、電流ベクトルを規定する $d-q$ 座標平面上において、原点から定トルク曲線までの距離が最短になるように電流ベクトルを決定することが必要になる。

[0003] このような電流ベクトルの決定は、以下のようにして行われ得る。まず、トルクの多数の値と、それぞれの値を最小のノルムで実現する電流ベクトルとを対応づけたテーブル（またはマップ）を用意しておく。モータの制御時にトルク指令値を受け取ると、そのテーブルから、対応する電流ベクトルを読み出す。

[0004] 日本国公開公報特開 2016-100982 号公報に記載されているモータ制御装置は、テーブルのデータ量を減らすため、インダクタンスと電流ベクトルとの関係を規定するマップを備えている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：日本国公開公報：特開2016-100982号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 従来の最大トルク／電流（MTPA）制御は、後述するように、種々の課題を有している。本開示の実施形態は、最大トルク／電流制御に代わる最小電流／トルク制御を実現する、新しいモータ制御装置およびモータ制御方法を提供する。また、本開示の実施形態は、当該モータ制御装置を備えるモータシステムを提供する。

課題を解決するための手段

[0007] 本開示のモータ制御装置は、例示的な実施形態において、ロータに同期して回転するd-q座標系における電流ベクトルの指令値をトルク指令値に基づいて決定するモータ制御装置であって、デジタル演算回路と、モータの磁石鎖交磁束 Ψ_a によって規定される係数a、d軸インダクタンス L_d およびq軸インダクタンス L_q の差異によって規定される係数b、および極対数 N_p を記録しているメモリとを備える。前記デジタル演算回路は、トルク指令値を受け取ると、（a）極対数 N_p に対するトルク指令値の比によって規定される係数cを求めること、（b）トルク方程式である $ax + 2by - c = 0$ を満足し、かつ $x^2 + y^2$ を最小化するxおよびyの値を算出すること、（c）q軸成分としてx、d軸成分としてyを有するベクトルを電流ベクトルの指令値として決定することを実行する。前記デジタル演算回路は、 $x^2 + y^2$ を最小化するxおよびyの値を算出するとき、ニュートン法による逐次計算を行ってxおよびyの値を決定する。

[0008] 本開示のモータシステムは、例示的な実施形態において、上記のモータ制御装置と、前記モータ制御装置に接続されたモータ駆動回路と、前記モータ駆動回路に接続されたモータとを備える。

[0009] 本開示のモータ制御方法は、例示的な実施形態において、ロータに同期して回転する d q 座標系における電流ベクトルの指令値をトルク指令値に基づいて決定するモータ制御方法であって、（１）モータの極対数 N_p に対するトルク指令値の比によって規定される係数 c を求めること、（２）モータの磁石鎖交磁束 Ψ_a によって規定される係数を a 、 d 軸インダクタンス L_d および q 軸インダクタンス L_q の差異によって規定される係数を b とするとき、トルク方程式である $a x + 2 b x y - c = 0$ を満足し、かつ $x^2 + y^2$ を最小化する x および y の値を算出すること、（３） q 軸成分として x 、 d 軸成分として y を有するベクトルを電流ベクトルの指令値として決定することを含み、 $x^2 + y^2$ を最小化する x および y の値を算出するとき、ニュートン法による逐次計算を行って x および y の値を決定する。

発明の効果

[0010] 本開示の実施形態によると、従来の電流ベクトルからトルクを導出する順解法ではなく、トルクから電流ベクトルを導出する逆解法のアルゴリズムを実行するため、過大なデータ量を要するテーブルまたはマップに頼ることなく、トルク指令値から電流指令値への変換が可能になる。

図面の簡単な説明

[0011] [図1]図1は、本開示によるモータ制御システムの限定的ではない例示的な実施形態の構成を模式的に示す図である。

[図2]図2は、本開示によるモータ制御装置のハードウェア構成の例を示す図である。

[図3]図3は、本開示の実施形態における処理の手順の例を示すフローチャートである。

[図4]図4は、本開示によるモータ制御装置の実施形態における構成例を示すブロック図である。

発明を実施するための形態

[0012] 本開示の実施形態を説明する前に、まず電流ベクトルからトルクを導出する「順解法（Forward MTPA）」と、トルクから電流ベクトルを導

出する「逆解法 (Inverse MTPA)」を説明する。

[0013] <電流ベクトルからトルクを導出する順解法>

ベクトル制御理論では、ロータの回転と同期して回転する d q 座標系で電圧、電流、磁束、インダクタンスなどの諸量が表現され得る。3 相交流同期モータで発生するトルク T は、数式 1 によって表される。

[数1]

$$T = N_{pp} [\Psi_a i_q + (L_q - L_d) i_d i_q]$$

ここで、 N_{pp} は極対数、 Ψ_a はロータの永久磁石による鎖交磁束である。 L_d および L_q は、それぞれ、d 軸インダクタンスおよび q 軸インダクタンス、 i_d および i_q は、それぞれ、d 軸電流および q 軸電流である。トルクの単位はニュートン・メートル [Nm]、インダクタンスの単位はヘンリ [H]、電流の単位はアンペア [A] である。数式 1 は、3 相のステータ巻線に、それぞれ、 $2\pi/3$ の位相差で正弦波電流が流れることを前提として導出されている。また、インダクタンスおよび鎖交磁束の空間高調波成分は無視されている。これらの高調波成分が無視できない場合、トルクには小さな脈動が表れるが、高調波成分は平均トルクに影響を及ぼさないため、その平均のトルク (定常成分) は数式 1 のトルクに等しい。

[0014] 数式 1 の右辺における第 1 項は「マグネットトルク」、第 2 項は「リラクタンストルク」である。 L_d および L_q が同じ大きさである非突極性のモータ、例えば表面磁石型モータ (SPM) では、トルクは第 1 項のマグネットトルクのみである。これに対して、永久磁石がロータに取り付けられていないモータ、例えばスイッチトリラクタンスモータ (SRM) では、トルクは第 2 項のリラクタンストルクのみである。ロータの内部に永久磁石が埋め込まれた埋込型モータ (IPM) のトルクは、マグネットトルクおよびリラクタンストルクの合計の値を有する。

[0015] ベクトル制御を実行するモータ制御装置は、目的とするトルクの値 (トルク指令値) が与えられると、そのトルクを実現するために必要な電流ベクトル

を決定することが必要になる。電流ベクトルは、 d q 座標系で定義される d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q を成分とするベクトルであり、ノルム I_a および q 軸からの進み位相角 β_1 によっても表現され得る。以下、電流ベクトルのノルムを「電流ノルム」、電流ベクトルの q 軸からの進み位相角を「電流位相角」、または単に「位相角」と呼ぶ場合がある。

[0016] d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q は、それぞれ、ノルム I_a および位相角 β_1 を用いて下記の数式 2 に示すように表される。

[数2]

$$\begin{aligned} i_q &= I_a \cos \beta_1 \\ i_d &= I_a \sin \beta_1 \end{aligned}$$

[0017] この関係を用いると、トルク T を以下の数式 3 によって表わすこともできる。

[数3]

$$T = N_{pp} \left[\Psi_a I_a \cos \beta_1 + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta_1 \right]$$

[0018] 効率的なモータ制御は、高効率制御と呼ばれており、その代表例は M T P A (Maximum Torque Per Ampere) 制御である。M T P A 制御では、ある電流ノルムに対して最大のトルクが得られるように電流位相角を決める。電流ノルムは銅損に比例するため、M T P A は所定の銅損に対して最大のトルクが得られるように電流位相角を決める方法とも言える。ただし、現実のモータには、銅損以外にも鉄損や風損などの損失があるため、M T P A は必ずしも最適効率解を与えるものではない。しかし、M T P A はモデル化が容易であるため、広く利用されている。特に銅損が支配的な低速・高トルク領域では、M T P A は最適解に十分近い解を与える。

[0019] M T P A 問題とは、電流ノルム I_a が一定であるという条件のもと、トルク T を最大にする電流位相角 β_1 を求めることである。数式 3 から明らかなように

、 $L_q - L_d = 0$ であれば、与えられたトルク T を実現する電流位相角 β_1 は一義的に定まり、 $\beta_1 = 0^\circ$ である。一方、リラクタン্সモータのようにロータが永久磁石を含まない場合、永久磁石による鎖交磁束 Ψ_a がゼロであるため、電流位相角 $\beta_1 = 45^\circ$ でトルク T は最大になる。このように、マグネットトルクおよびリラクタンストルクの一方を無視できるモータでは、トルク T から、そのトルク T を実現する電流ベクトルが一義的に定まる。しかし、例えば埋め込み型磁石のように、マグネットトルクおよびリラクタンストルクの両方の寄与がある場合、与えられた大きさのトルク T を実現する電流ベクトルは無数に存在する。このため、MTPA制御を行うためには、電流ノルム I_a を固定した状態でトルク T を最大にする電流位相角 β_1 を見つけることが必要になる。

[0020] トルク T を最大にする電流位相角 β_1 は、数式3を電流位相角 β_1 で微分した数式4を0にする。

[数4]

$$\frac{\partial T_e}{\partial \beta_1} = N_{pp} \frac{\partial}{\partial \beta_1} \left[\Psi_a I_a \cos \beta_1 + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta_1 \right]$$

[0021] 数式4の右辺をゼロにすると、数式5が得られる。

[数5]

$$-\Psi_a I_a \sin \beta_1 + (L_q - L_d) I_a^2 \cos 2\beta_1 = 0$$

[0022] L_q と L_d が異なるとき、数式5を解くことにより、以下のように電流位相角 β_1 が定まる。

[数6]

$$\sin \beta_1 = \frac{-\Psi_a + \sqrt{\Psi_a^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d) I_a}$$

[0023] もう一つの解き方として、 I_q および I_d の一方が与えられた場合において他

方を求める方法がある。この方法によると、それぞれ、以下の式に示される解 I_q 、 I_d が得られる。

[数7]

$$I_q = \sqrt{\frac{\Psi_a}{(L_q - L_d)} I_d + I_d^2}$$

$$I_d = -\frac{\Psi_a}{2(L_q - L_d)} + \sqrt{\frac{\Psi_a^2}{4(L_q - L_d)^2} + I_q^2}$$

[0024] いずれの方法でも、電流ベクトルを規定する2つの値の一方を固定した上で、MTPA条件を用いて他方の値を算出している。従来のMTPA制御では、例えばトルク指令値 T から電流ノルム I_a を仮決めし、その電流ノルム I_a に対する電流位相角 β_1 を求めている。この方法では、最初に電流ノルム I_a を恣意的に決めるため、必ずしもトルク指令値を発生する最小電流を得られないという課題がある。その対策として、繰り返し計算をする方法がある。しかし、これでは計算時間が増えてしまうととも、何回計算をすれば十分な精度が得られるのかも不明であるため、実用的ではない。従来の方法は、逆解法で解くべき問題を順解法で解こうとしている。

[0025] このため、上記の計算をオンラインで実行する代わりに、ルックアップテーブルを参照してトルク T を実現する最小の電流を求めることが行われている。具体的には、多数の異なるトルク T と、各トルク T を最小の電流で実現する「電流ノルムおよび電流位相角」（または「 I_d および I_q 」）の2変数とを対応づけたテーブルを事前計算によってオフラインで作成し、メモリ内に記憶させる。オンラインでは、トルク T の指令値が与えられると、モータ制御装置がテーブルを参照して「電流ノルムおよび電流位相角」（または「 I_d および I_q 」）の2変数を読み出す。事前計算はソルバー計算等を用いて行うことができる。この方法によれば、モータごとにテーブルの全体を作り直す必要がある。また、モータが同じであって、永久磁石磁束またはインダクタンスなどが変化すると、テーブルを書き換える必要があるため、モータ

タの温度特性変化および経時変化にも対応できない。

[0026] モータパラメータの変化に対応するため、様々なパラメータに対応した多数のテーブルを事前に用意しておくことが理論的には可能である。しかし、膨大なデータが必要になるため、実用的ではない。例えば、電流ノルム I_a および電流位相角 β_1 のデータをそれぞれ 16 ビットとすると、1 変数の入力（1 個のトルク値）に対する電流ベクトルを表現するために 4 バイトのデータが必要である。トルク分解能を 12 ビット分（4096）として、各トルク値に対応する電流ノルム I_a および電流位相角 β_1 のデータを用意した場合、データ量は 16,384 k バイト（＝4 バイト $\times 2^{12}$ ）に達する。安価なマイコンは、32 k バイトから 128 k バイト程度の ROM 容量を有しているため、16 k バイトの容量がこのテーブルに消費されるのは不経済である。

[0027] テーブル量を増やすと、容量が急増する。例えばトルク分解能を 24 ビット、電流 32 ビットに拡張してテーブルを作成した場合、データ量は約 134 M バイト（＝8 バイト $\times 2^{24}$ ）という膨大な量になる。この規模ではテーブルを作成して実装することは困難である。

[0028] テーブルに頼らず、中央演算処理ユニット（CPU）で計算させる場合を考える。CPU のクロック数が高くなるほど、CPU コスト（マイコンコスト）が上昇する。また、モータはリアルタイムで駆動しているため、キャリア周波数が 20 kHz の PWM 信号で駆動する場合、50 μ sec ごとに信号を更新する必要がある。MTPA 計算は、この周期で更新する必要はないが、電気時定数を考えると、1 msec $\sim$ 10 msec で更新する必要がある。よって、1 回の計算に使えるクロック数が少なくなる。MTPA 制御計算で多くのクロック数を使ってしまうと、その分の CPU コストの上昇を招く。ところが、MTPA 制御自体はモータ駆動に必須ではないので、これだけでマイコンのグレードを上げるのは許容されない。

[0029] <トルクから電流ベクトルを導出する逆解法>

本開示の実施形態において、モータ制御装置はトルク指令値を受け取ると、以下のモータ制御方法の各処理を実行することにより、電流ベクトルを導

出する。

[0030] (1) モータの極対数 N_{pp} に対するトルク指令値の比によって規定される係数 c を求める。

[0031] (2) モータの磁石鎖交磁束 Ψ_a によって規定される係数を a 、 d 軸インダクタンス L_d および q 軸インダクタンス L_q の差異によって規定される係数を b とするとき、トルク方程式である $ax + 2bxy - c = 0$ を満足し、かつ $x^2 + y^2$ を最小化する x および y の値を算出する。

[0032] (3) q 軸成分として x 、 d 軸成分として y を有するベクトルを電流ベクトルの指令値として決定する。

[0033] なお、 $x^2 + y^2$ を最小化する x および y の値を算出するとき、ニュートン法による逐次計算を行って x および y の値を決定する。

[0034] 以下、上記の処理を詳細に説明する。

[0035] 極対数 N_{pp} に対するトルク指令値 T の比は、 T / N_{pp} である。ここでは、最も簡単な例として、 $c = T / N_{pp}$ とおく。また、磁石鎖交磁束 Ψ_a によって規定される係数 a については、 $a = \Psi_a$ とおく。 d 軸インダクタンス L_d および q 軸インダクタンス L_q の差異によって規定される係数 b については、 $b = (L_q - L_d) / 2$ とおく。また、電流ベクトルの q 軸成分については、 $i_q = x$ とおき、電流ベクトルの d 軸成分については、 $i_d = y$ とおく。

[0036] 上記の a 、 b 、 c 、 x 、および y を用いると、トルク方程式を規定する数式 1 は、以下の式に変形され得る。

[数8]

$$\begin{aligned} 0 &= \Psi_a i_q + (L_q - L_d) i_d i_q - \frac{T}{N_{pp}} \\ &= ax + 2bxy - c \end{aligned}$$

[0037] 数式 8 については、両辺に任意の数、例えば極対数 N_{pp} を乗算しても等式は成立する。また、トルクの基準値で両辺を割っても等式は成立する。このため、上記の等式が成立するように、 a 、 b 、および c を規格化することも可能である。例えば、基準電圧 V_0 [V]、基準電流 I_0 [A]、基準電気角速

度 ω 。[rad/sec]をモータごとに異なる電圧方程式に代入することにより、基準トルク T_0 を求めることができる。数式8のトルク T が基準トルク T_0 に等しいとき $c = 1$ となるように、 a および b を規格化してもよい。以下、 a 、 b 、および c のパラメータは、それぞれ、 $a = \Psi_a$ 、 $(L_q - L_d) / 2$ 、および T / N_{pp} に限定されず、それらの規格値であってもよい。そのような規格値 a 、 b 、および c も、それぞれ、前述した「・・・によって規定される係数」に該当する。

[0038] 上記の定義から明らかなように、係数 c は、トルク T に依存するパラメータであるため、トルク指令値が与えられると、係数 c の大きさが決まる。また、係数 a 、 b は、モータによって固有の大きさを有する。このため、「逆解法」とは、モータに固有の係数 a 、 b のもとで、係数 c の大きさが指定されたとき、数式8を満足する x および y のうちで、ノルム($x^2 + y^2$)を最小にする x 、 y を求めることである。本開示の実施形態では、ニュートン法によって x および y を決定する。具体的には、数式8の拘束条件のもとで、ノルム($x^2 + y^2$)を最小にする x および y を、ニュートン法による逐次計算を実行して決定する。

[0039] <3変数 x 、 y 、 λ のニュートン法>

この例においては、媒介変数 λ を用いたラグランジュ未定乗数法により、解を求める。具体的には、数8の拘束条件のもとで、 $x^2 + y^2$ を最小化する x 、 y 、 λ を求める。 $x^2 + y^2$ が最小になるとき、以下の数式9に示す $f(x, y, \lambda)$ の偏微分は、ゼロになる。

[数9]

$$f(x, y, \lambda) = x^2 + y^2 - \lambda(ax + 2bxy - c) = 0$$

[0040] このことは、数式10で表される。

[数10]

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x - \lambda a - 2\lambda by \\ 2y - 2\lambda bx \\ ax + 2bxy - c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0041] 後述する説明で登場する微分の式を簡単にするため、数式10を以下の数式11に書き換える。

[数11]

$$\begin{bmatrix} F_1(x, y, \lambda) \\ F_2(x, y, \lambda) \\ F_3(x, y, \lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x - \lambda a - 2\lambda by \\ 2y - 2\lambda bx \\ ax + 2bxy - c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0042] 上記の式を満足する x 、 y 、 λ の値を求めるため、それぞれについて、初期値 x_0 、 y_0 、 λ_0 を与える。初期値としては、前回のトルク指令値が与えられたときに求めた x 、 y 、 λ の解を用いてもよい。これらの初期値が、今回の計算に用いる係数 a 、 b 、 c のもとでも、真の解であれば、以下の式が成立する。

[数12]

$$\begin{bmatrix} F_1(x_0, y_0, \lambda_0) \\ F_2(x_0, y_0, \lambda_0) \\ F_3(x_0, y_0, \lambda_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x_0 - \lambda_0 a - 2b\lambda_0 y_0 \\ 2y_0 - 2b\lambda_0 x_0 \\ ax_0 + 2bx_0 y_0 - c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0043] しかし、現実には、初期値が上記の式を満たすことは稀である。ニュートン法による逐次計算を続ける。このため、初期値からのシフト量として、以下の式を満足する Δx 、 Δy 、 $\Delta \lambda$ を用いる。

[数13]

$$\begin{aligned}
-\begin{bmatrix} F_1(x_0, y_0, \lambda_0) \\ F_2(x_0, y_0, \lambda_0) \\ F_3(x_0, y_0, \lambda_0) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F_1(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial F_1(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \\ \frac{\partial F_2(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F_2(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial F_2(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \\ \frac{\partial F_3(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F_3(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial F_3(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial x} & \frac{\partial F_1(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial y} & \frac{\partial F_1(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial F_2(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial x} & \frac{\partial F_2(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial y} & \frac{\partial F_2(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial F_3(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial x} & \frac{\partial F_3(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial y} & \frac{\partial F_3(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

[0044] Δx 、 Δy 、 $\Delta \lambda$ について、以下の近似式が成立する。

[数14]

$$\begin{aligned}
&F_1(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, \lambda_0 + \Delta \lambda) \\
&\approx F_1(x_0, y_0, \lambda_0) + \frac{\partial F_1(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F_1(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial F_1(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \\
&= F_1(x_0, y_0, \lambda_0) - F_1(x_0, y_0, \lambda_0) = 0
\end{aligned}$$

[数15]

$$\begin{aligned}
&F_2(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, \lambda_0 + \Delta \lambda) \\
&\approx F_2(x_0, y_0, \lambda_0) + \frac{\partial F_2(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F_2(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial F_2(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \\
&= F_2(x_0, y_0, \lambda_0) - F_2(x_0, y_0, \lambda_0) = 0
\end{aligned}$$

[数16]

$$\begin{aligned}
&F_3(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, \lambda_0 + \Delta \lambda) \\
&\approx F_3(x_0, y_0, \lambda_0) + \frac{\partial F_3(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F_3(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial F_3(x_0, y_0, \lambda_0)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \\
&= F_3(x_0, y_0, \lambda_0) - F_3(x_0, y_0, \lambda_0) = 0
\end{aligned}$$

[0045] 数式 1 1 を用いて数式 1 3 を書き換えると、以下の式が得られる。

[数17]

$$-\begin{bmatrix} F_1(x_0, y_0, \lambda_0) \\ F_2(x_0, y_0, \lambda_0) \\ F_3(x_0, y_0, \lambda_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -2b\lambda_0 & -a - 2by_0 \\ -2b\lambda_0 & 2 & -2bx_0 \\ a + 2by_0 & 2bx_0 & 0 \end{bmatrix}$$

[0046] 上記の式から、 Δx 、 Δy 、 $\Delta \lambda$ が求められる。具体的には、右辺の行列の逆行列を用いて算出することができる。次に、以下の式に示すように、 Δx

、 Δy 、 $\Delta \lambda$ を用い、解の候補として x_1 、 y_1 、 λ_1 を求める。

[数18]

$$\begin{bmatrix} x_0 + \Delta x \\ y_0 + \Delta y \\ \lambda_0 + \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \lambda_1 \end{bmatrix}$$

[0047] この計算を繰り返すことにより、数式11の関係をほぼ満足する x 、 y 、 λ が得られる。言い換えると、数式8の拘束条件を満足し、かつ、 $x^2 + y^2$ を最小化する電流ベクトルの x 成分および y 成分を決定することができる。

[0048] なお、係数 a 、 b は、モータに固有のパラメータであり、短時間では変動しない。一方、係数 c は、トルク指令値に応じて変化する。しかし、例えば数ミリ秒程度の短い時間スケールでは、係数 c の変化も小さい。このため、1秒以下の短いサイクルでトルク指令値が順次入力される場合、新しいトルク指令値を実現するための電流ベクトル(x 、 y)は、前回のトルク指令値を実現するための電流ベクトル(x 、 y)に近似している。このため、前回の計算の結果として得られた x 、 y 、 λ を初期値 x_0 、 y_0 、 λ_0 として用いると、繰り返し計算の回数は1回で済むことも多い。繰り返し計算の回数を、2回または3回に設定してもよい。このことは、後述する変数が2または1のニュートン法を用いる場合も同様である。

[0049] <2変数 x 、 y のニュートン法>

数式11に示される x 、 y 、 λ を未知数とする3元連立方程式から、 λ を消去すると、以下の数式19が得られる。

[数19]

$$\begin{bmatrix} G_1(x,y) \\ G_2(x,y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax + 2bxy - c \\ 2bx^2 - 2by^2 - ay \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0050] 前述した3変数のニュートン法と同様にして、逐次計算を行うときの初期値 x_0 、 y_0 に加算すべき Δx 、 Δy を求める。 Δx 、 Δy は、以下の式で表される。

[数20]

$$-\begin{bmatrix} G_1(x_0, y_0) \\ G_2(x_0, y_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_1(x_0, y_0)}{\partial x} & \frac{\partial G_1(x_0, y_0)}{\partial y} \\ \frac{\partial G_2(x_0, y_0)}{\partial x} & \frac{\partial G_2(x_0, y_0)}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$$

[0051] 上記の式は、具体的には、以下の式で表される。

[数21]

$$-\begin{bmatrix} G_1(x_0, y_0) \\ G_2(x_0, y_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a + 2by_0 & 2bx_0 \\ 4bx_0 & -a + 4by_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$$

[0052] 上記の式における右辺に行例の逆行列を用いると、 Δx 、 Δy は、以下の式で表される。

[数22]

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \frac{1}{(-a + 4by_0)(a + 2by_0) - 8b^2x_0^2} \begin{bmatrix} -a + 4by_0 & -2bx_0 \\ -4bx_0 & a + 2by_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -G_1(x_0, y_0) \\ -G_2(x_0, y_0) \end{bmatrix}$$

[0053] この Δx 、 Δy を用いて、逐次計算を行うことにより、電流ベクトルを決定することができる。[0054] <1 変数 x のニュートン法>

数式 19 に示す 2 元連立方程式から y を消去すると、 x について、以下の 4 次方程式が得られる。

[数23]

$$H(x) = 4b^2x^4 + acx - c^2 = 0$$

[0055] この場合、 Δx は、以下の式から求められる。

[数24]

$$H(x_0) = \frac{\partial H(x)}{\partial x} \Delta x$$

[0056] 上記の式は、具体的には以下の式で表される。

[数25]

$$H(x_0) = (16b^2x_0^3 + ac)\Delta x$$

[0057] Δx は、以下の通りである。

[数26]

$$\Delta x = \frac{H(x_0)}{(16b^2x_0^3 + ac)}$$

[0058] 逐次計算により、 x を決まると、数式19から y が求められる。

[0059] 上記のいずれの方法を用いても、電流ベクトルを決定することができる。計算量は、3変数のニュートン法による場合よりも、2変数または1変数のニュートン法による場合の方が少ない。

[0060] このように、本開示の実施形態では、トルク指令値 T が与えられると、最小のノルムでトルク指令値 T を実現する電流ベクトルをニュートン法によって決定することが可能になる。本開示の実施形態によれば、膨大なデータ量を有するテーブルを前もって用意してメモリ内に記憶させる必要がない。モータ制御装置は、上述の式に基づく計算を1回行うだけで電流ベクトルを決定することができ、理論上の誤差もない。トルク指令値が更新されるごとに上記の計算を行えば、すぐにノルムが最小化された電流ベクトルを求めることができる。

[0061] <例示的な実施形態>

以下、添付の図面を参照しながら、本開示によるモータ制御装置の一例を説明する。なお、必要以上に詳細な説明は省略する場合がある。例えば、既によく知られた事項の詳細説明や実質的に同一の構成に対する重複説明を省略する場合がある。これは、以下の説明が不必要に冗長になるのを避け、当業者の理解を容易にするためである。本発明者らは、当業者が本開示を十分に理解するために添付図面および以下の説明を提供する。これらによって特許請求の範囲に記載の主題を限定することを意図しない。

[0062] 図1を参照する。図1は、本開示の実施形態にかかるモータシステムの概略構成を示す図である。図1に示されるモータシステム1000は、ロータ30およびステータ32を備える永久磁石同期モータ（以下、単に「モータ」と称する）300と、モータ300のステータ32が有する巻線34に電圧を印加するモータ駆動回路200と、巻線34を流れる電流を測定する電流センサ250と、モータ駆動回路200に接続されたモータ制御装置100とを備える。

[0063] 本実施形態におけるロータ30は、コア中に埋め込まれた複数の永久磁石を有している。本開示の実施形態は、この例に限定されない。ロータ30は、永久磁石を有しないでリラクタンストルクのみを発生して回転してもよい。ロータ30は多様な形態をとり得る。

[0064] モータ駆動回路200は、インバータを主回路として有する電力変換器である。主回路は、複数の電力半導体素子（図1において不図示）を構成要素として含む。モータ制御装置100は、モータ駆動回路200内における個々の電力半導体素子をスイッチングさせる制御信号（ゲート信号）を生成して出力する。図示される例において、電流センサ250は、カレントトランス（CT: Current Transformer）であるが、電流センサ250の例は、これに限定されない。モータ駆動回路200が1個または複数個のシャント抵抗を有する場合、各シャント抵抗の電圧降下を測定することにより、巻線34を流れる電流を測定することができる。

[0065] 図示されているモータ制御装置100は、「デジタル演算回路」として機能するプロセッサ10と、プロセッサ10の動作を制御するソフトウェアプログラムが記録されたメモリ20とを備えている。プロセッサ10は、例えばCPUまたはデジタル信号処理プロセッサなどの集積回路（IC）チップであり得る。メモリ20は、プロセッサ10の動作を制御するコンピュータプログラムを格納した記録媒体である。メモリ20は、単一の記録媒体である必要はなく、複数の記録媒体の集合であり得る。メモリ20は、後述するように、例えばRAMなどの半導体揮発性メモリ、フラッシュROMなどの半

導体不揮発性メモリ、およびハードディスクドライブなどのストレージ装置を含み得る。メモリ20の少なくとも一部は、取り外し可能な記録媒体であってもよい。

[0066] 図1のモータ制御装置100は、ロータ30の回転に同期して回転するdq座標系における電流ベクトルの指令値をトルク指令値に基づいて決定する。

[0067] モータの磁石鎖交磁束 Ψ_a によって規定される係数a、d軸インダクタンス L_d およびq軸インダクタンス L_q の差異によって規定される係数b、および極対数 N_{pp} がメモリ20に記憶されている。

[0068] モータ制御装置100のプロセッサ（デジタル演算回路）10は、トルク指令値を受け取ると、以下の処理を実行する。

（a）極対数 N_{pp} に対するトルク指令値の比によって規定される係数cを求めること、

（b）トルク方程式である $ax + 2by - c = 0$ を満足し、かつ $x^2 + y^2$ を最小化するxおよびyの値を算出すること、

（c）q軸成分としてx、d軸成分としてyを有するベクトルを電流ベクトルの指令値として決定すること。

[0069] 更にプロセッサ100は $x^2 + y^2$ を最小化するxおよびyの値を算出するとき、ニュートン法による逐次計算を行ってxおよびyの値を決定する。

[0070] これらの処理の内容は、前述した通りであり、ここでは同じ説明を繰り返さない。なお、トルク指令値は、外部にある上位のコンピュータまたはコントローラからプロセッサ10に入力され得る。また、コンピュータまたはコントローラからプロセッサ10に与えられた信号に基づいてプロセッサ10の内部でトルク指令値が生成されてもよい。

[0071] 本開示の実施形態において、プロセッサ10は、 $f(x)$ を最小化するxおよびyの値を算出するとき、ニュートン法による逐次計算を行ってxおよびyの値を求める。このため、大容量のテーブルデータも必要なくなる。

[0072] 本実施形態において、メモリ20は、係数aおよび／または係数bについて

、モータ300の状態に応じて異なる複数の値を含むルックアップテーブルを記憶している。モータ300の状態は、モータの動作温度、磁気飽和の程度、ロータ30が永久磁石を有する場合における永久磁石の減磁の程度、および使用期間を含み得る。

[0073] プロセッサ10は、磁石鎖交磁束 Ψ_a 、d軸インダクタンス L_d 、および／またはq軸インダクタンス L_q の変化に応じて、メモリ20に記録されている係数aおよび／または係数bの値を更新してもよい。前述したように、係数aは、磁石鎖交磁束 Ψ_a によって規定されるため、モータ300の永久磁石の強さに依存する。永久磁石の強さは、モータ動作中の熱減磁によって低下し得る。このため、永久磁石の強さが変化した場合、その変化に基づいて係数aの値を更新してもよい。例えば、モータの動作温度または巻線電流を検知し、温度および／または巻線電流に応じて係数aを変化させても良い。温度および／または巻線電流と係数aとの関係は、テーブルデータとしてメモリに記憶され得る。また、この関係を近似する関数をメモリに記憶させておいても良い。係数bは、d軸インダクタンス L_d およびq軸インダクタンス L_q の差異によって規定されるため、磁気飽和によってインダクタンスが変化する場合、その変化に基づいて係数bを更新してもよい。巻線電流と係数bとの関係もテーブルデータとしてメモリに記憶され得る。

[0074] 本実施形態において、プロセッサ10は、電流ベクトルの測定値を受け取ると、電流ベクトルの測定値と電流ベクトルの指令値の間にある差異に基づいて電圧ベクトルの指令値を決定する。

[0075] 本実施形態におけるモータ300は、埋め込み型の永久磁石同期モータであるが、本開示におけるモータは、この例に限定されない。

[0076] 図2は、本開示によるモータモジュールにおけるモータ制御装置100のハードウェア構成の例を示す図である。

[0077] モータ制御装置100は、例えば図2に示されるハードウェア構成を有していても良い。この例におけるモータ制御装置100は、互いにバス接続されたCPU154、PWM回路155、ROM（リードオンリーメモリ）15

6、RAM（ランダムアクセスメモリ）157、およびI/F（入出力インタフェース）158を有している。図示されていない他の回路またはデバイス（AD変換器など）がバスに接続されていてもよい。PWM回路155は、図1のモータ駆動回路200にPWM信号を与える。CPU154の動作を規定するプログラムおよびデータは、ROM156およびRAM157の少なくとも一方に記憶されている。このようなモータ制御装置100は、例えば32ビットの汎用的なマイクロコントローラによって実現され得る。そのようなマイクロコントローラは、例えば1個または複数の集積回路チップから構成され得る。

[0078] モータ制御装置100が行う各種の動作の詳細については、後述する。典型的には、モータ制御装置100が行う各種の動作は、メモリ20に記憶されているプログラムによって規定されている。プログラムの内容の一部または全部を更新することにより、モータ制御装置100の動作の一部または全部を変更することが可能である。そのようなプログラムの更新は、プログラムを格納した記録媒体を用いて行ってもよいし、有線または無線の通信によって行っても良い。通信は、図2のI/F158を用いて行うことができる。図2に示されるCPU154の演算量を低減するために、モータ制御装置100が行う各種の動作の一部、例えばベクトル演算の一部が、その演算専用のハードウェア回路によって実行されてもよい。

[0079] 次に、図3を参照して、本開示の実施形態におけるモータ制御動作の基本的なフローを説明する。

[0080] まず、ステップS1において、CPU154は、トルク指令値の入力を受け取る。次に、ステップS2において、CPU154は、上記のトルク方程式（ $ax + 2by - c = 0$ ）を規定する係数a、b、cを決定する。係数cは、ステップS1で受け取ったトルク指令値に依存する大きさを有する。ステップS3において、CPU154は、前述したニュートン法による逐次計算のためのxおよびyの初期値をメモリから読み出す。初期値の例は、前回のトルク指令値に基づいて計算したxおよびyの値である。ステップS4に

において、CPU154は、前述したニュートン法を用いて $x^2 + y^2$ を最小化する x および y の値を決定する。すなわち、 d 軸電流指令値および q 軸電流指令値を決定する。ステップS5において、CPU154は、係数 a 、 b の値を更新または維持する。更新は、モータの状態が変化した場合に実行され得る。

[0081] 次に、図4を参照して、本開示の実施形態におけるモータ制御装置の限定的ではない例示的な構成および動作の例を説明する。図示されている例において、本実施形態のモータシステム1000におけるモータ制御装置100は、上記の処理により、トルク指令値 T から d 軸電流指令値 i_d^* および q 軸電流指令値 i_q^* を生成する電流指令値生成モジュールを有している。更に、モータ制御装置100は、電流制御回路12と、第1座標変換回路14Aと、PWM回路16とを備えている。電流制御回路12は、 d 軸電流指令値 i_d^* および q 軸電流指令値 i_q^* から d 軸電圧指令値 V_d^* および q 軸電圧指令値 V_q^* を決定する。第1座標変換回路14Aは、電圧指令値を dq 座標系から UVW 座標系に変換する。PWM回路16は、第1座標変換回路14Aから出力される電圧指令値(V_u^* 、 V_v^* 、 V_w^*)に基づいてパルス幅変調信号を生成する。これらの回路12、14A、16の構成および動作は、公知の例に従う。

[0082] モータ制御装置100は、更に、第2座標変換回路14Bと、位置検出回路18Aと、速度演算回路18Bとを備えている。第2座標変換回路14Bは、インバータからモータ300に供給される3相 U 、 V 、 W の巻線電流の検出値 i_u 、 i_v について、 UVW 座標系から dq 座標系に変換する。位置検出回路18Aは、モータ300におけるロータの機械角位置 θ_m を検出する。速度演算回路18Bは、ロータの機械角位置 θ_m からロータの機械角速度 ω_m を算出する。

[0083] 第2座標変換回路14Bから、 dq 座標系に変換された d 軸電流 i_d 、 q 軸電流 i_q は、電流制御回路12に与えられ、それぞれ、 d 軸電流指令値 i_d^* および q 軸電流指令値 i_q^* と比較される。電流制御回路12の典型例は、比例積

分（P I）制御器である。ロータの機械角位置 θ_m からはロータの電気角位置 θ が算出される。ロータの電気角位置 θ は、d q座標系とU V W座標系との間の座標変換に利用される。ロータの機械角速度 ω_m は、トルク指令値Tの決定に利用され得る。

[0084] モータ駆動回路200のインバータの前段には、PWM信号に基づいてインバータ内のトランジスタをスイッチングするゲート駆動信号を生成するゲートドライバが設けられ得る。これらの要素は公知であり、簡単のため、記載が省略されている。

[0085] 上記の各回路の一部または全部は、集積回路装置によって実現され得る。このような集積回路装置は、典型的には1個または複数個の半導体部品によって形成され得る。集積回路装置は、位置センサからのアナログ信号をデジタル信号に変換するA/Dコンバータと、モータ300の巻線を通る電流を検出するセンサ（不図示）からのアナログ信号をデジタル信号に変換するA/Dコンバータとを含み得る。

[0086] インバータの少なくとも一部が集積回路装置に含まれていても良い。このような集積回路装置は、典型的には、1個また複数個の半導体チップを1個のパッケージ内で相互に接続することによって実現される。集積回路装置の一部または全部は、例えば汎用的なマイクロコントローラユニット（MCU）に本開示に特有のプログラムを書き込むことによって実現され得る。

[0087] 本開示のモータ制御装置、モータ制御方法、モータシステムは、高効率動作が求められる種々の同期モータに利用され得る。

符号の説明

[0088] 10・・・プロセッサ（デジタル演算回路）、20・・・メモリ、100・・・モータ制御装置、200・・・モータ制御装置、300・・・モータ、1000・・・モータシステム

請求の範囲

- [請求項1] ロータに同期して回転する d q 座標系における電流ベクトルの指令値をトルク指令値に基づいて決定するモータ制御装置であって、
- デジタル演算回路と、
- モータの磁石鎖交磁束 Ψ_a によって規定される係数 a 、 d 軸インダクタンス L_d および q 軸インダクタンス L_q の差異によって規定される係数 b 、および極対数 N_p を記録しているメモリと、
- を備え、
- 前記デジタル演算回路は、トルク指令値を受け取ると、
- (a) 極対数 N_p に対するトルク指令値の比によって規定される係数 c を求めること、
- (b) トルク方程式である $a x + 2 b x y - c = 0$ を満足し、かつ $x^2 + y^2$ を最小化する x および y の値を算出すること、
- (c) q 軸成分として x 、 d 軸成分として y を有するベクトルを電流ベクトルの指令値として決定すること、
- を実行し、
- 前記デジタル演算回路は、
- $x^2 + y^2$ を最小化する x および y の値を算出するとき、
- ニュートン法による逐次計算を行って x および y の値を決定する、
- モータ制御装置。
- [請求項2] 前記デジタル演算回路は、最新のトルク指令値を受け取ると、
- 1 回前に受け取ったトルク指令値に基づいて決定した値を初期として、前記最新のトルク指令値に応じて決まる x および y の値を求める、請求項 1 に記載のモータ制御装置。
- [請求項3] 前記メモリは、前記係数 a および／または係数 b について、モータの状態に応じて異なる複数の値を含むルックアップテーブルを記憶している、請求項 1 または 2 に記載のモータ制御装置。
- [請求項4] 前記モータの状態は、モータの動作温度、磁気飽和の程度、前記ロ

ータが永久磁石を有する場合における前記永久磁石の減磁の程度、および使用期間を含む、請求項3に記載のモータ制御装置。

[請求項5] 前記デジタル演算回路は、磁石鎖交磁束 Ψ_a 、d軸インダクタンス L_d 、および／またはq軸インダクタンス L_q の変化に応じて、前記メモリに記録されている前記係数aおよび／または係数bの値を更新する、請求項1または2に記載のモータ制御装置。

[請求項6] 前記デジタル演算回路は、電流ベクトルの測定値を受け取り、前記電流ベクトルの測定値と前記電流ベクトルの指令値の間にある差異に基づいて電圧ベクトルの指令値を決定する、請求項1から5のいずれかに記載のモータ制御装置。

[請求項7] 前記モータは、埋め込み型の永久磁石同期モータである、請求項1から6のいずれかに記載のモータ制御装置。

[請求項8] 請求項1から7のいずれかに記載のモータ制御装置と、
前記モータ制御装置に接続されたモータ駆動回路と、
前記モータ駆動回路に接続されたモータと、
を備える、モータシステム。

[請求項9] ロータに同期して回転するd-q座標系における電流ベクトルの指令値をトルク指令値に基づいて決定するモータ制御方法であって、

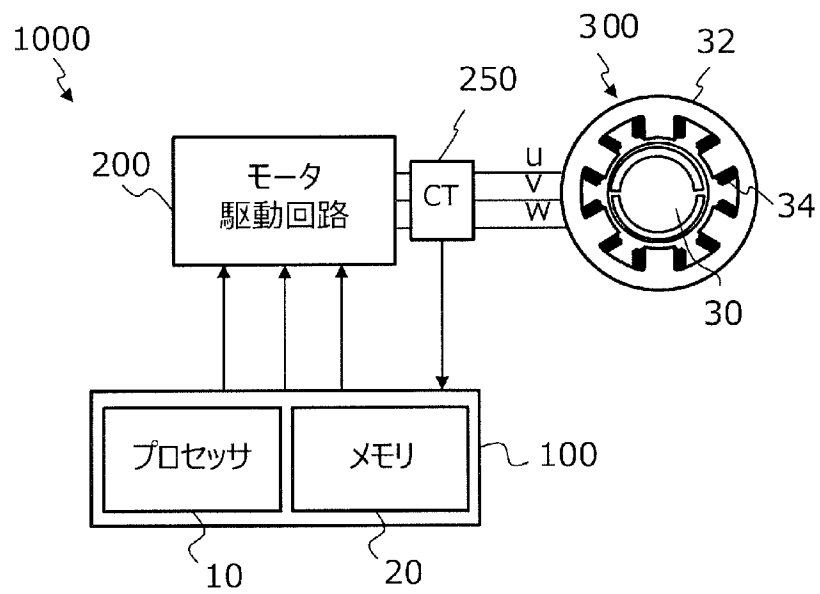
(1) 前記モータの極対数 N_p に対するトルク指令値の比によって規定される係数cを求めること、

(2) 前記モータの磁石鎖交磁束 Ψ_a によって規定される係数をa、d軸インダクタンス L_d およびq軸インダクタンス L_q の差異によって規定される係数をbとすると、トルク方程式である $ax + 2bxy - c = 0$ を満足し、かつ $x^2 + y^2$ を最小化するxおよびyの値を算出すること、

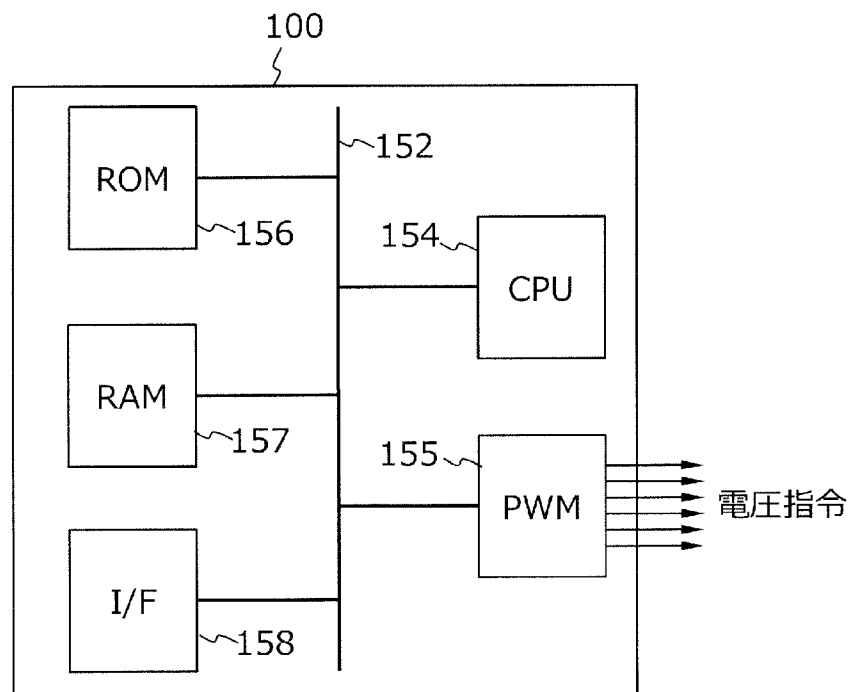
(3) q軸成分としてx、d軸成分としてyを有するベクトルを電流ベクトルの指令値として決定すること、
を含み、

$x^2 + y^2$ を最小化する x および y の値を算出するとき、
ニュートン法による逐次計算を行って x および y の値を決定する、
モータ制御方法。

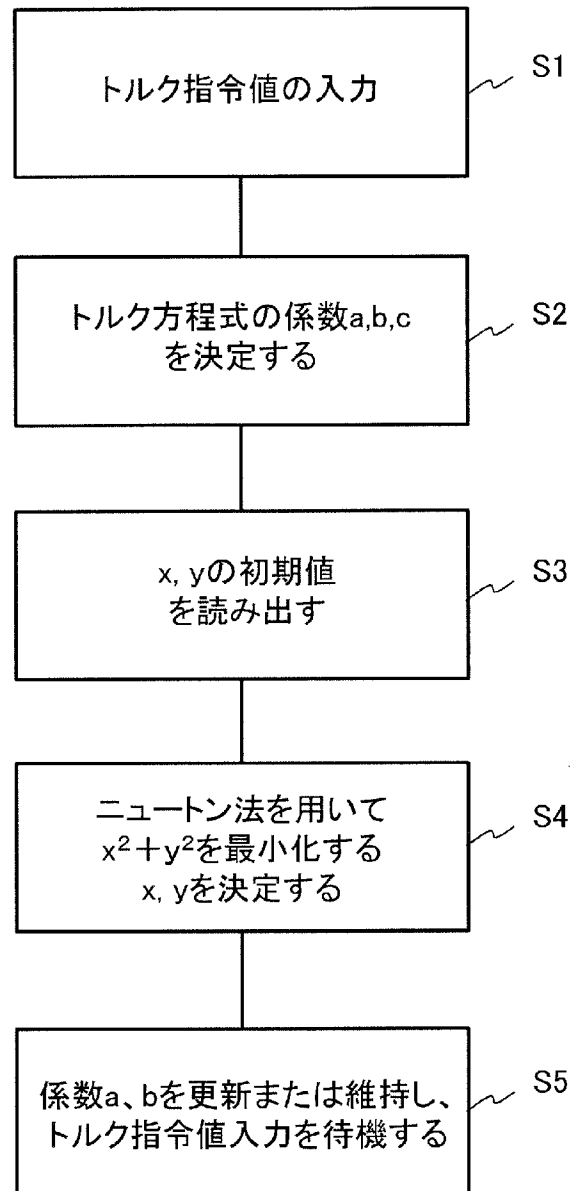
[図1]



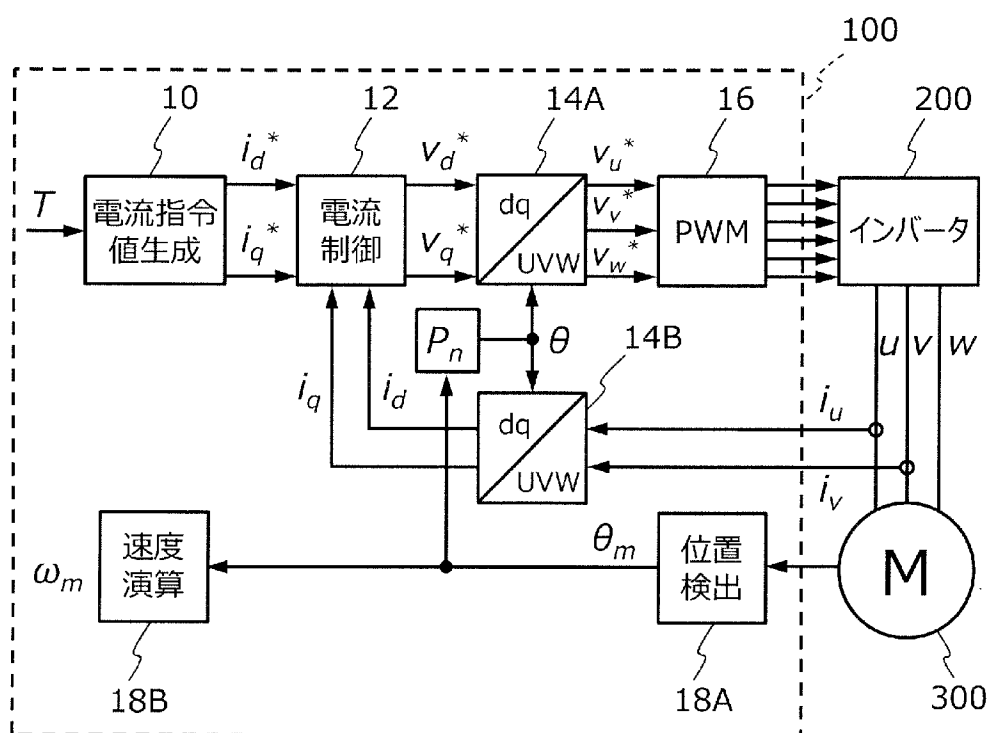
[図2]



[図3]



[図4]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/018905

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER Int.Cl. H02P21/22 (2016.01) i, H02P21/14 (2016.01) i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) Int.Cl. H02P21/22, H02P21/14 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2019 Registered utility model specifications of Japan 1996-2019 Published registered utility model applications of Japan 1994-2019 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2016-226270 A (LSIS CO., LTD.) 28 December 2016, paragraphs [0034]-[0077], fig. 1-4 & US 2016/0359443 A1, paragraphs [0046]-[0078], fig. 1-4	1-2, 9 3-8
Y	WO 2016/207936 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC CORP.) 29 December 2016, paragraphs [0006], [0039], [0041], fig. 4B, 9 & US 2018/0123493 A1, paragraphs [0009], [0061], [0065], fig. 4B, 9	3-8
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 29 July 2019 (29.07.2019)		Date of mailing of the international search report 06 August 2019 (06.08.2019)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/018905

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2013-31256 A (TOSHIBA MITSUBISHI-ELECTRIC INDUSTRIAL SYSTEMS CORP.) 07 February 2013, paragraph [0020], fig. 1, 3 (Family: none)	3-8
A	JP 2006-353091 A (GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS INC.) 28 December 2006, entire text, all drawings & US 2006/0284582 A1, entire text, all drawings	1-9

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H02P21/22(2016.01)i, H02P21/14(2016.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H02P21/22, H02P21/14

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X Y	JP 2016-226270 A（エルエス産電株式会社）2016.12.28, 段落[0034]-[0077]、図1-4 & US 2016/0359443 A1, 段落[0046]-[0078]、図1-4	1-2, 9 3-8
Y	WO 2016/207936 A1（三菱電機株式会社）2016.12.29, 段落[0006]、[0039]、[0041]、図4B、図9 & US 2018/0123493 A1, 段落[0009]、[0061]、[0065]、 図4B、図9	3-8

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

29.07.2019

国際調査報告の発送日

06.08.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

田村 恵里加

電話番号 03-3581-1101 内線 3357

3V

4656

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリ*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2013-31256 A (東芝三菱電機産業システム株式会社) 2013.02.07, 段落[0020]、図1、図3 (ファミリーなし)	3-8
A	JP 2006-353091 A (ジーエム・グローバル・テクノロジー・オペ レーションズ・インコーポレーテッド) 2006.12.28, 全文、全図 & US 2006/0284582 A1, 全文、全図	1-9