

(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2018-85851
(P2018-85851A)

(43) 公開日 平成30年5月31日(2018.5.31)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO2P 6/185 (2016.01)	HO2P 6/185	5H560
HO2M 7/48 (2007.01)	HO2M 7/48	E 5H770

審査請求 未請求 請求項の数 19 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2016-227899 (P2016-227899)	(71) 出願人	000003997 日産自動車株式会社 神奈川県横浜市神奈川区宝町2番地
(22) 出願日	平成28年11月24日(2016.11.24)	(74) 代理人	110002468 特許業務法人後藤特許事務所
		(72) 発明者	谷本 勉 神奈川県横浜市神奈川区宝町2番地 日産自動車株式会社内
		(72) 発明者	加藤 崇 神奈川県横浜市神奈川区宝町2番地 日産自動車株式会社内
		Fターム(参考)	5H560 BB12 DA14 DB07 DC12 EB01 TT11 XA02 XA13 5H770 BA01 DA03 DA41 EA01 HA01Z HA02Z HA07Z

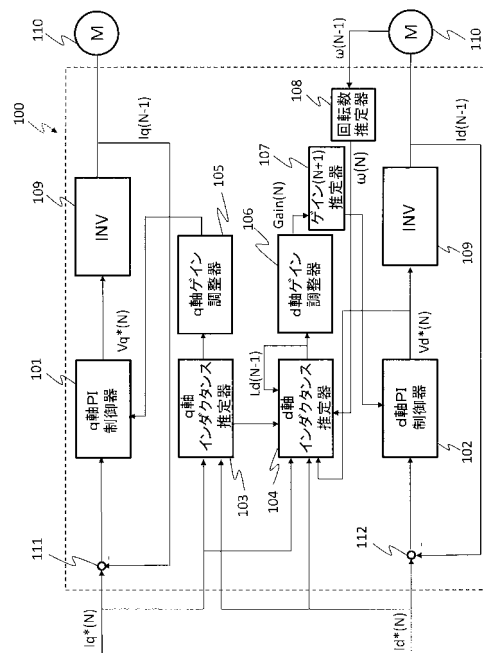
(54) 【発明の名称】 可変磁束モータの電流制御方法、及び電流制御装置

(57) 【要約】

【課題】 磁石磁束とインダクタンスとが変化する可変磁束モータのインダクタンスを推定し、推定したインダクタンスに基づいて制御ゲインを調整することができる電流制御方法を提供する。

【解決手段】 q 電流指令値と、q 軸 P I 制御ゲインと、に基づいてインバータに与える q 軸電圧指令値を算出し、d 電流指令値と、d 軸 P I 制御ゲインと、に基づいてインバータに与える d 軸電圧指令値を算出し、q 軸電流指令値に基づいて、q 軸インダクタンスを推定する。そして、d 軸電流指令値及び q 軸電流指令値と、d 軸電圧指令値と、回転数と、推定した q 軸インダクタンスと、d 軸インダクタンスの前回推定値と、に基づいて d 軸インダクタンスを推定して、推定した d 軸インダクタンスに応じて d 軸 P I 制御ゲインを調整し、q 軸電圧指令値と d 軸電圧指令値とに応じた q 軸電流及び d 軸電流を、インバータから固定子巻線に供給する。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

固定子巻線を有する固定子と、
 複数の永久磁石を有する回転子と、を備え、
 インバータから前記固定子巻線に印加される電流が形成する磁界の作用で前記永久磁石の着磁率を変化可能な可変磁束モータの電流制御方法において、
 前記固定子巻線に供給する電流を前記インバータに発生させるための q 軸電流指令値と、
 q 軸 P I 制御ゲインと、に基づいて前記インバータに与える q 軸電圧指令値を算出し、
 前記固定子巻線に供給する電流を前記インバータに発生させるための d 軸電流指令値と、
 d 軸 P I 制御ゲインと、に基づいて前記インバータに与える d 軸電圧指令値を算出し、
 前記 q 軸電流指令値に基づいて、q 軸インダクタンスを推定し、
 前記可変磁束モータの回転数を取得し、
 前記 d 軸電流指令値及び前記 q 軸電流指令値と、前記 d 軸電圧指令値と、前記回転数と、
 推定した前記 q 軸インダクタンスと、d 軸インダクタンスの前回推定値と、に基づいて
 前記 d 軸インダクタンスを推定し、
 推定した前記 d 軸インダクタンスに応じて前記 d 軸 P I 制御ゲインを調整し、
 前記 q 軸電圧指令値と前記 d 軸電圧指令値とに応じた q 軸電流及び d 軸電流を、前記インバータから前記固定子巻線に供給する、
 ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

10

【請求項 2】

請求項 1 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、
 前記 q 軸インダクタンスは、前記 d 軸電流及び q 軸電流と、前記 q 軸インダクタンスとの関係を予め記憶させたマップを用いて、前記 q 軸電流指令値及び前記 d 軸電流指令値から推定される、
 ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

20

【請求項 3】

請求項 1 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、
 前記 q 軸インダクタンスは、予め定めた前記 q 軸インダクタンスの最大値と最小値との間を補間する補間式を用いて、前記 q 軸電流指令値から推定される、
 ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

30

【請求項 4】

請求項 3 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、
 前記補間は線形補間である、
 ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 5】

請求項 3 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、
 前記補間是非線形補間である、
 ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 6】

請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、
 前記 d 軸インダクタンスの初期値として、予め定めた固定値を使用する、
 ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

40

【請求項 7】

請求項 6 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、
 推定した前記 d 軸インダクタンスを初期化する初期化シーケンスを実行する際は、推定した前記 d 軸インダクタンスの値を前記固定値に設定する、
 ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 8】

請求項 6 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、
 前記固定子巻線に発生する誘起電圧を計測または算出し、

50

推定した前記 d 軸インダクタンスを初期化する初期化シーケンスを実行する際は、前記誘起電圧から求められる磁石磁束に基づいて算出された d 軸インダクタンス算出値を前記初期値として設定する、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 9】

請求項 8 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、

前記可変磁束モータが、前記 q 軸電流に対する前記磁石磁束の変化率が略 0 となる動作域において動作する際に、前記初期化シーケンスを実行する、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 10】

請求項 9 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、

前記初期化シーケンスでは、

前記 q 軸電流が略 0 のときに、第 1 の d 軸電流を前記固定子巻線に流すことにより算出された第 1 の d 軸磁束と、第 2 の d 軸電流を前記固定子巻線に流すことにより算出された第 2 の d 軸磁束とに基づいて算出された前記 d 軸インダクタンス算出値を、前記初期値として設定する、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 11】

請求項 9 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、

前記初期化シーケンスでは、

前記 q 軸電流が略最大値のときに、第 1 の d 軸電流を前記固定子巻線に流すことにより算出された第 1 の d 軸磁束と、第 2 の d 軸電流を前記固定子巻線に流すことにより算出された第 2 の d 軸磁束とに基づいて算出された前記 d 軸インダクタンス算出値を、前記初期値として設定する、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 12】

請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、

推定した d 軸インダクタンスが予め定めた d 軸インダクタンス上限値以上の場合、前記 d 軸インダクタンスを前記 d 軸インダクタンス上限値に設定し、

推定した d 軸インダクタンスが予め定めた d 軸インダクタンス下限値以下の場合、前記 d 軸インダクタンスを前記 d 軸インダクタンス下限値に設定する、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 13】

請求項 12 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、

推定した前記 d 軸 P I 制御ゲインが、前記 d 軸インダクタンスが前記 d 軸インダクタンス下限値の場合でも電流制御が発散しない最大のゲインを予め定めたゲイン最大値以上の場合、前記 d 軸 P I 制御ゲインを前記ゲイン最大値に設定する、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 14】

請求項 12 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、

推定した前記 d 軸インダクタンスが前記 d 軸インダクタンス上限値以上、もしくは、推定した前記 d 軸インダクタンスが前記 d 軸インダクタンス下限値以下になった場合は、その後最初に前記 q 軸電流に対する磁石磁束の変化率が略 0 となった時に、推定した前記 d 軸インダクタンスを初期化する初期化シーケンスを実行する、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 15】

請求項 1 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、

着磁率指令値に基づいて前記永久磁石の着磁率を変化させるための着磁用 d 軸電流指令値及び着磁用 q 軸電流指令値を算出し、

前記着磁用 d 軸電流指令値及び着磁用 q 軸電流指令値に応じて、着磁用 P I 制御ゲイン

10

20

30

40

50

を算出し、

前記永久磁石の着磁率を変化させる際には、前記 d 軸 P I 制御ゲインおよび前記 q 軸 P I 制御ゲインを用いた電流制御から、前記着磁用 P I 制御ゲインを用いた電流制御に切り替える、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 16】

請求項 15 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、

前記永久磁石の着磁率を推定し、

前記着磁率指令値と推定した前記着磁率とに応じて前記着磁用 P I 制御ゲインを調整する、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 17】

請求項 16 に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、

推定した前記 d 軸インダクタンスと前記 q 軸インダクタンスとに応じて、前記着磁用 P I 制御ゲインをさらに調整する、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 18】

請求項 15 から 17 のいずれか一項に記載の可変磁束モータの電流制御方法において、

推定した前記 d 軸インダクタンスと前記 q 軸インダクタンスとに応じて前記着磁用 d 軸電流指令値及び着磁用 q 軸電流指令値の変化率を調整する、

ことを特徴とする可変磁束モータの電流制御方法。

【請求項 19】

固定子巻線を有する固定子と、

複数の永久磁石を有する回転子と、を備え、

インバータから前記固定子巻線に印加される電流が形成する磁界の作用で前記永久磁石の着磁量を変化可能な可変磁束モータの電流制御装置において、

前記固定子巻線に供給する電流を前記インバータに発生させるための q 軸電流指令値と、q 軸 P I 制御ゲインと、に基づいて前記インバータに与える q 軸電圧指令値を算出する q 軸 P I 制御部と、

前記固定子巻線に供給する電流を前記インバータに発生させるための d 軸電流指令値と、d 軸 P I 制御ゲインと、に基づいて前記インバータに与える d 軸電圧指令値を算出する d 軸 P I 制御部と、

前記 q 軸電流指令値に基づいて、q 軸インダクタンスを推定する L q 推定部と、

前記可変磁束モータの回転数を取得する回転数取得部と、

前記 d 軸電流指令値及び前記 q 軸電流指令値と、前記 d 軸電圧指令値と、前記回転数と、推定した前記 q 軸インダクタンスと、d 軸インダクタンスの前回推定値と、に基づいて前記 d 軸インダクタンスを推定する L d 推定部と、

推定した前記 d 軸インダクタンスに応じて前記 d 軸 P I 制御ゲインを調整する d 軸 P I 制御ゲイン調整部と、を備え、

前記 q 軸電圧指令値と前記 d 軸電圧指令値とに応じた q 軸電流及び d 軸電流を、前記インバータから前記固定子巻線に供給する、

ことを特徴とするモータの電流制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、可変磁束モータの電流制御方法、及び電流制御装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、保持力の異なる 2 以上の永久磁石を回転子内に有する永久磁石同期モータにおいて、永久磁石同期モータの運転中に誘起電圧を測定し、測定した誘起電圧に基づいて永久

10

20

30

40

50

磁石の磁束を推定し、推定した磁束に基づいて制御ゲインを変化させることにより、永久磁石同期モータの電流制御性を安定させる技術が開示されている（特許文献1参照）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2005-304204号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

ここで、磁石磁束の推定値を算出する際は、その算出式のパラメータとしてインダクタンス値を使用する。特許文献1の永久磁石同期モータでは、磁石磁束だけが変化するので、固定のインダクタンス値を用いて磁石磁束を推定することができた。

10

【0005】

しかしながら、固定子巻線に印加される電流に応じて着磁量を変化可能な永久磁石を備え、磁石磁束だけでなくインダクタンスも大きく変化する可変磁束モータでは、電流制御性を安定させるための制御ゲインを調整する際にインダクタンスの推定値も必要となるが、その推定方法は報告されていない。

【0006】

本発明は、磁石磁束とインダクタンスとが変化する可変磁束モータのインダクタンスを推定し、推定したインダクタンスに基づいて制御ゲインを調整することができる電流制御方法を提供することを目的とする。

20

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明による可変磁束モータの電流制御方法は、固定子巻線を有する固定子と、複数の永久磁石を有する回転子と、を備え、インバータから前記固定子巻線に印加される電流が形成する磁界の作用で前記永久磁石の着磁率を変化可能な可変磁束モータの電流制御方法であって、固定子巻線に供給する電流をインバータに発生させるためのq軸電流指令値と、q軸PI制御ゲインと、に基づいてインバータに与えるq軸電圧指令値を算出し、固定子巻線に供給する電流をインバータに発生させるためのd軸電流指令値と、d軸PI制御ゲインと、に基づいてインバータに与えるd軸電圧指令値を算出し、q軸電流指令値に基づいて、q軸インダクタンスを推定し、さらに、可変磁束モータの回転数を取得する。そして、d軸電流指令値及びq軸電流指令値と、d軸電圧指令値と、回転数と、推定したq軸インダクタンスと、d軸インダクタンスの前回推定値と、に基づいてd軸インダクタンスを推定して、推定したd軸インダクタンスに応じてd軸PI制御ゲインを調整し、q軸電圧指令値とd軸電圧指令値とに応じたq軸電流及びd軸電流を、インバータから固定子巻線に供給する。

30

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、磁石磁束とインダクタンスとが変化する可変磁束モータのインダクタンスを推定して、インダクタンスの推定値に基づいて制御ゲインを調整することができるので、制御安定性を向上させることができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】図1は、第1実施形態の可変磁束型回転電機の電流制御装置の制御ブロック図である。

【図2】図2は、PI制御ゲインの調整方法を説明するための図である。

【図3】図3は、第2実施形態の可変磁束型回転電機の電流制御装置の制御ブロック図である。

【図4】図4は、q軸インダクタンス L_q の線形補間を説明する図である。

【図5】図5は、q軸インダクタンス L_q の非線形補間を説明する図である。

50

【図 6】図 6 は、q 軸電流に対する磁石磁束の変化率を示す図であって、初期化シーケンスの実行タイミングを説明する図である。

【図 7】図 7 は、q 軸電流に対する磁石磁束の変化率を示す図であって、初期化シーケンスの実行タイミングを説明する図である。

【図 8】図 8 は、d 軸インダクタンス L_d の上限値を説明する図である。

【図 9】図 9 は、d 軸インダクタンス L_d の下限値を説明する図である。

【図 10】図 10 は、PI 制御ゲインの最大値を説明する図である。

【図 11】図 11 は、初期化シーケンスのフローを示すフローチャートである。

【図 12】図 12 は、第 6 実施形態の可変磁束モータの電流制御装置の制御ブロック図である。

10

【図 13】図 13 は、着磁用 PI 制御ゲインを調整する前後での着磁用 d 軸電流指令値に対する実電流の追従性を示す図である。

【図 14】図 14 は、着磁用 d 軸電流指令値の時間変化率を調整する前後での着磁用 d 軸電流指令値に対する実電流の追従性を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

[第 1 実施形態]

図 1 は、第 1 実施形態にかかる可変磁束型回転電機の電流制御装置 100 (以下単に電流制御装置 100 という) の構成を示す制御ブロック図である。本実施形態の電流制御装置 100 は、q 軸 PI 制御器 101 と、d 軸 PI 制御器 102 と、q 軸インダクタンス推定器 103 と、d 軸インダクタンス推定器 104 と、q 軸 PI 制御ゲイン調整器 105 と、d 軸ゲイン調整器 106 と、d 軸ゲイン (N+1) 推定器 107 と、回転数推定器 108 と、インバータ 109 と、q 軸減算器 111 と、d 軸減算器 112 とを備え、可変磁束モータ 110 を制御対象とする電流制御装置である。

20

【0011】

ただし、電流制御装置 100 が備える上記構成のうち、インバータ 109 を除く各構成は、一つあるいは複数のコントローラが機能部として備え、後述する各機能を実行するようにプログラムされているものとする。なお、インバータ 109 と可変磁束モータ 110 は、説明の都合上それぞれ二つに分けて図示したが、実際は一つとする。

【0012】

まず、可変磁束モータ 110 について説明する。本発明の制御対象である可変磁束モータ 110 (以下、単にモータ 110 ともいう) は、回転子が備える永久磁石 (低保磁力磁石) の着磁量が、インバータからモータ 110 に印加される電流に応じて変化可能に構成されている。より具体的には、モータ 110 は、固定子巻線を有する固定子と、複数の永久磁石を有する回転子とから構成されており、インバータ 109 から固定子巻線に印加される電流が形成する磁界の作用で永久磁石の着磁量 (着磁率) を変化させることで、永久磁石の磁力 (磁束) そのものを変化させることが出来る。このため、モータの運転状態 (動作点) に応じて永久磁石の磁力を制御することにより、幅広い動作領域におけるモータの効率を向上させることができる。永久磁石の着磁量を変化させる制御方法については、図 12 を参照して後述する。

30

【0013】

以上説明したような可変磁束モータを電流制御する場合に電流制御の制御ゲインを一定にしていると、動作点の変化に対して電流が追従しなくなるため、制御が不安定となる。

【0014】

ここで、モータの電流制御においては、背景技術にて上述したように、磁石磁束だけが変化するようなモータでのゲイン調整技術は公知である。しかしながら、磁石磁束とインダクタンスとがともに変化するモータにおけるゲイン調整技術は本発明以前には報告されていない。

【0015】

本発明は、磁石磁束とインダクタンスとが変化するモータのインダクタンスを推定し、

50

推定したインダクタンスに基づいて制御ゲインを調整することで、磁石磁束とインダクタンスとが変化するモータの電流制御性を安定させることができる技術を提供する。以下、図 1 に戻って説明を続ける。

【0016】

q 軸減算器 111 は、q 軸電流指令値 $I_q^*(N)$ から、可変磁束モータ 110 に入力される三相交流電流から取得した q 軸電流検出値 $I_q(N-1)$ を減算する。q 軸電流指令値 I_q^* は、後述する d 軸電流指令値 I_d^* とともに、モータ 110 に所望のトルクを出力させるためにモータ 110 が有する固定子巻線に供給する電流 (q 軸電流 I_q) をインバータ 109 に発生させるために不図示の電流指令値設定手段により設定された値である。電流指令値設定手段は、電流制御装置 100 が有する各構成と同様に上記のコントローラが一機能部として備える構成であっても良いし、電流制御装置 100 の各構成を備えるコントローラとは別のコントローラが備える機能部であっても良い。q 軸減算器 111 の出力値は q 軸 PI 制御器 101 に出力される。

10

【0017】

なお、ここで説明する電流制御装置において用いられる各値の検出、算出、或いは推定は、システムの起動中一定の間隔で行われる。以下に示す値の末尾の (N) は現制御タイミングにおける値を、(N-1) は前回の制御タイミングにおける値 (前回値) を示す。

【0018】

q 軸 PI 制御器 101 は、入力される q 軸減算器 111 の出力値、及び、後述する q 軸 PI 制御ゲイン調整器 105 から入力される q 軸 PI 制御ゲインから比例積分 (PI) 制御演算により q 軸電圧指令値 $V_q^*(N)$ を算出し、インバータ 109 へ出力する。

20

【0019】

d 軸減算器 112 は、電流指令値 $I_d^*(N)$ から、可変磁束モータ 110 に入力される三相交流電流から取得した d 軸電流検出値 $I_d(N-1)$ を減算する。d 軸電流指令値 I_d^* は、上述した q 軸電流指令値 I_q^* とともに、モータ 110 に所望のトルクを出力させるためにモータ 110 が有する固定子巻線に供給する電流 (d 軸電流 I_d) をインバータ 109 に発生させるために、不図示の電流指令値設定手段により設定された値である。d 軸減算器 112 の出力値は、d 軸 PI 制御器 102 に出力される。

【0020】

d 軸 PI 制御器 102 は、入力される電流指令値 I_d^* 、及び、後述する d 軸ゲイン (N+1) 推定器 107 から入力される d 軸 PI 制御ゲインから比例積分 (PI) 制御演算により d 軸電圧指令値 $V_d^*(N)$ を算出し、インバータ 109 へ出力する。

30

【0021】

q 軸インダクタンス推定器 103 は、q 軸インダクタンス L_q を推定する。具体的には、q 軸電流および d 軸電流と、q 軸インダクタンス L_q との関係性を定めたマップを予め取得して、q 軸電流指令値 $I_q^*(N)$ と、d 軸電流指令値 $I_d^*(N)$ とに基づいて、当該マップを参照することにより q 軸インダクタンス L_q を推定する。推定された q 軸インダクタンス L_q は、q 軸 PI 制御ゲイン調整器 105 に入力される。

【0022】

q 軸 PI 制御ゲイン調整器 105 は、q 軸インダクタンス L_q に応じた q 軸 PI 制御ゲインを算出して、q 軸 PI 制御器 101 に出力する。q 軸 PI 制御ゲインは、例えば図 2 に図示するように、q 軸インダクタンス L_q が大きくなるほど大きな値になるように算出される。

40

【0023】

d 軸インダクタンス推定器 104 は、d 軸インダクタンス L_d を推定する。具体的には、電圧方程式から導かれる以下式 (1) に従って、d 軸 PI 制御器 102 の出力値である d 軸電圧指令値 $V_d^*(N)$ と、回転数推定器 108 の出力値であるモータ回転数 (N) と、d 軸電流指令値 $I_d^*(N)$ と、q 軸電流指令値 $I_q^*(N)$ と、予め取得したモータ 110 に備わる固定子巻線の巻線抵抗 R_a と、q 軸インダクタンス推定器 103 で推定された q 軸インダクタンス L_q と、一つ前の制御タイミングで推定された d 軸インダク

50

ンス $L_d(N-1)$ とから、 d 軸インダクタンス L_d が推定される。推定された d 軸インダクタンス L_d は、 d 軸ゲイン調整器 106 に出力される。

【0024】

【数1】

$$L_d(N) = \int \left(\frac{V_d + \omega L_q I_q}{I_d} - R_a \right) dt + L_d(N-1) \quad \dots (1)$$

【0025】

d 軸ゲイン調整器 106 は、 d 軸インダクタンス L_d に応じた d 軸 P I 制御ゲインを算出して、 d 軸ゲイン ($N+1$) 推定器 107 に出力する。 d 軸 P I 制御ゲインは、例えば図 2 に図示するように d 軸インダクタンス L_d が大きくなるほど大きな値になるように算出される。このように、第 1 実施形態の電流制御装置 100 によれば、 d 軸インダクタンス L_d を推定し、推定した d 軸インダクタンス L_d に応じて d 軸 P I 制御ゲインを調整することができる。

10

【0026】

d 軸ゲイン ($N+1$) 推定器 107 は、 d 軸 P I 制御ゲイン (N) から、 d 軸ゲイン調整器 106 において次の制御タイミングで算出されると予測される d 軸 P I 制御ゲイン ($N+1$) を推定する。算出した d 軸 P I 制御ゲイン ($N+1$) は、 d 軸 P I 制御器 102 に出力される。これにより、 d 軸 P I 制御ゲイン ($N+1$) が推定されたタイミングの次の制御タイミングにおいて、 d 軸 P I 制御器 102 に d 軸電流指令値 $I_d^*(N)$ が入力された時に、 d 軸電圧指令値 $V_d^*(N)$ をより正しく推定することができる。なお、現在値、あるいは過去値から現在値までの推移に基づいて次の制御タイミングにおける値を推定する方法は、特に限定されず、公知の方法を用いればよい。

20

【0027】

回転数推定器 108 は、不図示のレゾルバやエンコーダ等の回転センサの検出値に基づいて算出された一つ前の制御タイミングにおける回転数 ($N-1$) から、回転数 (N) を推定して、 d 軸インダクタンス推定器 104 に出力する。これにより、 d 軸インダクタンス推定器 104 において、遅れ要素が排除されるので、遅れの無いより正しい d 軸インダクタンス L_d を推定することができる。なお、過去値から現在値を推定する方法は特に限定されず、 d 軸ゲイン ($N+1$) 推定器 107 において d 軸 P I 制御ゲイン ($N+1$) が推定されたのと同様に、公知の方法を用いればよい。

30

【0028】

そして、インバータ 109 は、 q 軸 P I 制御器 101 から入力される q 軸電圧指令値 V_q^* に応じた q 軸電流 I_q と、 d 軸 P I 制御器 102 から入力される d 軸電圧指令値 V_d^* とに応じた d 軸電流 I_d とを、モータ 110 に出力する。

【0029】

以上が本実施形態における電流制御の詳細である。このような制御構成により、 d 軸インダクタンス L_d と磁石磁束 a との双方が変化する可変磁束モータであっても、動作点に応じて P I 制御ゲインを調整することができる。その結果、動作点の変化に伴う電流追従性が向上し、電流制御の制御安定性を向上させることができるので、幅広い運転領域においてモータ 110 の効率を向上させることができる。

40

【0030】

以上、第 1 実施形態の可変磁束モータの電流制御装置 100 は、固定子巻線を有する固定子と、複数の永久磁石を有する回転子と、を備え、インバータから固定子巻線に印加される電流が形成する磁界の作用で永久磁石の着磁率を変化可能な可変磁束モータの電流制御方法を実現する電流制御装置 100 である。電流制御装置 100 は、固定子巻線に供給する電流をインバータに発生させるための q 軸電流指令値 I_q^* と、 q 軸 P I 制御ゲインと、に基づいてインバータ 109 に与える q 軸電圧指令値 V_q^* を算出し、固定子巻線に供給する電流をインバータ 109 に発生させるための d 軸電流指令値 I_d^* と、 d 軸 P I

50

制御ゲインと、に基づいてインバータ109に与えるd軸電圧指令値 V_d^* を算出し、q軸電流指令値 I_q^* に基づいて、q軸インダクタンス L_q を推定し、さらに、可変磁束モータ110の回転数を取得する。そして、d軸電流指令値 I_d^* 及びq軸電流指令値 I_q^* と、d軸電圧指令値 V_d^* と、回転数と、推定したq軸インダクタンス L_q と、d軸インダクタンス L_d の前回推定値($N-1$)と、に基づいてd軸インダクタンス L_d を推定して、推定したd軸インダクタンス L_d に応じてd軸PI制御ゲインを調整し、q軸電圧指令値 V_q^* とd軸電圧指令値 V_d^* とに応じたq軸電流 I_q 及びd軸電流 I_d を、インバータ109から固定子巻線に供給する。

【0031】

これにより、磁石磁束とインダクタンスとが変化する可変磁束モータ110のd軸インダクタンス L_d を推定することができるので、d軸インダクタンス L_d の推定値に基づいてPI制御ゲインを調整することにより、制御安定性が向上し、幅広い運転領域においてモータ110の効率を向上させることができる。

10

【0032】

また、第1実施形態の可変磁束型回転電機の電流制御装置100によれば、q軸インダクタンス L_q は、d軸電流 I_d 及びq軸電流 I_q と、q軸インダクタンス L_q との関係を予め記憶させたマップを用いて、q軸電流指令値 I_q^* 及びd軸電流指令値 I_d^* から推定される。これにより、q軸インダクタンス L_q を精度よく推定することができる。

【0033】

[第2実施形態]

第2実施形態の電流制御装置200は、q軸インダクタンス L_q の推定方法が第1実施形態と主に異なる。

20

【0034】

図3は、第2実施形態の電流制御装置200の構成を示す制御ブロック図である。なお、第1実施形態と同様の構成部分は同じ符号を付して説明を省略する。

【0035】

図3に示すように、本実施形態のq軸インダクタンス推定器223には、第1実施形態とは異なりd軸電流指令値 $I_d^*(N)$ は入力されず、q軸電流指令値 $I_q^*(N)$ からq軸インダクタンス L_q を推定する。

【0036】

具体的には、q軸インダクタンス推定器223は、q軸電流指令値 $i_q^*(N)$ に基づいて、予め定めたq軸インダクタンス L_q の最大値 L_{q_max} と最小値 L_{q_min} との間を補間する補間式を用いて、q軸インダクタンス L_q を算出する。当該補間式には、最大値 L_{q_max} と最小値 L_{q_min} とを係数とする線形もしくは非線形な関数で構成され、図4、5で例示される複数パターンの中のいずれかが用いられる。

30

【0037】

図4は、q軸インダクタンス L_q を、その最大値 L_{q_max} と最小値 L_{q_min} とを線形補間することによって演算する方法を説明する図である。図4で示すとおり、線形補間では、最大値 L_{q_max} と最小値 L_{q_min} との2点を直線で結ぶq軸電流 I_q の一次関数に基づいて、q軸インダクタンス L_q を算出する。これにより、第1実施形態のq軸インダクタンス推定器103のようにマップを格納しておく必要がないので、電流制御装置200が備えるメモリの使用量を低減することができる。

40

【0038】

図5(a)、(b)は、q軸インダクタンス L_q を、その最大値 L_{q_max} と最小値 L_{q_min} とを非線形に補間することによって演算する方法を説明する図である。図5(a)、(b)で示すように、非線形補間では、最大値 L_{q_max} と最小値 L_{q_min} との2点を結ぶq軸電流 I_q の非線形な関数に基づいて、q軸インダクタンス L_q が算出される。なお、図5(a)、(b)で示す非線形の補間式は例示であって、制御対象のモータ特性に応じて事前に調整される。これにより、第1実施形態のq軸インダクタンス推定器103のようにマップを格納するのに比べて、電流制御装置200が備えるメモリの

50

使用量を低減することができる。

【 0 0 3 9 】

以上、第2実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置200によれば、q軸インダクタンス L_q は、予め定めたq軸インダクタンス L_q の最大値と最小値との間を補間する補間式を用いて、q軸電流指令値 I_q^* から推定される。当該補間は、線形、あるいは非線形な補間である。これにより、d軸電流 I_d 及びq軸電流 I_q と、q軸インダクタンス L_q との関係を記憶させたマップを用意する必要がなくなるので、電流制御装置200が利用するメモリの使用量を低減することができる。

【 0 0 4 0 】

[第3実施形態]

第3実施形態の電流制御装置300は、d軸インダクタンス L_d を推定する際の最初の制御タイミング時に、初期値としての固定値 $L_d(0)$ が設定された下記式(2)を使用する点に特徴がある。初期値として設定される固定値 $L_d(0)$ は、制御対象モータの特性に応じて事前に取得した値を使用する。

【 0 0 4 1 】

【 数 2 】

$$L_d(1) = \int \left(\frac{V_d + \omega L_q I_q}{I_d} - R_a \right) dt + L_d(0) \quad \dots (2)$$

10

20

【 0 0 4 2 】

なお、ここでの最初の制御タイミングとは、車両が起動した後の最初の制御タイミングであって、車両の制御システムが起動して、モータ110が備える固定子巻線に電流が最初に通電された時の制御タイミングのことをいう。

【 0 0 4 3 】

また、その後の電流制御において推定したd軸インダクタンス L_d を初期値にリセットする際にも、上記の固定値 $L_d(0)$ を用いて、 $L_d(N) = L_d(0)$ に設定する。なお、電流制御において推定したd軸インダクタンス L_d を初期値にリセットすることを、以下では初期化シーケンスと呼ぶ。

【 0 0 4 4 】

これにより、d軸インダクタンスと磁石磁束とが双方とも変化するモータにおいて、d軸インダクタンス L_d を車両システムの起動時から精度よく推定することが可能となるので、モータ110のモード効率をより向上させることができる。

30

【 0 0 4 5 】

また、マップ等を参照して演算するのではなく、事前に取得した固定値 $L_d(0)$ を使用するので、電流制御装置300が備えるメモリ使用量を低減することができる。

【 0 0 4 6 】

以上、第3実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置300によれば、d軸インダクタンス L_d の初期値として、予め定めた固定値 $L_d(0)$ を使用する。これにより、磁石磁束とインダクタンスの双方が変化するモータにおいて、車両システムの起動時からd軸インダクタンス L_d を精度よく推定することができる。

40

【 0 0 4 7 】

また、第3実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置300によれば、推定したd軸インダクタンス L_d を初期化する初期化シーケンスを実行する際は、推定したd軸インダクタンス L_d の値を固定値 $L_d(0)$ に設定する。これにより、磁石磁束とインダクタンスの双方が変化するモータにおいて、より精度よくd軸インダクタンス L_d を推定することができる。

【 0 0 4 8 】

[第4実施形態]

第4実施形態の電流制御装置400は、電流制御中において初期値 $L_d(0)$ を演算す

50

る点が、第3実施形態と異なる。以下、その演算方法について図等を参照して説明する。

【0049】

図6、7は、モータ110において、d軸電流I_dが略0の時のq軸電流I_qとd軸磁束Ψ_dとの関係を示す図である。図中の点線が、本発明の制御対象であるモータ110において、q軸電流I_qに対するd軸磁束Ψ_dを示す。図中の実線は、本発明の対象外の通常のもータ特性であり、q軸電流I_qに対して変化しないd軸磁束Ψ_dを示す。すなわち、モータ110は、d軸電流I_dが略0の時に、q軸電流I_qによって、磁石磁束Ψ_aが略10%以上変化する。

【0050】

本実施形態における初期値L_d(0)の演算は、q軸電流I_qに対する磁石磁束の変化率dΨ_a/dI_dが略0の時に実施される。より具体的には、車両の停車中等のq軸電流I_qが略0の時(図6の丸で囲む領域)、或いは、q軸電流I_qが最大値付近の時(図7の丸で囲む領域)に、少なくとも固定子巻線に発生する誘起電圧を算出できる程度の微小電流I_{d1}(第1のd軸電流)、I_{d2}(第2のd軸電流)を固定子巻線にパルスで2回流し、その時々誘起電圧を取得する。そして、取得した誘起電圧に基づいて、d軸磁束Ψ_{d1}、Ψ_{d2}を求めると、以下式(3)のように表すことができる。なお、誘起電圧は、計測器により計測しても良いし、公知の方法により算出しても良い。

10

【0051】

【数3】

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \Psi_a + L_d I_{d1} \\ \lambda_{d2} &= \Psi_a + L_d I_{d2} \end{aligned} \quad \dots (3)$$

20

【0052】

この時、q軸電流I_qに対する磁石磁束Ψ_aの変化率dΨ_a/dI_qは略0なので、磁石磁束Ψ_aは一定値とみなせる。したがって、式(3)より、d軸インダクタンスL_dを算出することができる。そして、算出したd軸インダクタンスL_dが初期値L_d(0)に設定される。また、本実施形態においては、初期化シーケンスの実行時にも、d軸インダクタンスL_d(N)に、式(3)に基づき算出されたd軸インダクタンスL_dが初期値L_d(0)として設定される。これにより、d軸インダクタンスと磁石磁束とが双方とも変化するモータにおいて、d軸インダクタンスL_dをより精度よく推定することができる。

30

【0053】

なお、図6、図7で示したq軸電流I_qとd軸磁束Ψ_dとの関係に電流の位相は考慮されていないが、モータの特性によっては電流位相も影響するので、電流位相を考慮してq軸電流I_qに対する磁石磁束の変化率dΨ_a/dI_dを算出してもよい。

【0054】

以上、第4実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置400は、固定子巻線に発生する誘起電圧を計測または算出し、推定したd軸インダクタンスL_dを初期化する初期化シーケンスを実行する際は、誘起電圧から求められる磁石磁束に基づいて算出された値を初期値として設定する。これにより、モータ110の運転中に初期値が算出されるので、より精度よくd軸インダクタンスL_dを推定することができる。

40

【0055】

また、第4実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置400は、可変磁束モータが、q軸電流I_qに対する磁石磁束の変化率dΨ_a/dI_qが略0となる動作域において動作する際に、初期化シーケンスを実行する。これにより、モータ110の運転中に適切なタイミングで初期化が実行されるので、より精度よくd軸インダクタンスL_dを推定し続けることができる。

【0056】

また、第4実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置400によれば、初期化シ

50

ーケースでは、q軸電流が略0のときに、第1のd軸電流を固定子巻線に流すことにより算出されたd軸磁束 d_1 と、第2のd軸電流を固定子巻線に流すことにより算出されたd軸磁束 d_2 とに基づいて算出された値を、初期値として設定する。これにより、モータ110の運転中において初期値が算出されるので、より精度よくd軸インダクタンス L_d を推定することができる。

【0057】

あるいは、第4実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置400によれば、初期化シーケンスでは、q軸電流が略最大値のときに、第1のd軸電流を固定子巻線に流すことにより算出されたd軸磁束 d_1 と、第2のd軸電流を固定子巻線に流すことにより算出されたd軸磁束 d_2 とに基づいて算出された値を、初期値として設定する。これにより、モータ110の運転中において初期値が算出されるので、より精度よくd軸インダクタンス L_d を推定することができる。

10

【0058】

[第5実施形態]

第5実施形態の電流制御装置500は、推定したd軸インダクタンス L_d と、当該d軸インダクタンス L_d に基づいて算出したd軸PI制御ゲインとに上下限の制限を設ける点が上述した各実施形態とは異なる。以下、図等を参照して説明する。

【0059】

図8は、推定したd軸インダクタンス L_d の上限値を説明する図である。d軸インダクタンス L_d の上限値 L_{d_max} は、モータ特性に応じて予め設定される。そして、推定したd軸インダクタンス L_d が上限値 L_{d_max} を超える場合は、d軸インダクタンス L_d の推定値を L_{d_max} に設定する。言い換えると、 $L_d > L_{d_max}$ の時は、 $L_d = L_{d_max}$ とする。

20

【0060】

図9は、推定したd軸インダクタンス L_d の下限値を説明する図である。d軸インダクタンス L_d の下限値 L_{d_min} は、モータ特性に応じて予め設定される。そして、推定したd軸インダクタンスが下限値 L_{d_min} 以下になると、d軸インダクタンス L_d の推定値を L_{d_min} に設定する。言い換えると、 $L_d < L_{d_min}$ の時は、 $L_d = L_{d_min}$ とする。

30

【0061】

このように、d軸インダクタンス L_d の推定値に制限を設けることによって、d軸PI制御ゲインとの関係において、電流制御が発散することを防ぐことができる。

【0062】

ここで、d軸インダクタンス L_d の値が小さくなると、電流の変化率が大きくなるので、制御が特に発散しやすくなる。そこで、d軸インダクタンス L_d が、 $L_d = L_{d_min}$ となった場合でも、制御が発散しないゲイン最大値 $Gain_{max}$ を事前に設定する。

【0063】

図10は、d軸PI制御ゲインの最大値を説明する図である。d軸PI制御ゲインがゲイン最大値 $Gain_{max}$ 以上になると、d軸PI制御ゲインを $Gain_{max}$ に設定する。言い換えると、d軸PI制御ゲイン $> Gain_{max}$ の時は、d軸PI制御ゲイン $= Gain_{max}$ とする。これにより、推定したd軸インダクタンス L_d がどんなに小さな値になったとしても、制御が発散するのを回避することができる。

40

【0064】

また、本実施形態の電流制御装置500では、上述したように推定したd軸インダクタンス L_d が上下限値になった場合には、次に初期化可能なタイミングで初期化シーケンスを実行する。例えば、第3実施形態で説明したように事前に取得した初期値 $L_d(0)$ を用いて初期化シーケンスを実行する場合には、推定したd軸インダクタンス L_d が上下限値になった後、モータ110が停止したタイミングで実行する。また、第4実施形態で説明したように電流制御中に算出された初期値 $L_d(0)$ を用いて初期化シーケンスを実行

50

する場合には、推定した d 軸インダクタンス L_d が上下限值になった後、q 軸電流 I_q に対する磁石磁束の変化率 $d_a / d I_q$ が略 0 になったタイミング（図 6、7 参照）で実行する。

【0065】

図 11 は、初期化シーケンスのフローを説明するフローチャートである。当該フローは、電流制御装置 500 の各構成が備わるコントローラが、車両システムが起動している間、所定の間隔で繰り返し実行するようにプログラムされている。

【0066】

ステップ S1101 では、d 軸インダクタンス L_d が推定される。

【0067】

ステップ S1102 では、ステップ S1101 にて推定された d 軸インダクタンスが、上下限值に達しているか否かを判定する。d 軸インダクタンスが上限値 L_{d_max} 、または、下限値 L_{d_min} であると判定されると、初期化フラグを ON に設定するためにステップ S1103 の処理が実行される。d 軸インダクタンスが上限値 L_{d_max} 、または、下限値 L_{d_min} ではないと判定された場合は、初期化フラグの状態を判定するために続くステップ S1104 の処理を実行する。

【0068】

ステップ S1103 では、d 軸インダクタンス L_d の推定値の初期化が必要であることを示す初期化フラグを ON に設定する。そして、現フロー中において初期化シーケンスを実行可能であるかを判定するために続くステップ S1105 の処理を実行する。

【0069】

ステップ S1104 では、前回までのフローにおいて初期化フラグが ON に設定されているか否かを判定する。d 軸インダクタンス L_d が一度でも上下限值に達した場合は、推定誤差が大きくなっている可能性があり、値が信用できないので、初期化を行う必要がある。したがって、前回フローにおいて d 軸インダクタンス L_d が上下限值に達していても、初期化シーケンスが実行されていなければ、初期化が実行されるまで初期化フラグが ON の状態が維持される。初期化フラグが ON に設定されていれば、現フローにおいて初期化シーケンスを実行可能であるかを判定するために続くステップ S1105 の処理を実行する。初期化フラグが ON に設定されていなければ、本タイミングに係る初期化シーケンス実行フローを終了する。

【0070】

ステップ S1105 では、初期化シーケンスを実行可能なタイミングか否かが判定される。上述したように、事前に取得した初期値 $L_d(0)$ を用いて初期化シーケンスを実行する場合には、モータ 110 が停止したか否かが判定される。電流制御中に算出された初期値 $L_d(0)$ を用いて初期化シーケンスを実行する場合には、q 軸電流 I_q に対する磁石磁束の変化率 $d_a / d I_q$ が略 0 であるか否かが判定される。モータ 110 が停止した、あるいは、q 軸電流 I_q に対する磁石磁束の変化率 $d_a / d I_q$ が略 0 であると判定された場合には、初期化シーケンスを実行するステップ S1106 の処理が実行される。

【0071】

モータ 110 が停止した、あるいは、q 軸電流 I_q に対する磁石磁束の変化率 $d_a / d I_d$ が略 0 であると判定されなかった場合には、現フローは初期化シーケンスを実行するタイミングではないので、本タイミングに係る初期化シーケンス実行フローを終了する。

【0072】

ステップ S1106 では、前ステップにおいて初期化可能なタイミングであると判定されたので、初期化シーケンスが実行される。初期化シーケンスが実行された後は、続くステップ S1107 の処理において初期化フラグが OFF に設定され、ステップ S1101 の処理に戻って再び d 軸インダクタンス L_d が推定される。車両の制御システムが起動する間、以上のフローが繰り返されることで、d 軸インダクタンス L_d を監視して、d 軸イ

10

20

30

40

50

ンダクタンス L_d が上下限值に達した場合には初期化が実行されるので、推定された d 軸インダクタンス L_d の精度が担保される。この結果、制御の発散を防ぐことができ、電流制御性が安定するので、モード効率を向上させることができる。

【 0 0 7 3 】

以上、第 5 実施形態の可変磁束モータ 1 1 0 の電流制御装置 5 0 0 は、推定した d 軸インダクタンス L_d が予め定めた d 軸インダクタンス上限値 L_{d_max} 以上の場合は、 d 軸インダクタンス L_d を d 軸インダクタンス上限値 L_{d_max} に設定し、推定した d 軸インダクタンス L_d が予め定めた d 軸インダクタンス下限値 L_{d_min} 以下の場合は、 d 軸インダクタンス L_d を d 軸インダクタンス下限値 L_{d_min} に設定する。これにより、 d 軸インダクタンス L_d に上下限の制限が設けられるので、電流制御が発散するのを防止することができる。

10

【 0 0 7 4 】

また、第 5 実施形態の可変磁束モータ 1 1 0 の電流制御装置 5 0 0 は、推定した d 軸 PI 制御ゲインが、 d 軸インダクタンス L_d が d 軸インダクタンス下限値 L_{d_min} の場合でも電流制御が発散しない最大のゲインを予め定めたゲイン最大値 G_{ain_max} 以上の場合は、 d 軸 PI 制御ゲインをゲイン最大値 G_{ain_max} に設定する、これにより、 d 軸インダクタンス L_d がどのような値になっても電流制御の発散を抑えることができるので、電流制御性をより安定させることができる。

【 0 0 7 5 】

また、第 5 実施形態の可変磁束モータ 1 1 0 の電流制御装置 5 0 0 は、 d 軸インダクタンス L_d が d 軸インダクタンス上限値 L_{d_max} 以上、もしくは、 d 軸インダクタンス L_d が d 軸インダクタンス下限値以下になった場合は、その後最初に q 軸電流 I_q に対する磁石磁束の変化率 $d \ a / d I_q$ が略 0 となった時に、初期化シーケンスを実行する。このように、 d 軸インダクタンス L_d が上下制限値に達した場合に、初期化可能な次のタイミングで初期化シーケンスが実行されることにより、 PI 制御における積分計算で加算されている誤差がリセットされるので、 d 軸インダクタンス L_d を精度よく推定し続けることができる。

20

【 0 0 7 6 】

[第 6 実施形態]

第 6 実施形態の可変磁束モータ 1 1 0 の電流制御装置 6 0 0 は、固定子巻線に印加する電流（巻線電流）により発生させた磁界の作用でモータ 1 1 0 の着磁率を変化させる磁力制御シーケンスを実行する点に特徴がある。以下、磁力制御シーケンスを実行するための構成、及び、磁力制御シーケンスが実行される場合の PI 制御ゲイン（着磁用 PI 制御ゲイン）の調整方法について図等を参照して説明する。

30

【 0 0 7 7 】

図 1 2 は、第 6 実施形態にかかる可変磁束モータ 1 1 0 の電流制御装置 6 0 0 の構成を示す制御ブロック図である。

【 0 0 7 8 】

着磁状態保持制御部 1 1 には、車両の運転状態に応じたトルク指令値 T_r^* 、及び、磁束オブザーバ 2 4 にて推定されるモータ 1 1 0 の磁石の着磁量推定値 a が入力される。そして、着磁状態保持制御部 1 1 は、これらの入力値に基づいて、モータ 1 1 0 を回転駆動させるための基本波成分、及び、磁石の着磁率を維持するのに必要な維持成分を含む d 軸電流指令値 I_{d1}^* 、及び、 q 軸電流指令値 I_{q1}^* を算出する。

40

【 0 0 7 9 】

そして、着磁状態保持制御部 1 1 は、 d 軸電流指令値 I_{d1}^* を d 軸演算器 1 2 d に出力するとともに、 q 軸電流指令値 I_{q1}^* を q 軸演算器 1 2 q に出力する。さらに、着磁状態保持制御部 1 1 は、 d 軸電流指令値 I_{d1}^* 及び q 軸電流指令値 I_{q1}^* を、非干渉制御部 1 5 に出力する。

【 0 0 8 0 】

d 軸演算器 1 2 d には、 d 軸電流指令値 I_{d1}^* 、及び、3 相 - dq 変換部 2 1 から出

50

力されるモータ 110 の d 軸電流値 I_d が入力される。そして、d 軸演算器 12d は、d 軸電流指令値 I_d^* から d 軸電流値 I_d を減ずることにより d 軸電流指令値 I_d^* を算出する。d 軸演算器 12d は、d 軸電流指令値 I_d^* を P I - d q 電流制御器 13 に出力する。

【0081】

同様に、q 軸演算器 12q には、q 軸電流指令値 I_q^* 、及び、3相 - d q 変換部 21 から出力されるモータ 110 の q 軸電流値 I_q が入力される。そして、q 軸演算器 12q は、q 軸電流指令値 I_q^* から q 軸電流値 I_q を減ずることにより q 軸電流指令値 I_q^* を算出する。q 軸演算器 12q は、q 軸電流指令値 I_q^* を P I - d q 電流制御器 13 に出力する。

【0082】

P I - d q 電流制御器 13 には、d 軸電流指令値 I_d^* 及び q 軸電流指令値 I_q^* が入力される。P I - d q 電流制御器 13 は、d 軸演算器 12d、及び、q 軸演算器 12q における演算途中にて求められる指令値と測定値との偏差と、第 1 から第 5 実施形態において説明したのと同様に設定される電流制御用の P I 制御ゲイン (d 軸 P I 制御ゲイン、q 軸 P I 制御ゲイン) とから、P I 制御演算によって d 軸電圧指令値 v_d1 と q 軸電圧指令値 v_q1 とを算出する。そして、P I - d q 電流制御器 13 は、d 軸電圧指令値 v_d1 を d 軸加算器 14d に出力するとともに、q 軸電圧指令値 v_q1 を q 軸加算器 14q に出力する。

【0083】

d 軸加算器 14d には、d 軸電圧指令値 v_d1 と、非干渉制御部 15 から出力される d 軸干渉電圧指令値 v_d' とに加えて、着磁用 P I 制御部 601 から出力される着磁用 d 軸電圧指令値 V_{dm} が入力される。d 軸加算器 14d は、d 軸電圧指令値 v_d1 と d 軸干渉電圧指令値 v_d' と着磁用 d 軸電圧指令値 V_{dm} とを加算し、その加算結果である d 軸電圧指令値 v_d を d q - 3 相変換部 16 に出力する。

【0084】

q 軸加算器 14q には、q 軸電圧指令値 v_q1 と、非干渉制御部 15 から出力される q 軸干渉電圧指令値 v_q' とに加えて、着磁用 P I 制御部 601 から出力される着磁用 q 軸電圧指令値 V_{qm} が入力される。q 軸加算器 14q は、q 軸電圧指令値 v_q1 と q 軸干渉電圧指令値 v_q' と着磁用 q 軸電圧指令値 V_{qm} とを加算し、その加算結果である q 軸電圧指令値 v_q を d q - 3 相変換部 16 に出力する。

【0085】

非干渉制御部 15 は、d 軸電流指令値 I_d^* 、q 軸電流指令値 I_q^* 、及び、モータ 110 の電気角速度 ω に基づいて、d 軸電流と q 軸電流における干渉を抑制するための、d 軸干渉電圧指令値 v_d' 及び q 軸干渉電圧指令値 v_q' を求める。そして、非干渉制御部 15 は、d 軸干渉電圧指令値 v_d' を d 軸加算器 14d に出力するとともに、q 軸干渉電圧指令値 v_q' を q 軸加算器 14q に出力する。

【0086】

d q - 3 相変換部 16 には、d 軸電圧指令値 v_d 、及び、q 軸電圧指令値 v_q に加えて、位相速度演算部 22 から出力されるモータ 110 の回転子位相角 θ が入力される。そして、d q - 3 相変換部 16 は、指令値に対して回転子位相角 θ に基づいて、3 相電圧指令値 v_u 、 v_v 、 v_w を算出する。そして、d q - 3 相変換部 16 は、算出した 3 相電圧指令値 v_u 、 v_v 、 v_w を変調率演算部 17 に出力する。

【0087】

変調率演算部 17 は、3 相電圧指令値 v_u 、 v_v 、 v_w と、モータ 110 への印可電圧を生成するインバータ 19 における基準電圧である D C 電圧 V_{dc} とに基づいて、P W M 信号の生成に用いる変調率 m_u 、 m_v 、 m_w を算出して、それらの変調率を三角波比較部 18 に出力する。

【0088】

三角波比較部 18 は、入力される変調率 m_u 、 m_v 、 m_w と三角波とを比較することに

10

20

30

40

50

より、PWM信号を生成し、このPWM信号をインバータ19に出力する。

【0089】

インバータ19は、PWM信号に基づいて、上アーム及び下アームからなるスイッチ回路(図示省略)を制御することにより、直流電圧から3相交流信号を生成する。そして、インバータ19は、それらの3相交流信号をモータ110に出力する。これにより、モータ110を回転駆動させることができる。

【0090】

電流センサ20は、インバータ19とモータ110との間に設けられており、u相電流 I_u 、及び、w相電流 I_w を測定する。そして、電流センサ20は、測定した電流値を、3相-dq変換部21に出力する。

10

【0091】

3相-dq変換部21には、u相電流 I_u 、及び、w相電流 I_w が入力されるとともに、位相速度演算部22から回転子位相角 θ が入力される。そして、3相-dq変換部21は、これらの入力に基づいて、モータ110に流れる電流値をdq軸で示したd軸電流値 I_d 、及び、q軸電流値 I_q を算出する。そして、3相-dq変換部21は、d軸電流値 I_d をd軸演算器12dに出力し、q軸電流値 I_q をq軸演算器12qに出力する。同時に、3相-dq変換部21は、d軸電流値 I_d 及びq軸電流値 I_q を、インダクタンス推定部602、磁束オブザーバ24、及び、着磁用PI制御部601に出力する。

【0092】

位相速度演算部22においては、モータ110に設けられているレゾルバ等の回転角度センサ23により検出された信号に基づいて、モータ110の回転子位相角 θ を求める。位相速度演算部22は、回転子位相角 θ を、dq-3相変換部16及び3相-dq変換部21に出力する。更に、位相速度演算部22は、モータ110の電気角速度 ω を演算により求め、求めた電気角速度 ω を磁束オブザーバ24に出力する。

20

【0093】

磁束オブザーバ24においては、d軸電流値 I_d 、q軸電流値 I_q 、及び、モータ110の電気角速度 ω が入力される。磁束オブザーバ24は、これらの入力に基づいて、着磁量推定値 a を算出し、算出した着磁量推定値 a を、着磁状態保持制御部11、及び、着磁用PI制御部601に出力する。ここで、着磁量推定値 a とは、磁石の磁石磁束 a を表す着磁量(磁束数)の推定値であって、固定子コイルにより発生する磁束と鎖交する磁束の合計数を示す値である。

30

【0094】

具体的には、磁束オブザーバ24は、d軸電流値 I_d 、q軸電流値 I_q 、及び、電気角速度 ω に基づきモータ電圧方程式を予め記憶している。そして、磁束オブザーバ24は、モータ電圧方程式を用いて着磁量推定値 a を算出する。

【0095】

インダクタンス推定部602には、d軸電流値 I_d 、q軸電流値 I_q 、および、d軸電圧指令値 v_d が入力される。そして、インダクタンス推定部602は、第1から第5実施形態において説明したq軸インダクタンス推定器103、223、及びd軸インダクタンス推定器104と同様の方法により、d軸インダクタンス L_d 及びq軸インダクタンス L_q (これらをまとめて、以下、dq軸インダクタンス推定値ともいう)を推定する。dq軸インダクタンス推定値は、着磁用PI制御部601に出力される。

40

【0096】

着磁用PI制御部601の前段には減算器27が設けられている。減算器27には、上位システム(不図示)から出力される磁石の着磁量指令値 a^* から、磁束オブザーバ24から出力される着磁量推定値 a を減じて、着磁量偏差 a を算出する。なお、上位システムにおいては、運転状態に応じて最適な磁石の着磁量となるような着磁量指令値 a^* が求められている。

【0097】

着磁用PI制御部601には、着磁量偏差 a と、d軸電流値 I_d と、q軸電流値 I

50

q と、d q 軸インダクタンス推定値とが入力される。

【0098】

着磁用 P I 制御部 601 は、着磁量偏差 a に応じて、着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* 、及び、着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* を算出する。具体的には、着磁量偏差 a と、着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* 及び着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* との関係を定めたマップ、あるいは関係式を予め記憶して、当該マップあるいは関係式を参照することにより、入力される着磁量偏差 a から、着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* 及び着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* を生成する。

【0099】

また、着磁用 P I 制御部 601 は、生成した着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* と d 軸電流値 I_d との偏差、及び、生成した着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* と q 軸電流値 i_q との偏差に応じて、着磁用電流 P I 制御を行う。これにより、着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* 及び着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* と後述する着磁用 P I 制御ゲインとから着磁用 d 軸電圧指令値 V_{dm}^* 及び着磁用 q 軸電圧指令値 V_{qm}^* が算出される。算出された着磁用 d 軸電圧指令値 V_{dm}^* は d 軸加算器 14d に出力され、着磁用 q 軸電圧指令値 V_{qm}^* は q 軸加算器 14q に出力される。

10

【0100】

この着磁用電流 P I 制御において用いられる着磁用 P I 制御ゲインは、着磁量偏差 a から算出される着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* 及び着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* と、着磁用 P I 制御ゲインとの関係を定めたマップ、あるいは関係式を予め記憶して、当該マップあるいは関係式を参照することにより求められる。なお、永久磁石に対する着磁を行う際は、P I - d q 電流制御器 13 において P I 制御ゲイン (d 軸 P I 制御ゲイン、q 軸 P I 制御ゲイン) を用いて行われた電流制御から、着磁用 P I 制御部 601 において着磁用 P I 制御ゲインを用いて行う電流制御に切り替わる。

20

【0101】

このように、着磁量指令値 a^* と着磁量推定値 a との偏差に応じて着磁用 P I 制御ゲインを調整することにより、着磁用電流 (磁力制御用電流) がモータ 110 に通電される前に、着磁用電流の電流振幅と位相とを決定することが出来る。その結果、電流やモータの運転条件によって変動するインダクタンスに応じた P I 制御ゲインを適切に設定することが出来る。

30

【0102】

さらに、着磁用 P I 制御部 601 は、入力される d q 軸インダクタンス推定値に応じて着磁用 P I 制御ゲインを調整する。モータ 110 が備える永久磁石が着磁されることによりその磁束量が大きくなると、磁気飽和によりインダクタンスが下がる傾向になる。インダクタンスが低下すると電流制御が発散しやすくなる。したがって、着磁用 P I 制御ゲインをインダクタンスに応じて調整することにより、電流制御における着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* 、及び、着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* に対する実電流の追従性が向上するので、制御安定性をより向上させることができる。

【0103】

図 13 は、着磁用 P I 制御ゲインを調整する前後での着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* に対する実電流の追従性を示す図である。図 13 (a) は、着磁用 P I 制御ゲインを調整する前の実電流の追従性を示し、図 13 (b) は、着磁用 P I 制御ゲインを調整した後の実電流の追従性を示している。図中の実線は、着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* を表し、点線は実電流 (d 軸電流) を表している。図示するとおり、着磁用 P I 制御ゲインを調整することによって、実電流の追従性が向上していることが分かる。

40

【0104】

このように、d q 軸インダクタンス推定値に応じて着磁用 P I 制御ゲインを能動的に調整することにより、モータの運転条件等が変化している過渡状態においても安定して磁力制御を行うことが出来る。

【0105】

50

着磁用 P I 制御部 6 0 1 は、以上の通り調整された着磁用 P I 制御ゲインを用いて着磁用電流 P I 制御を行うことにより、着磁用 d 軸電圧指令値 $V d m^*$ 及び着磁用 q 軸電圧指令値 $V q m^*$ を生成する。生成された着磁用 d 軸電圧指令値 $V d m^*$ は、d 軸加算器 1 4 d に出力され、着磁用 q 軸電圧指令値 $V q m^*$ は q 軸加算器 1 4 q に出力される。

【 0 1 0 6 】

また、着磁用 P I 制御部 6 0 1 は、着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ 及び着磁用 q 軸電流指令値 $I q m^*$ の時間変化率を調整することもできる。電流制御においては、インダクタンスの大きさによって電流指令値に対する実電流の応答性（追従性）が変化する。したがって、d q 軸インダクタンス推定値に応じて着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ 及び着磁用 q 軸電流指令値 $I q m^*$ の時間変化率の上限値を設定する。例えば、インダクタンスが小さく、電流制御が発散しやすい場合には、電流変化率の上限値を下げることで着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ 及び着磁用 q 軸電流指令値 $I q m^*$ の立ち上りをより緩やかにする。これにより、着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ 及び着磁用 q 軸電流指令値 $I q m^*$ に対する実電流の追従性を向上させることができる。この上限値は、着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ 及び着磁用 q 軸電流指令値 $I q m^*$ に対して実電流が追従可能な範囲内の電流変化率に設定される。

10

【 0 1 0 7 】

図 1 4 は、着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ の時間変化率を調整する前後での着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ に対する実電流の追従性を示す図である。図 1 4 (a) は、着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ の時間変化率を調整する前の実電流の追従性を示し、図 1 4 (b) は、着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ の時間変化率を調整した後の実電流の追従性を示している。図中の実線は、着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ を表し、点線は実電流（d 軸電流）を表している。

20

【 0 1 0 8 】

図示するとおり、着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ の時間変化率を調整することにより着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ の変化率が制限されて、着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ の立ち上りおよび立ち下りが緩やかになるので、実電流の追従性が向上していることが分かる。

【 0 1 0 9 】

以上、第 6 実施形態の可変磁束モータ 1 1 0 の電流制御装置 6 0 0 は、着磁率指令値 a^* に基づいて永久磁石の着磁率を変化させるための着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ 及び着磁用 q 軸電流指令値 $I q m^*$ を算出し、前記着磁用 d 軸電流指令値 $I d m^*$ 及び着磁用 q 軸電流指令値 $I q m^*$ に応じて、着磁用 P I 制御ゲインを算出する。永久磁石の着磁率を変化させる際には、d 軸 P I 制御ゲインおよび q 軸 P I 制御ゲインを用いた電流制御から、着磁用 P I 制御ゲインを用いた電流制御に切り替える。これにより、通常の電流制御とは異なる応答性が要求される磁力制御シーケンスを実行する場合には、磁力制御シーケンスに適した P I 制御ゲインが選択されるので、磁力制御シーケンスを実行する際にも安定して、電流制御を行うことが出来る。

30

【 0 1 1 0 】

また、第 6 実施形態の可変磁束モータ 1 1 0 の電流制御装置 6 0 0 は、永久磁石の着磁率を推定し、着磁率指令値 a^* と着磁量推定値 a とに応じて着磁用 P I 制御ゲインを調整する。これにより、磁力制御シーケンスが実行される間、電流やモータの運転条件によって変動するインダクタンスに応じた P I 制御ゲインを適切に設定することが出来る。

40

【 0 1 1 1 】

また、第 6 実施形態の可変磁束モータ 1 1 0 の電流制御装置 6 0 0 は、推定した d 軸インダクタンス $L d$ と推定した q 軸インダクタンス $L q$ とに応じて、着磁用 P I 制御ゲインを調整する。これにより、インダクタンスの変化に応じて電流制御の応答性が変化している過渡状態においても、インダクタンスの変化に応じて着磁用 P I 制御ゲインを変化させることが出来るので、磁力制御シーケンスが実行される間、安定して磁力制御を行うことが出来る。

【 0 1 1 2 】

50

また、第6実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置600は、推定したd軸インダクタンス L_d とq軸インダクタンス L_q とに応じて着磁用d q軸電流指令値の変化率を調整する。これにより、インダクタンスの変化に応じて着磁用d q軸電流指令値に対する実電流の追従性が変化する場合でも、インダクタンスの変化に応じて着磁用d q軸電流指令値の変化率を調整することが可能となる。この結果、実電流の追従性をより向上させることができるので、着磁用PI制御ゲインのみを調整するよりもさらに電流制御の安定性を向上させることができる。

【0113】

本発明は、上述した一実施形態に限定されることはない。例えば、d q軸インダクタンス推定値に応じた着磁用PI制御ゲインの調整と、着磁用d軸電流指令値 I_{dm}^* 及び着磁用q軸電流指令値 I_{qm}^* の時間変化率の調整とを全て実行する必要は必ずしもなく、省略することもできる。各実施形態で説明した構成は、矛盾が生じない範囲で適宜組み合わせられてもよい。

10

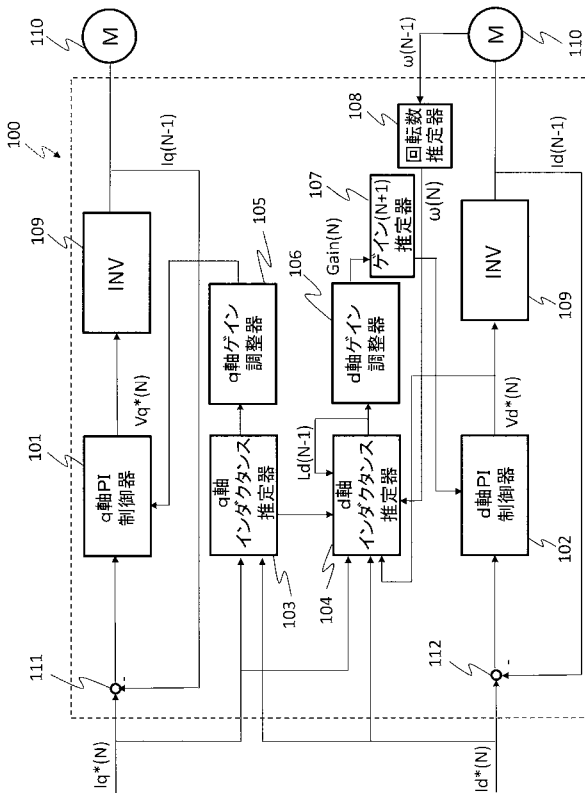
【符号の説明】

【0114】

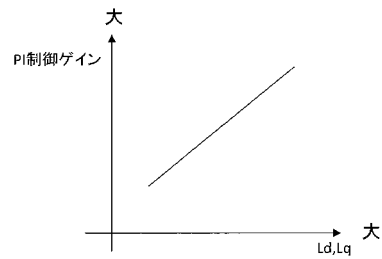
- 101 ... q軸PI制御部 (q軸PI制御器)
- 102 ... d軸PI制御部 (d軸PI制御器)
- 103 ... L_q 推定部 (q軸インダクタンス推定器)
- 104 ... L_d 推定部 (d軸インダクタンス推定器)
- 106 ... d軸PI制御ゲイン調整部 (d軸ゲイン調整器)
- 108 ... 回転数取得部 (回転数推定器)
- 109 ... インバータ

20

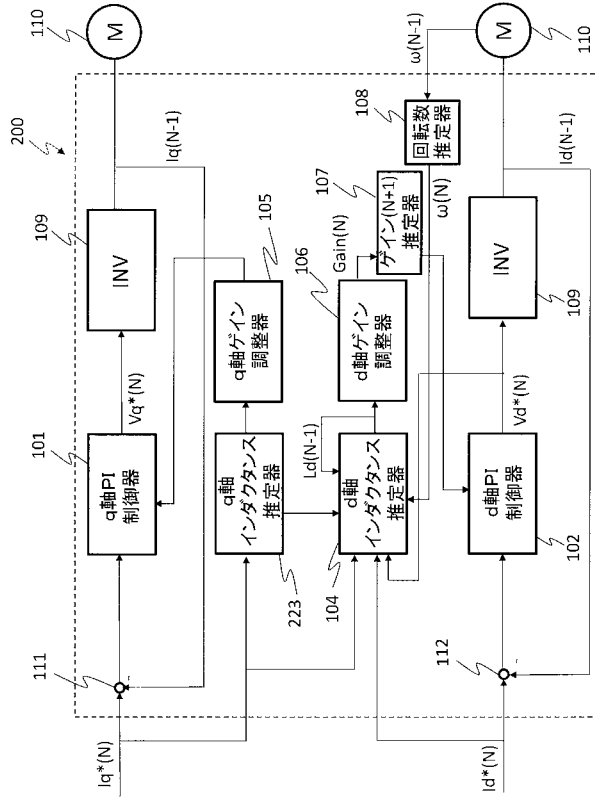
【図1】



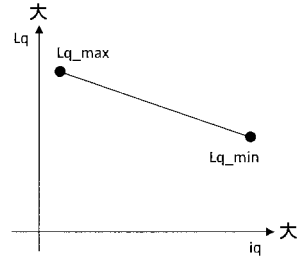
【図2】



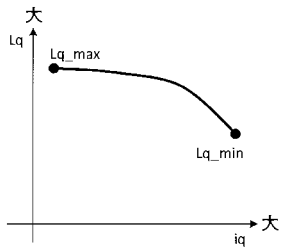
【図3】



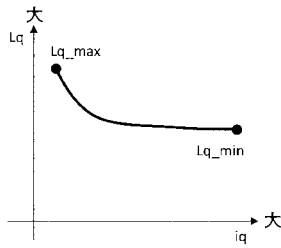
【図4】



【図5】

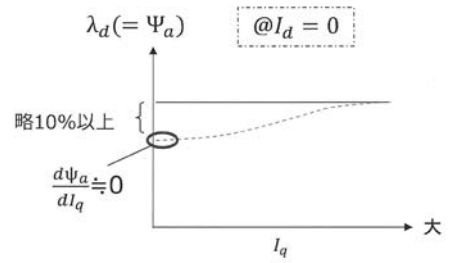


(a)

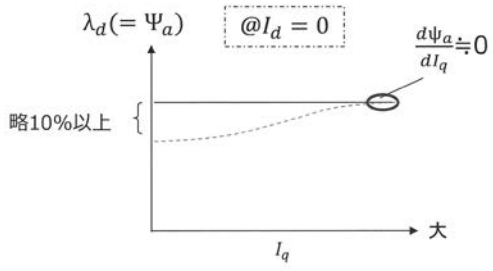


(b)

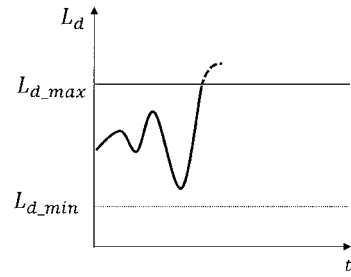
【図6】



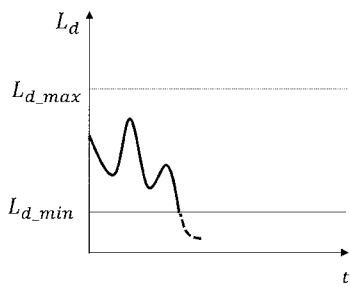
【 図 7 】



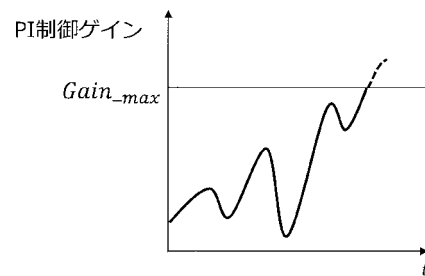
【 図 8 】



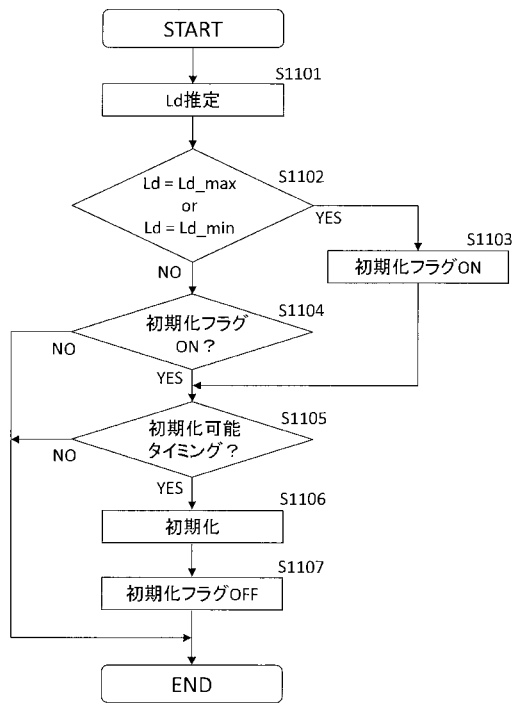
【 図 9 】



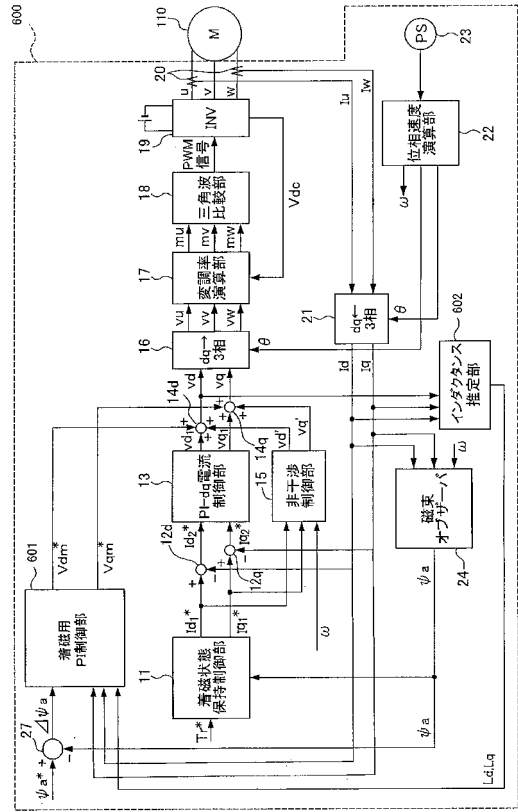
【 図 10 】



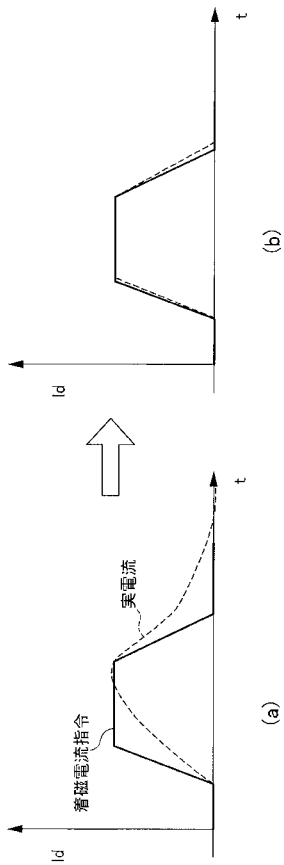
【図 1 1】



【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 4】

