

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6790760号
(P6790760)

(45) 発行日 令和2年11月25日(2020.11.25)

(24) 登録日 令和2年11月9日(2020.11.9)

(51) Int. Cl.	F I
HO2P 6/185 (2016.01)	HO2P 6/185
HO2P 27/06 (2006.01)	HO2P 27/06
HO2M 7/48 (2007.01)	HO2M 7/48 E

請求項の数 18 (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2016-227899 (P2016-227899)	(73) 特許権者	000003997
(22) 出願日	平成28年11月24日(2016.11.24)		日産自動車株式会社
(65) 公開番号	特開2018-85851 (P2018-85851A)		神奈川県横浜市神奈川区宝町2番地
(43) 公開日	平成30年5月31日(2018.5.31)	(74) 代理人	110002468
審査請求日	令和1年9月11日(2019.9.11)		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
		審査官	池田 貴俊

最終頁に続く

(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) 【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PI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PI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PI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て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し、
 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、

10

20

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 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、

10

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 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。

【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、

20

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。

【請求項 7】

30

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、

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、

40

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

50

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、

10

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は、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は、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。

20

【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PI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は、前記d軸PI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、

30

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、

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PI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、

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PI制御ゲインをさらに調整する、

40

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1から16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18】

固定子巻線を有する固定子と、

50

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PI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PI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PI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PI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Lq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Ld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PI制御ゲインを調整するd軸PI制御ゲイン調整部と、

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PI制御ゲインを算出する着磁用PI制御部と、

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し、

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

【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

10

20

30

40

50

、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。

【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。さらに、着磁率指令値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軸電流指令値及び着磁用q軸電流指令値を算出し、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PI制御ゲインを算出し、永久磁石の着磁率を変化させる際には、d軸PI制御ゲインおよびq軸PI制御ゲインを用いた電流制御から、着磁用PI制御ゲインを用いた電流制御に切り替える。

【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。

【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。

【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。

【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。

10

20

30

40

50

【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。

10

【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できる。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。

20

【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。

30

【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、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。

40

【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

50

出力値は q 軸 P I 制御器 1 0 1 に出力される。

【 0 0 1 7 】

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。

【 0 0 1 8 】

q 軸 P I 制御器 1 0 1 は、入力される q 軸減算器 1 1 1 の出力値、及び、後述する q 軸 P I 制御ゲイン調整器 1 0 5 から入力される q 軸 P I 制御ゲインから比例積分 (P I) 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 1 0 9 へ出力する。

【 0 0 1 9 】

d 軸減算器 1 1 2 は、電流指令値 $I_{d^*}(N)$ から、可変磁束モータ 1 1 0 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 1 1 0 に所望のトルクを出力させるためにモータ 1 1 0 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 1 0 9 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 1 1 2 の出力値は、d 軸 P I 制御器 1 0 2 に出力される。

【 0 0 2 0 】

d 軸 P I 制御器 1 0 2 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 1 0 7 から入力される d 軸 P I 制御ゲインから比例積分 (P I) 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 1 0 9 へ出力する。

【 0 0 2 1 】

q 軸インダクタンス推定器 1 0 3 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 P I 制御ゲイン調整器 1 0 5 に入力される。

【 0 0 2 2 】

q 軸 P I 制御ゲイン調整器 1 0 5 は、q 軸インダクタンス L_q に応じた q 軸 P I 制御ゲインを算出して、q 軸 P I 制御器 1 0 1 に出力する。q 軸 P I 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。

【 0 0 2 3 】

d 軸インダクタンス推定器 1 0 4 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 P I 制御器 1 0 2 の出力値である d 軸電圧指令値 $V_{d^*}(N)$ と、回転数推定器 1 0 8 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 1 1 0 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 1 0 3 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 軸インダクタンス $L_d(N-1)$ 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 1 0 6 に出力される。

【 0 0 2 4 】

【 数 1 】

$$L_d(N) = \int \left(\frac{V_{d^*} + \omega L_q I_{q^*}}{I_{d^*}} - R_a \right) dt + L_d(N-1) \quad \dots (1)$$

【 0 0 2 5 】

d 軸ゲイン調整器 1 0 6 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 1 0 7 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

10

20

30

40

50

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PI制御ゲインを調整することができる。

【0026】

d軸ゲイン($N+1$)推定器107は、d軸PI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PI制御ゲイン($N+1$)を推定する。算出したd軸PI制御ゲイン($N+1$)は、d軸PI制御器102に出力される。これにより、d軸PI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PI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。

10

【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PI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。

20

【0028】

そして、インバータ109は、q軸PI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PI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PI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。

30

【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PI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PI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。

40

【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

50

モータ 110 の効率を向上させることができる。

【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。

【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。

【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。

【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 が備えるメモリの使用量を低減することができる。

【0039】

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。

【0040】

[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

10

20

30

40

50

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。

【0041】

【数2】

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

【0042】

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电された時の制御タイミングのことをいう。

10

【0043】

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。

【0044】

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。

20

【0045】

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。

【0046】

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。

【0047】

30

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。

【0048】

[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】

40

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モータ特性であり、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 $d\psi_a / dI_d$ 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

50

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 λ_{d1} 、 λ_{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。

【0051】

【数3】

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

10

【0052】

この時、q軸電流 I_q に対する磁石磁束 λ_a の変化率 $d\lambda_a / dI_q$ は略0なので、磁石磁束 λ_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、モータ110のモード効率をより向上させることができる。

20

【0053】

なお、図6、図7で示したq軸電流 I_q とd軸磁束 λ_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 $d\lambda_a / dI_d$ 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。

30

【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 $d\lambda_a / dI_q$ 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の運転中において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、初期化シーケンスでは、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 λ_{d1} 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 λ_{d2} 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。

40

【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 λ_{d1} 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 λ_{d2} 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。

50

【 0 0 5 8 】

〔 第 5 実施形態 〕

第 5 実施形態の電流制御装置 5 0 0 は、推定した d 軸インダクタンス L_d 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 P I 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。

【 0 0 5 9 】

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。

10

【 0 0 6 0 】

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。

【 0 0 6 1 】

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 P I 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。

20

【 0 0 6 2 】

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 G_{ain_max} を事前に設定する。

【 0 0 6 3 】

図 1 0 は、d 軸 P I 制御ゲインの最大値を説明する図である。d 軸 P I 制御ゲインがゲイン最大値 G_{ain_max} 以上になると、d 軸 P I 制御ゲインを G_{ain_max} に設定する。言い換えると、d 軸 P I 制御ゲイン $> G_{ain_max}$ の時は、d 軸 P I 制御ゲイン $= G_{ain_max}$ 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。

30

【 0 0 6 4 】

また、本実施形態の電流制御装置 5 0 0 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 1 1 0 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、q 軸電流 I_q に対する磁石磁束の変化率 $d \psi_a / d I_q$ が略 0 になったタイミング（図 6、7 参照）で実行する。

40

【 0 0 6 5 】

図 1 1 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 5 0 0 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。

【 0 0 6 6 】

ステップ S 1 1 0 1 では、d 軸インダクタンス L_d が推定される。

【 0 0 6 7 】

ステップ S 1 1 0 2 では、ステップ S 1 1 0 1 にて推定された d 軸インダクタンスが、上下限値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

50

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 S 1 1 0 3 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 S 1 1 0 4 の処理を実行する。

【 0 0 6 8 】

ステップ S 1 1 0 3 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 S 1 1 0 5 の処理を実行する。

【 0 0 6 9 】

ステップ S 1 1 0 4 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 が一度でも上下限値に達した場合は、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 が上下限値に達していても、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 S 1 1 0 5 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。

【 0 0 7 0 】

ステップ S 1 1 0 5 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 1 1 0 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 1 1 0 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 S 1 1 0 6 の処理が実行される。

【 0 0 7 1 】

モータ 1 1 0 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。

【 0 0 7 2 】

ステップ S 1 1 0 6 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 S 1 1 0 7 の処理において初期化フラグが OFF に設定され、ステップ S 1 1 0 1 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 軸インダクタンス L_d が上下限値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。

【 0 0 7 4 】

10

20

30

40

50

また、第5実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置500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 $Gain_max$ 以上の場合は、d軸PI制御ゲインをゲイン最大値 $Gain_max$ 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。

【0075】

また、第5実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置500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 da/dI_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。

10

【0076】

[第6実施形態]

第6実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置600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110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。

20

【0077】

図12は、第6実施形態にかかる可変磁束モータ110の電流制御装置600の構成を示す制御ブロック図である。

【0078】

着磁状態保持制御部11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24にて推定されるモータ110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11は、これらの入力値に基づいて、モータ110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。

30

【0079】

そして、着磁状態保持制御部11は、d軸電流指令値 I_{d1}^* をd軸演算器12dに出力するとともに、q軸電流指令値 I_{q1}^* をq軸演算器12qに出力する。さらに、着磁状態保持制御部11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15に出力する。

【0080】

d軸演算器12dには、d軸電流指令値 I_{d1}^* 、及び、3相-dq変換部21から出力されるモータ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_{d1}^* 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_{d2}^* を算出する。d軸演算器12dは、d軸電流指令値 I_{d2}^* をPI-dq電流制御器13に出力する。

40

【0081】

同様に、q軸演算器12qには、q軸電流指令値 I_{q1}^* 、及び、3相-dq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_{q1}^* 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_{q2}^* を算出する。q軸演算器12qは、q軸電流指令値 I_{q2}^* をPI-dq電流制御器13に出力する。

【0082】

PI-dq電流制御器13には、d軸電流指令値 I_{d2}^* 及びq軸電流指令値 I_{q2}^* が

50

入力される。PI-dq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PI制御ゲイン（d軸PI制御ゲイン、q軸PI制御ゲイン）とから、PI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、PI-dq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PI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dq-3相変換部16に出力する。

10

【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PI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dq-3相変換部16に出力する。

【0085】

20

非干渉制御部15は、d軸電流指令値 I_{d1}^* 、q軸電流指令値 I_{q1}^* 、及び、モータ110の電気角速度に基づいて、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】

dq-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の回転子位相角が入力される。そして、dq-3相変換部16は、指令値に対して回転子位相角に基づいて、3相電圧指令値 v_u 、 v_v 、 v_w を算出する。そして、dq-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。

30

【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DC電圧 V_{dc} とに基づいて、PWM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】

40

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。

【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

50

、位相速度演算部 2 2 から回転子位相角 θ が入力される。そして、3 相 - d q 変換部 2 1 は、これらの入力に基づいて、モータ 1 1 0 に流れる電流値を d q 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 - d q 変換部 2 1 は、d 軸電流値 I_d を d 軸演算器 1 2 d に出力し、q 軸電流値 I_q を q 軸演算器 1 2 q に出力する。同時に、3 相 - d q 変換部 2 1 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 6 0 2、磁束オブザーバ 2 4、及び、着磁用 P I 制御部 6 0 1 に出力する。

【 0 0 9 2 】

位相速度演算部 2 2 においては、モータ 1 1 0 に設けられているレゾルバ等の回転角度センサ 2 3 により検出された信号に基づいて、モータ 1 1 0 の回転子位相角 θ を求める。位相速度演算部 2 2 は、回転子位相角 θ を、d q - 3 相変換部 1 6 及び 3 相 - d q 変換部 2 1 に出力する。更に、位相速度演算部 2 2 は、モータ 1 1 0 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 2 4 に出力する。

10

【 0 0 9 3 】

磁束オブザーバ 2 4 においては、d 軸電流値 I_d 、q 軸電流値 I_q 、及び、モータ 1 1 0 の電気角速度 ω が入力される。磁束オブザーバ 2 4 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 1 1、及び、着磁用 P I 制御部 6 0 1 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。

【 0 0 9 4 】

具体的には、磁束オブザーバ 2 4 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 2 4 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。

20

【 0 0 9 5 】

インダクタンス推定部 6 0 2 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 6 0 2 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 1 0 3、2 2 3、及び d 軸インダクタンス推定器 1 0 4 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、d q 軸インダクタンス推定値ともいう）を推定する。d q 軸インダクタンス推定値は、着磁用 P I 制御部 6 0 1 に出力される。

30

【 0 0 9 6 】

着磁用 P I 制御部 6 0 1 の前段には減算器 2 7 が設けられている。減算器 2 7 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 2 4 から出力される着磁量推定値 a を減じて、着磁量偏差 Δa 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。

【 0 0 9 7 】

着磁用 P I 制御部 6 0 1 には、着磁量偏差 Δa と、d 軸電流値 I_d と、q 軸電流値 I_q と、d q 軸インダクタンス推定値とが入力される。

【 0 0 9 8 】

着磁用 P I 制御部 6 0 1 は、着磁量偏差 Δa 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 Δa 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}^* との関係性を定めたマップ、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 Δa 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。

40

【 0 0 9 9 】

また、着磁用 P I 制御部 6 0 1 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

50

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 14 d に出力され、着磁用 q 軸電圧指令値 V_{qm}^* は q 軸加算器 14 q に出力される。

【 0 1 0 0 】

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。

10

【 0 1 0 1 】

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。

【 0 1 0 2 】

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。

20

【 0 1 0 3 】

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。

30

【 0 1 0 4 】

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。

【 0 1 0 5 】

着磁用 P I 制御部 601 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_{dm}^* 及び着磁用 q 軸電圧指令値 V_{qm}^* を生成する。生成された着磁用 d 軸電圧指令値 V_{dm}^* は、d 軸加算器 14 d に出力され、着磁用 q 軸電圧指令値 V_{qm}^* は q 軸加算器 14 q に出力される。

40

【 0 1 0 6 】

また、着磁用 P I 制御部 601 は、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_{dm}^* 及び着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* 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_{dm}^* 及び着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* の立ち上りをより緩やかにする。これ

50

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}^* 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_{dm}^* 及び着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* 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。

【0107】

図14は、着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* 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_{dm}^* に対する実電流の追従性を示す図である。図14(a)は、着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* の時間変化率を調整する前の実電流の追従性を示し、図14(b)は、着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* 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_{dm}^* を表し、点線は実電流 (d 軸電流) を表している。

10

【0108】

図示するとおり、着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* 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_{dm}^* の変化率が制限されて、着磁用 d 軸電流指令値 I_{dm}^* 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。

【0109】

以上、第6実施形態の可変磁束モータ110の電流制御装置600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_{dm}^* 及び着磁用 q 軸電流指令値 I_{qm}^* を算出し、前記着磁用 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できる。

20

【0110】

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、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。

30

【0111】

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。

【0112】

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出来るので、着磁用 P I 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。

40

【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 P I 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

50

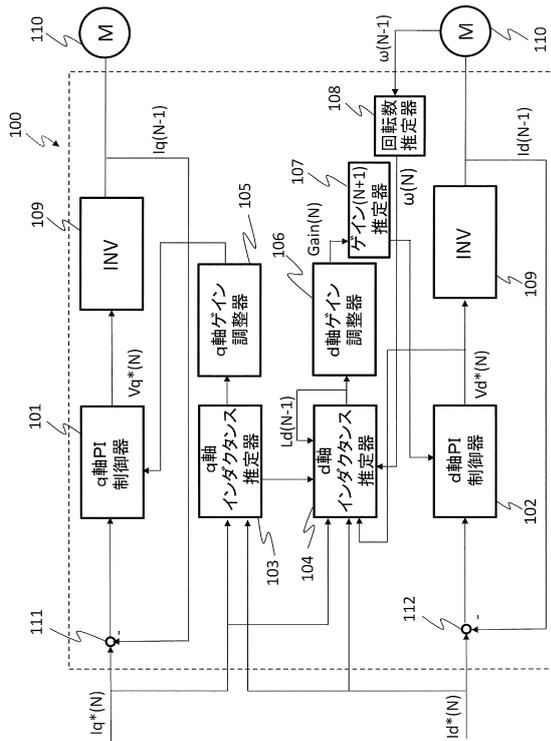
わされてもよい。

【符号の説明】

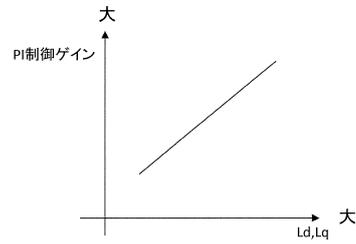
【0114】

- 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 ... Lq推定部 (q軸インダクタンス推定器)
- 104 ... Ld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

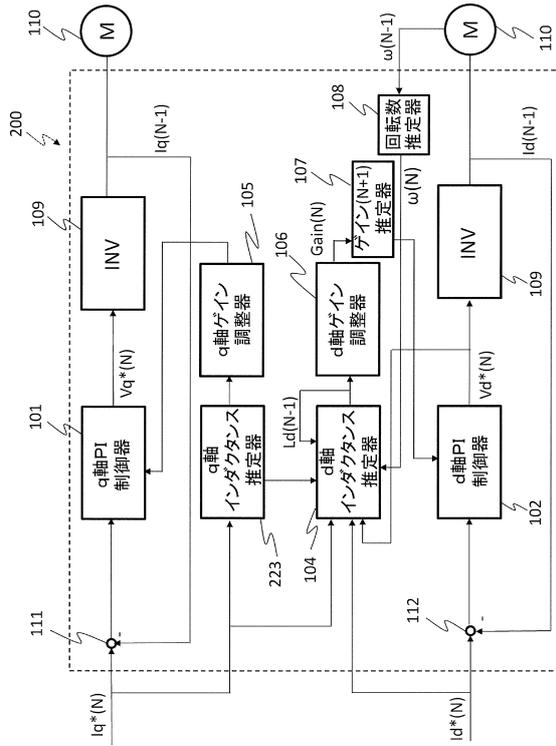
【図1】



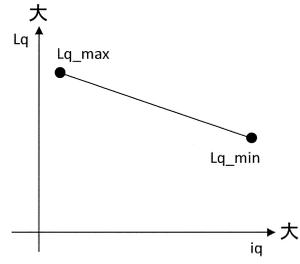
【図2】



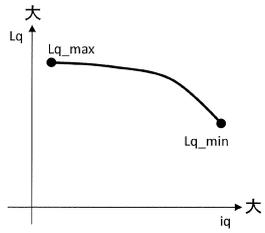
【図3】



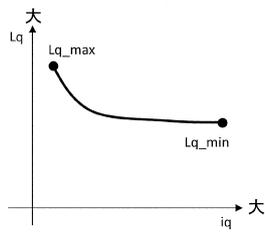
【図4】



【図5】

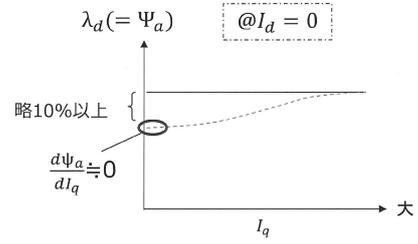


(a)

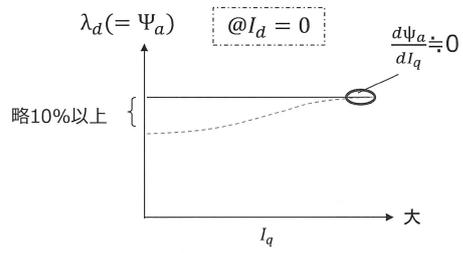


(b)

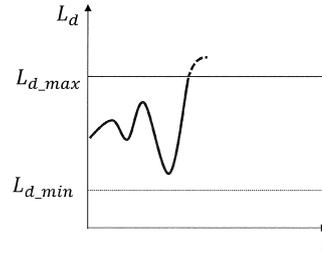
【図6】



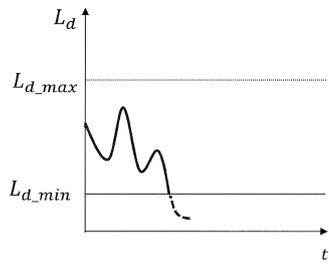
【 図 7 】



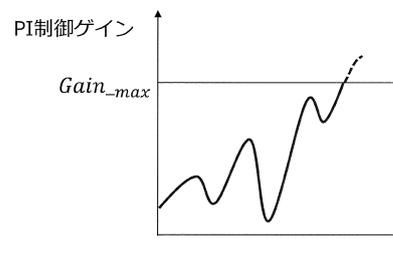
【 図 8 】



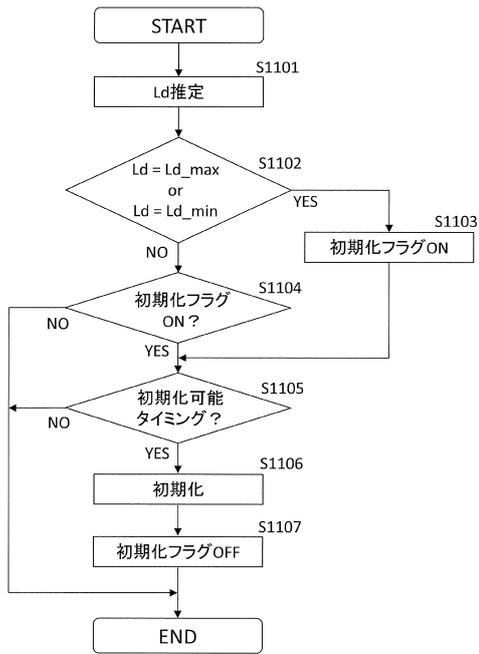
【 図 9 】



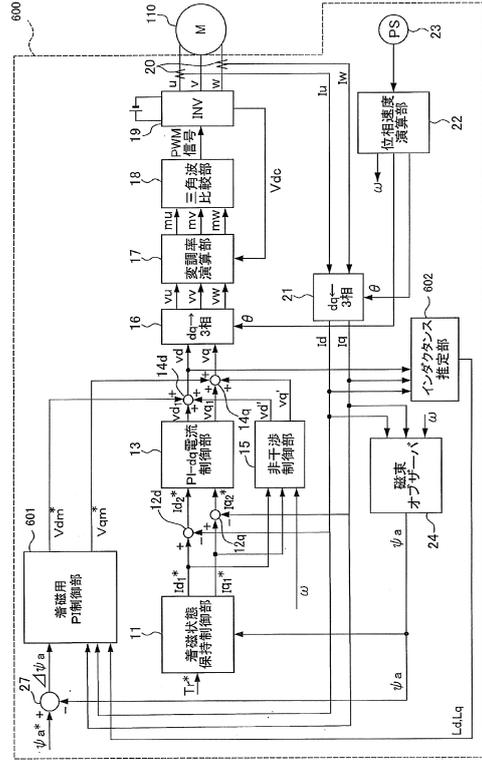
【 図 10 】



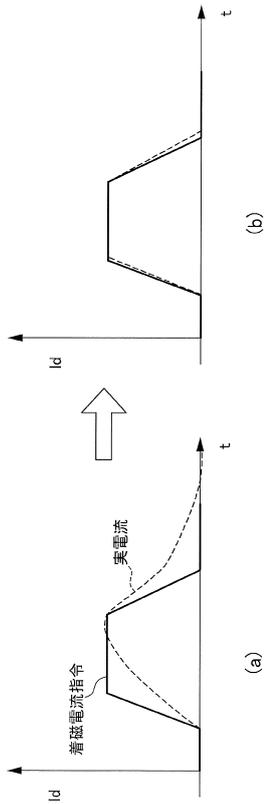
【図11】



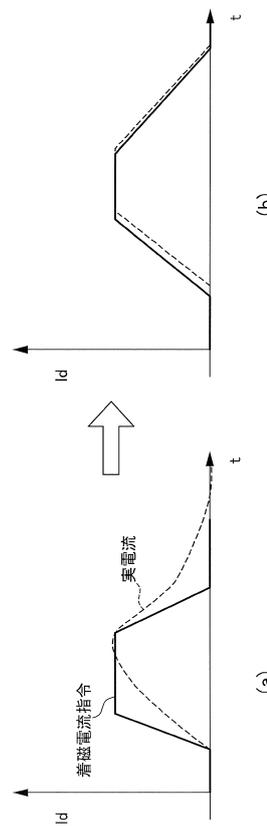
【図12】



【図13】



【図14】



フロントページの続き

(56)参考文献 国際公開第2008/117497(WO, A1)

特開2008-141835(JP, A)

特開2009-089524(JP, A)

特開2007-049843(JP, A)

特開2009-254081(JP, A)

特開2013-192396(JP, A)

特開2013-085461(JP, A)

特開平06-335279(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H02P 6/185

H02M 7/48

H02P 27/06