

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B1)

(11)特許番号
特許第6991282号
(P6991282)

(45)発行日 令和4年1月12日(2022.1.12)

(24)登録日 令和3年12月9日(2021.12.9)

(51)国際特許分類 F I
H 0 2 P 21/22 (2016.01) H 0 2 P 21/22

請求項の数 13 (全31頁)

(21)出願番号	特願2020-115339(P2020-115339)	(73)特許権者	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(22)出願日	令和2年7月3日(2020.7.3)	(74)代理人	110002941 特許業務法人ぱるも特許事務所
審査請求日	令和2年7月3日(2020.7.3)	(72)発明者	古川 晃 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
		審査官	三島木 英宏

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 回転機の制御装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

界磁巻線を設けたロータと電機子巻線を設けたステータとを有する回転機を制御する回転機の制御装置であって、

前記電機子巻線の電流指令値である電機子電流指令値を算出し、前記電機子電流指令値に基づいて電機子電圧指令値を算出し、前記電機子電圧指令値に基づいて、インバータが有するスイッチング素子をオンオフ制御することにより、前記電機子巻線に電圧を印加する電機子電流制御部と、

前記界磁巻線の電流指令値である界磁電流指令値を算出し、前記界磁電流指令値に基づいて界磁電圧指令値を算出し、前記界磁電圧指令値に基づいて、コンバータが有するスイッチング素子をオンオフ制御することにより、前記界磁巻線に電圧を印加する界磁電流制御部と、を備え、

前記ロータの磁極の方向をd軸とし、前記d軸より電気角で90°進んだ方向をq軸とし、前記電機子電流制御部は、前記界磁電圧指令値が前記界磁巻線に印加できる最大電圧以上になる最大電圧飽和状態になった場合、又は前記界磁電圧指令値が前記界磁巻線に印加できる最小電圧以下になる最小電圧飽和状態になった場合に、前記電機子電流指令値のd軸成分を正の値に増加させる回転機の制御装置。

【請求項2】

前記電機子電流制御部は、電機子電流のd軸成分が0である場合に前記ロータに目標の磁気飽和が生じる目標の界磁電流値を I_{fsat0} とし、設定界磁電流を I_{fs} とし、換算

定数を K_{sr} とし、増加時の電機子電流指令値の d 軸成分を I_{doinc} とし、前記最大電圧飽和状態になった場合は、前記設定界磁電流は、界磁電流の検出値に設定され、前記最小電圧飽和状態になった場合は、前記設定界磁電流は、前記界磁電流指令値に設定され、

前記最大電圧飽和状態になった場合又は前記最小電圧飽和状態になった場合に、

$$I_{doinc} = (I_{fsat0} - I_{fs}) / K_{sr}$$

の式を満たす前記増加時の電機子電流指令値の d 軸成分を、前記電機子電流指令値の d 軸成分に設定する請求項 1 に記載の回転機の制御装置。

【請求項 3】

前記電機子電流制御部は、前記最大電圧飽和状態になった場合又は前記最小電圧飽和状態になった場合に、前記電機子電流指令値の d 軸成分を正の値に増加させた後、前記電機子電流指令値の d 軸成分の増加量を次第に減少させる請求項 1 又は 2 に記載の回転機の制御装置。

10

【請求項 4】

前記電機子電流制御部は、電機子電流の d 軸成分が 0 であるときに前記ロータに磁気飽和が生じる目標の界磁電流値を I_{fsat0} とし、設定界磁電流を I_{fs} とし、換算定数を K_{sr} とし、増加時の電機子電流指令値の d 軸成分を I_{doinc} とし、前記最大電圧飽和状態になった場合は、前記設定界磁電流は、界磁電流の検出値に設定され、

前記最大電圧飽和状態になった後、

$$I_{doinc} = (I_{fsat0} - I_{fs}) / K_{sr}$$

の式を用いて、前記増加時の電機子電流指令値の d 軸成分を算出し、前記増加時の電機子電流指令値の d 軸成分を、前記電機子電流指令値の d 軸成分に設定する請求項 1 に記載の回転機の制御装置。

20

【請求項 5】

前記換算定数は、前記界磁巻線の巻数に応じた前記界磁巻線のインダクタンスに対する、前記電機子巻線の巻数に応じた d 軸インダクタンスの比率に設定されている請求項 2 又は 4 に記載の回転機の制御装置。

【請求項 6】

前記電機子電流制御部は、前記最大電圧飽和状態になった後又は前記最小電圧飽和状態になった後、前記界磁電流指令値と界磁電流の検出値との偏差の絶対値が、解除判定値以下になったときに、前記電機子電流指令値の d 軸成分の増加を終了する請求項 1 に記載の回転機の制御装置。

30

【請求項 7】

前記電機子電流制御部は、電機子電流の d 軸成分が 0 であるときに前記ロータに磁気飽和が生じる目標の界磁電流値を I_{fsat0} とし、界磁電流の検出値を I_{fr} とし、換算定数を K_{sr} とし、増加前の電機子電流指令値の d 軸成分を I_{dob} とし、前記最大電圧飽和状態になった後又は前記最小電圧飽和状態になった後、

$$K_{sr} \times I_{dob} + I_{fr} = I_{fsat0}$$

が成立したときに、前記電機子電流指令値の d 軸成分の増加を終了する請求項 1 に記載の回転機の制御装置。

40

【請求項 8】

前記最小電圧飽和状態は、前記界磁電流指令値が 0 A である状態で、前記界磁電圧指令値が前記最小電圧以下になった状態である請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載の回転機の制御装置。

【請求項 9】

前記界磁電流指令値から界磁電流の検出値までの制御系の応答周波数は、前記電機子電流指令値から電機子電流の検出値までの制御系の応答周波数よりも低い請求項 1 に記載の回転機の制御装置。

【請求項 10】

50

前記電機子電流制御部は、前記最大電圧飽和状態になった後、前記電機子電流指令値の d 軸成分の増加量に応じて、前記電機子電流指令値の q 軸成分を増加させる請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載の回転機の制御装置。

【請求項 11】

前記ロータは、前記界磁巻線に加えて永久磁石を設けた請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の回転機の制御装置。

【請求項 12】

前記コンバータは、直流電源の正極側に接続される正極側のパワー半導体と、前記直流電源の負極側に接続される負極側のパワー半導体とが直列接続された直列回路を 2 組設け、第 1 組の前記直列回路における前記正極側のパワー半導体と前記負極側のパワー半導体との接続点が、前記界磁巻線の一端に接続され、第 2 組の前記直列回路における前記正極側のパワー半導体と前記負極側のパワー半導体との接続点が、前記界磁巻線の他端に接続され、少なくとも第 2 組の前記直列回路の前記正極側のパワー半導体は、ダイオードである請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の回転機の制御装置。

10

【請求項 13】

前記回転機は、車両用の発電電動機である請求項 1 から 12 のいずれか一項に記載の回転機の制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本願は、回転機の制御装置に関するものである。

20

【背景技術】

【0002】

特許文献 1 の技術では、内燃機関の始動時に、界磁電流を流す際に、界磁磁束と同方向の磁束を形成する電機子電流を流すことによって、界磁磁束の形成をアシストするとともに磁気飽和によるインダクタンスの低下を利用して界磁電流の応答を上げている。

【0003】

特許文献 2 の技術では、内燃機関の始動時において、d 軸電流を予め正の方向に流した後、負の方向に変化させることにより、電機子巻線と界磁巻線と間の相互インダクタンスによって、界磁巻線に正の誘導起電力を生じさせ、界磁電流の応答を上げている。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【文献】特開 2002 - 191158 号公報

特開 2018 - 42387 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、特許文献 1 の技術は、内燃機関の始動時に行われる制御であるため、内燃機関の始動時以外には適用できない。

40

【0006】

特許文献 2 の技術では、出力トルクの発生前に、予め、d 軸電流を正の値に変化させておく必要があり、内燃機関の始動時等、出力トルクが発生していない特殊な条件でしか実行できない。

【0007】

そこで、本願は、内燃機関の始動時に限定されることなく、界磁電流の制御応答性が悪化する条件で、界磁電流の制御応答性を向上させることができる回転機の制御装置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】

【0008】

50

本願に係る回転機の制御装置は、界磁巻線を設けたロータと電機子巻線を設けたステータとを有する回転機を制御する回転機の制御装置であって、
 前記電機子巻線の電流指令値である電機子電流指令値を算出し、前記電機子電流指令値に基づいて電機子電圧指令値を算出し、前記電機子電圧指令値に基づいて、インバータが有するスイッチング素子をオンオフ制御することにより、前記電機子巻線に電圧を印加する電機子電流制御部と、
 前記界磁巻線の電流指令値である界磁電流指令値を算出し、前記界磁電流指令値に基づいて界磁電圧指令値を算出し、前記界磁電圧指令値に基づいて、コンバータが有するスイッチング素子をオンオフ制御することにより、前記界磁巻線に電圧を印加する界磁電流制御部と、を備え、
 前記ロータの磁極の方向をd軸とし、前記d軸より電気角で90°進んだ方向をq軸とし、前記電機子電流制御部は、前記界磁電圧指令値が前記界磁巻線に印加できる最大電圧以上になる最大電圧飽和状態になった場合、又は前記界磁電圧指令値が前記界磁巻線に印加できる最小電圧以下になる最小電圧飽和状態になった場合に、前記電機電流指令値のd軸成分を正の値に増加させるものである。

10

【発明の効果】

【0009】

最大電圧飽和状態又は最小電圧飽和状態になると、界磁電圧指令値が制限され、界磁電流の制御系の応答性が悪化し、界磁電流の応答性が悪化する。本願に係る回転機の制御装置によれば、最大電圧飽和状態になった場合、又は最小電圧飽和状態になった場合に、d軸電流を増加させることにより、ロータ磁束を強め、磁気飽和の状態に近づけることができ、界磁巻線の応答性を向上させることができる。よって、最大電圧飽和状態又は最小電圧飽和状態になり、界磁電流の制御系の応答性が悪化する場合でも、制御対象である界磁巻線の応答性を向上させ、界磁電流の制御系の応答性が悪化することを抑制し、界磁電流を応答性良く界磁電流指令値に追従させることができる。従って、内燃機関の始動時に限定されることなく、界磁電流の制御応答性が悪化する最大電圧飽和状態又は最小電圧飽和状態になった場合に、界磁電流の制御応答性を向上させることができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】実施の形態1に係る回転機及び回転機の制御装置の概略構成図である。

30

【図2】実施の形態1に係る制御装置の概略ブロック図である。

【図3】実施の形態1に係る制御装置のハードウェア構成図である。

【図4】実施の形態1に係るインバータのスイッチング素子のオンオフ制御挙動を説明するタイムチャートである。

【図5】実施の形態1に係るコンバータのスイッチング素子のオンオフ制御挙動を説明するタイムチャートである。

【図6】実施の形態1の比較例に係る制御挙動を説明するタイムチャートである。

【図7】実施の形態1の比較例に係る制御挙動を説明するタイムチャートである。

【図8】実施の形態1に係る界磁電流とロータ磁束、及び電流微分インダクタンスとの関係特性図である。

40

【図9】実施の形態1に係るロータ磁束の磁気飽和特性を示す図である。

【図10】実施の形態1に係る制御挙動を説明するタイムチャートである。

【図11】実施の形態1に係る車両用の発電電動機とされた回転機の模式図である。

【図12】実施の形態2に係る制御挙動を説明するタイムチャートである。

【図13】実施の形態2に係る制御挙動を説明するタイムチャートである。

【図14】実施の形態3に係る回転機及び回転機の制御装置の概略構成図である。

【図15】実施の形態4の比較例に係る制御挙動を説明するタイムチャートである。

【図16】実施の形態4に係る制御挙動を説明するタイムチャートである。

【図17】実施の形態4に係る制御挙動を説明するタイムチャートである。

【発明を実施するための形態】

50

【 0 0 1 1 】

1 . 実施の形態 1

実施の形態 1 に係る回転機の制御装置 1 1 (以下、単に、制御装置 1 1 と称す) について図面を参照して説明する。図 1 は、本実施の形態に係る回転機 1 及び制御装置 1 1 の概略構成図である。

【 0 0 1 2 】

1 - 1 . 回転機 1

回転機 1 は、ステータ 1 8 と、ステータ 1 8 の径方向内側に配置されたロータ 1 4 と、を備えている。回転機 1 は、界磁巻線型の同期回転機とされている。ステータ 1 8 の鉄心に、電機子巻線 1 2 が巻装されている。ロータ 1 4 の鉄心に界磁巻線 4 が巻装され、電磁石が設けられている。

10

【 0 0 1 3 】

本実施の形態では、電機子巻線 1 2 は、U 相、V 相、及び W 相の 3 相の電機子巻線 C u、C v、C w とされている。3 相の電機子巻線 C u、C v、C w は、スター結線とされてもよいし、デルタ結線とされてもよい。

【 0 0 1 4 】

ロータ 1 4 には、ロータ 1 4 の回転角度 (回転角度) を検出する回転センサ 1 5 が設けられている。回転センサ 1 5 の出力信号は、制御装置 1 1 に入力される。回転センサ 1 5 には、ホール素子、レゾルバ、又はエンコーダ等の各種のセンサが用いられる。回転センサ 1 5 が設けられず、後述する電流指令値に高調波成分を重畳することによって得られる電流情報等に基づいて、回転角度 (磁極位置) を推定するように構成されてもよい (いわゆる、センサレス方式) 。

20

【 0 0 1 5 】

1 - 2 . 直流電源 2

直流電源 2 は、インバータ 5 及びコンバータ 9 に直流電圧 V d c を出力する。直流電源 2 として、バッテリー、D C - D C コンバータ、ダイオード整流器、P W M 整流器等、直流電圧を出力する任意の機器が用いられる。直流電源 2 には、平滑コンデンサ 3 が並列接続されている。

【 0 0 1 6 】

1 - 3 . インバータ 5

インバータ 5 は、複数のスイッチング素子を有し、直流電源 2 と電機子巻線 1 2 との間で電力変換を行う。インバータ 5 は、直流電源 2 の正極側に接続される正極側のスイッチング素子 S P と、直流電源 2 の負極側に接続される負極側のスイッチング素子 S N と、が直列接続された直列回路を、3 相各相の電機子巻線に対応して 3 組設けている。各直列回路における 2 つのスイッチング素子の接続点が、対応する相の電機子巻線に接続される。

30

【 0 0 1 7 】

具体的には、U 相の直列回路では、U 相の正極側のスイッチング素子 S P u と U 相の負極側のスイッチング素子 S N u とが直列接続され、2 つのスイッチング素子の接続点が U 相の電機子巻線 C u に接続されている。V 相の直列回路では、V 相の正極側のスイッチング素子 S P v と V 相の負極側のスイッチング素子 S N v とが直列接続され、2 つのスイッチング素子の接続点が V 相の電機子巻線 C v に接続されている。W 相の直列回路では、W の正極側のスイッチング素子 S P w と W 相の負極側のスイッチング素子 S N w とが直列接続され、2 つのスイッチング素子の接続点が W 相の電機子巻線 C w に接続されている。

40

【 0 0 1 8 】

インバータ 5 のスイッチング素子には、ダイオードが逆並列接続された I G B T (Insulated Gate Bipolar Transistor)、ダイオードが逆並列接続されたバイポーラトランジスタ、M O S F E T (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 等が用いられる。各スイッチング素子のゲート端子は、ゲート駆動回路等を介して、制御装置 1 1 に接続されている。よって、各スイッチング素子は、制御装置 1 1 から出力されるスイッチング信号によりオン又はオフされる。

50

【 0 0 1 9 】

電機子電流センサ 8 は、各相の電機子巻線 C u、C v、C w に流れる電流を検出する電流検出回路である。本実施の形態では、電機子電流センサ 8 は、各相のスイッチング素子の直列回路と電機子巻線とをつなぐ電線上に備えられている。各相の電機子電流センサ 8 の出力信号は、制御装置 1 1 に入力される。電機子電流センサ 8 は、ホール素子、シャント抵抗等の電流センサとされている。なお、電機子電流センサ 8 は、各相のスイッチング素子の直列回路に直列接続されてもよい。

【 0 0 2 0 】

1 - 4 . コンバータ 9

コンバータ 9 は、スイッチング素子を有し、直流電源 2 と界磁巻線 4 との間で電力変換を行う。本実施の形態では、コンバータ 9 は、直流電源 2 の正極側に接続される正極側のパワー半導体 S P と直流電源 2 の負極側に接続される負極側のパワー半導体 S N とが直列接続された直列回路を 2 組設けた Hブリッジ回路とされている。第 1 組の直列回路 2 8 における正極側のパワー半導体 S P 1 と負極側のパワー半導体 S N 1 との接続点が、界磁巻線 4 の一端に接続され、第 2 組の直列回路 2 9 における正極側のパワー半導体 S P 2 と負極側のパワー半導体 S N 2 との接続点が、界磁巻線 4 の他端に接続される。

10

【 0 0 2 1 】

本実施の形態では、第 1 組及び第 2 組の正極側のパワー半導体 S P 及び負極側のパワー半導体 S N は、スイッチング素子とされている。コンバータ 9 のスイッチング素子には、ダイオードが逆並列接続された I G B T、ダイオードが逆並列接続されたバイポーラトランジスタ、M O S F E T 等が用いられる。各スイッチング素子のゲート端子は、ゲート駆動回路等を介して、制御装置 1 1 に接続されている。よって、各スイッチング素子は、制御装置 1 1 から出力されるスイッチング信号によりオン又はオフされる。

20

【 0 0 2 2 】

なお、第 1 組の直列回路 2 8 の負極側のスイッチング素子 S N 1 をダイオードに置き換えたり、第 2 組の直列回路 2 9 の負極側のスイッチング素子 S N 2 をダイオードに置き換えたりする等、コンバータ 9 を他の構成としてもよい。

【 0 0 2 3 】

界磁電流センサ 6 は、界磁巻線 4 を流れる電流である界磁電流 I f を検出する電流検出回路である。本実施の形態では、界磁電流センサ 6 は、第 1 組の直列回路 2 8 の接続点と界磁巻線 4 の一端とを接続する電線上に設けられている。界磁電流センサ 6 は、界磁電流 I f を検出可能な他の個所に設けられてもよい。界磁電流センサ 6 の出力信号は、制御装置 1 1 に入力される。界磁電流センサ 6 は、ホール素子、シャント抵抗等の電流センサとされている。

30

【 0 0 2 4 】

1 - 5 . 制御装置 1 1

制御装置 1 1 は、インバータ 5 及びコンバータ 9 を介して、回転機 1 を制御する。制御装置 1 1 は、図 2 に示すように、回転検出部 3 1、電機子電流検出部 3 2、電機子電流制御部 3 3、界磁電流検出部 3 4、及び界磁電流制御部 3 5 等の機能部を備えている。制御装置 1 1 の各機能は、制御装置 1 1 が備えた処理回路により実現される。具体的には、制御装置 1 1 は、図 3 に示すように、処理回路として、C P U (Central Processing Unit) 等の演算処理装置 9 0 (コンピュータ)、演算処理装置 9 0 とデータのやり取りする記憶装置 9 1、演算処理装置 9 0 に外部の信号を入力する入力回路 9 2、演算処理装置 9 0 から外部に信号を出力する出力回路 9 3、及び外部装置とデータ通信を行う通信回路 9 4 等を備えている。

40

【 0 0 2 5 】

演算処理装置 9 0 として、A S I C (Application Specific Integrated Circuit)、I C (Integrated Circuit)、D S P (Digital Signal Processor)、F P G A (Field Programmable Gate Array)、各種の論理回路、及び各種の信号処理回路等が備えられてもよい。また、演算処理装置 9 0 として、同じ種類のもの又は異なる種類のものが複数

50

備えられ、各処理が分担して実行されてもよい。記憶装置 9 1 として、演算処理装置 9 0 からデータを読み出し及び書き込みが可能に構成された R A M (Random Access Memory)、及び演算処理装置 9 0 からデータを読み出し可能に構成された R O M (Read Only Memory) 等が備えられている。入力回路 9 2 は、回転センサ 1 5、電機子電流センサ 8、界磁電流センサ 6 等の各種のセンサ及びスイッチが接続され、これらセンサ及びスイッチの出力信号を演算処理装置 9 0 に入力する A / D 変換器等を備えている。出力回路 9 3 は、インバータ 5 及びコンバータ 9 のスイッチング素子をオンオフ駆動するゲート駆動回路等の電気負荷が接続され、これら電気負荷に演算処理装置 9 0 から制御信号を出力する駆動回路等を備えている。通信回路 9 4 は、外部装置と通信を行う。

【 0 0 2 6 】

そして、制御装置 1 1 が備える各制御部 3 1 ~ 3 5 等の各機能は、演算処理装置 9 0 が、R O M 等の記憶装置 9 1 に記憶されたソフトウェア (プログラム) を実行し、記憶装置 9 1、入力回路 9 2、及び出力回路 9 3 等の制御装置 1 1 の他のハードウェアと協働することにより実現される。なお、各制御部 3 1 ~ 3 5 等が用いるテーブルデータ等の設定データは、ソフトウェア (プログラム) の一部として、R O M 等の記憶装置 9 1 に記憶されている。以下、制御装置 1 1 の各機能について詳細に説明する。

【 0 0 2 7 】

1 - 5 - 1 . 電機子電流の基本制御

回転検出部 3 1 は、電気角でのロータの磁極位置 (ロータの回転角度) 及び回転角速度 を検出する。本実施の形態では、回転検出部 3 1 は、回転センサ 1 5 の出力信号に基づいて、ロータの磁極位置 (回転角度) 及び回転角速度 を検出する。磁極位置は、ロータに設けられた電磁石の N 極の向きに設定される。なお、回転検出部 3 1 は、電流指令値に高調波成分を重畳することによって得られる電流情報等に基づいて、回転センサを用いずに、回転角度 (磁極位置) を推定するように構成されてもよい (いわゆる、センサレス方式) 。

【 0 0 2 8 】

電機子電流検出部 3 2 は、電機子電流センサ 8 の出力信号に基づいて、3 相の巻線に流れる電機子電流 I_{ur} 、 I_{vr} 、 I_{wr} を検出する。ここで、 I_{ur} が、U 相の電機子電流 I_u の検出値であり、 I_{vr} が、V 相の電機子電流 I_v の検出値であり、 I_{wr} が、W 相の電機子電流 I_w の検出値である。なお、電機子電流センサ 8 が 2 相の電機子電流を検出するように構成され、残りの 1 相の電機子電流が、2 相の電機子電流の検出値に基づいて算出されてもよい。例えば、電機子電流センサ 8 が、V 相及び W 相の電機子電流 I_{vr} 、 I_{wr} を検出し、U 相の電機子電流 I_{ur} が、 $I_{ur} = -I_{vr} - I_{wr}$ により算出されてもよい。

【 0 0 2 9 】

電機子電流制御部 3 3 は、電機子巻線の電流指令値である電機子電流指令値を算出し、電機子電流指令値に基づいて電機子電圧指令値を算出し、電機子電圧指令値に基づいて、インバータ 5 が有するスイッチング素子をオンオフ制御することにより、電機子巻線に電圧を印加する。

【 0 0 3 0 】

本実施の形態では、図 2 に示すように、電機子電流制御部 3 3 は、電流指令値算出部 3 3 1、電圧指令値算出部 3 3 2、及びスイッチング制御部 3 3 3 を備えている。

【 0 0 3 1 】

電流指令値算出部 3 3 1 は、電機子電流指令値を算出する。本実施の形態では、電流指令値算出部 3 3 1 は、d 軸の電流指令値 I_{do} 及び q 軸の電流指令値 I_{qo} を算出する。d 軸は、ロータの磁極 (N 極、磁極位置) の方向に定められ、q 軸は、d 軸より電気角で 90° 進んだ方向に定められている。d q 軸の回転座標系は、ロータの磁極位置 の回転に同期して回転する。

【 0 0 3 2 】

電流指令値算出部 3 3 1 は、最大トルク電流制御、弱め界磁制御、 $I_d = 0$ 制御などの公

10

20

30

40

50

知のベクトル制御方法に従って、d軸及びq軸の基本電流指令値 I_{d0b} 、 I_{q0b} を演算する。本実施の形態では、最大トルク電流制御により、d軸及びq軸の基本電流指令値 I_{d0b} 、 I_{q0b} が算出される場合を説明する。

【0033】

最大トルク電流制御では、トルク指令値 T_0 のトルクを出力させる電流が最小になるd軸及びq軸の基本電流指令値 I_{d0b} 、 I_{q0b} が算出される。

【0034】

弱め界磁制御では、最大トルク電流制御により算出されるd軸及びq軸の基本電流指令値 I_{d0b} 、 I_{q0b} よりも、d軸の基本電流指令値 I_{d0b} が負の方向に増加される。弱め磁束制御では、dq軸の回転座標系上で、電圧制限楕円（定誘起電圧楕円）と、トルク指令値 T_0 の定トルク曲線との交点に、dq軸の基本電流指令値 I_{d0b} 、 I_{q0b} が算出される。

10

【0035】

$I_d = 0$ 制御では、d軸の基本電流指令値 I_{d0b} が0に設定され、トルク指令値 T_0 に応じてq軸の基本電流指令値 I_{q0b} が増減される。

【0036】

トルク指令値 T_0 は、制御装置11の内部で演算されてもよいし、制御装置11の外部から伝達されてもよい。

【0037】

本実施の形態では、次式に示すように、電流指令値算出部331は、後述するd軸電流の増加条件が成立していない場合は、ベクトル制御方法に従って設定されたd軸の基本電流指令値 I_{d0b} を、最終的なd軸の電流指令値 I_{d0} に設定する。電流指令値算出部331は、d軸電流の増加条件が成立している場合は、後述する増加時のd軸の電流指令値 I_{d0inc} を、最終的なd軸の電流指令値 I_{d0} に設定する。

20

1) d軸電流の増加条件が成立していない場合、

$$I_{d0} = I_{d0b} \quad \dots (1)$$

2) d軸電流の増加条件が成立している場合、

$$I_{d0} = I_{d0inc}$$

【0038】

電流指令値算出部331は、次式に示すように、d軸電流の増加条件の成立の有無にかかわらず、ベクトル制御方法に従って設定されたq軸の基本電流指令値 I_{q0b} を、最終的なq軸の電流指令値 I_{q0} に設定する。

30

$$I_{q0} = I_{q0b} \quad \dots (2)$$

【0039】

電圧指令値算出部332は、電機子電流指令値に基づいて電機子電圧指令値を算出する。本実施の形態では、電圧指令値算出部332は、d軸及びq軸の電流指令値 I_{d0} 、 I_{q0} に基づいて、d軸及びq軸の電圧指令値 V_{d0} 、 V_{q0} を算出する。

【0040】

電圧指令値算出部332は、3相の電機子電流の検出値 I_{ur} 、 I_{vr} 、 I_{wr} を、磁極位置に基づいて3相2相変換及び回転座標変換を行って、d軸の電流検出値 I_{dr} 及びq軸の電流検出値 I_{qr} に変換する。そして、電圧指令値算出部332は、d軸の電流検出値 I_{dr} がd軸の電流指令値 I_{d0} に近づくように、d軸の電流指令値 I_{d0} とd軸の電流検出値 I_{dr} との偏差 I_d に対して比例積分制御を行って、d軸の電圧指令値 V_{d0} を算出し、q軸の電流検出値 I_{qr} がq軸の電流指令値 I_{q0} に近づくように、q軸の電流指令値 I_{q0} とq軸の電流検出値 I_{qr} との偏差 I_q に対して比例積分制御を行って、q軸の電圧指令値 V_{q0} を算出する。また、d軸電流とq軸電流の非干渉化のための公知のフィードフォワード制御が行われてもよい。

40

【0041】

或いは、電圧指令値算出部332は、電流検出値を用いず、d軸及びq軸の電流指令値 I_{d0} 、 I_{q0} に基づいて、回転機の諸元を用い、d軸及びq軸の電圧指令値 V_{d0} 、 V_{q0}

50

oを算出するフィードフォワード制御を実行してもよい。例えば、電圧指令値算出部332は、次式に示すように、d軸及びq軸の電流指令値 I_{d0} 、 I_{q0} に基づいて、回転機の諸元（巻線の抵抗値 R 、d軸インダクタンス L_d 、q軸インダクタンス L_q 、ロータ磁束 f ）、及び回転角速度に基づいて、d軸の電圧指令値 V_{d0} 及びq軸の電圧指令値 V_{q0} を算出してもよい。この場合は、電機子電流センサ8及び電機子電流検出部32が備えられなくてもよい。

$$V_{d0} = R \times I_{d0} - \omega \times L_q \times I_{q0}$$

$$V_{q0} = R \times I_{q0} + \omega \times (L_d \times I_{d0} + f) \quad \dots (3)$$

【0042】

そして、電圧指令値算出部332は、d軸及びq軸の電圧指令値 V_{d0} 、 V_{q0} を、磁極位置に基づいて、固定座標変換及び2相3相変換を行って、3相の電圧指令値 V_{u0} 、 V_{v0} 、 V_{w0} に変換する。なお、電圧指令値算出部332は、3相の電圧指令値に対して、2相変調、空間ベクトル変調等の線間電圧が変化しないような変調を加えてもよい。

【0043】

スイッチング制御部333は、電機子電圧指令値に基づいて、PWM制御（Pulse Width Modulation）により、インバータ5が有するスイッチング素子をオンオフ制御することにより、電機子巻線に電圧を印加する。本実施の形態では、図4に示すように、スイッチング制御部333は、3相の電圧指令値 V_{u0} 、 V_{v0} 、 V_{w0} のそれぞれと電機子搬送波の周期 T_{ss} で振動する電機子搬送波 C_s とを比較することにより、複数のスイッチング素子をオンオフ制御する。電機子搬送波 C_s は、電機子搬送波の周期 T_{ss} で0を中心に直流電圧の半分値 $V_{dc}/2$ の振幅で振動する三角波とされている。直流電圧 V_{dc} は、電圧センサにより検出されてもよい。

【0044】

スイッチング制御部333は、各相について、電機子搬送波 C_s が電圧指令値を下回った場合は、正極側のスイッチング素子のスイッチング信号 Q_P をオン（本例では、1）して、正極側のスイッチング素子をオンし、電機子搬送波 C_s が電圧指令値を上回った場合は、正極側のスイッチング素子のスイッチング信号 Q_P をオフ（本例では、0）して、正極側のスイッチング素子をオフする。一方、スイッチング制御部333は、各相について、電機子搬送波 C_s が電圧指令値を下回った場合は、負極側のスイッチング素子のスイッチング信号 Q_N をオフ（本例では、0）して、負極側のスイッチング素子をオフして、負極側のスイッチング素子をオフし、電機子搬送波 C_s が電圧指令値を上回った場合は、負極側のスイッチング素子のスイッチング信号 Q_N をオン（本例では、1）して、負極側のスイッチング素子をオンする。なお、各相について、正極側のスイッチング素子のオン期間と負極側のスイッチング素子のオン期間との間には、正極側及び負極側のスイッチング素子の双方をオフにする短絡防止期間（デッドタイム）が設けられてもよい。

【0045】

1-5-2. 界磁電流の基本制御

界磁電流検出部34は、界磁電流センサ6の出力信号に基づいて、界磁巻線4に流れる電流である界磁電流 I_{fr} を検出する。ここで、 I_{fr} は、界磁電流 I_f の検出値である。

【0046】

界磁電流制御部35は、界磁巻線の電流指令値である界磁電流指令値 I_{fo} を算出し、界磁電流指令値 I_{fo} に基づいて界磁電圧指令値 V_{fo} を算出し、界磁電圧指令値 V_{fo} に基づいて、コンバータ9が有するスイッチング素子をオンオフ制御することにより、界磁巻線4に電圧を印加する。

【0047】

本実施の形態では、図2に示すように、界磁電流制御部35は、電流指令値算出部351、電圧指令値算出部352、及びスイッチング制御部353を備えている。

【0048】

電流指令値算出部351は、界磁電流指令値 I_{fo} を算出する。例えば、電流指令値算出部351は、トルク指令値 T_o 等に基づいて、界磁電流指令値 I_{fo} を設定する。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 9 】

電圧指令値算出部 3 5 2 は、界磁電流指令値 I_{fo} に基づいて界磁電圧指令値 V_{fo} を算出する。電圧指令値算出部 3 5 2 は、次式に示すように、界磁電流指令値 I_{fo} と界磁電流検出値 I_{fr} との偏差 ΔI_f (以下、界磁電流偏差 ΔI_f と称す) に対して比例積分制御を行って、界磁電圧指令値 V_{fo} を算出する。

【 数 1 】

数 1

$$\Delta I_f = I_{fo} - I_{fr}$$

$$V_{fo} = K_{pf} \Delta I_f + K_{if} \Delta I_f \frac{1}{s} \quad \dots (4)$$

10

【 0 0 5 0 】

ここで、 K_{pf} は、比例ゲインであり、 K_{if} は、積分ゲインであり、 s は、ラプラス演算子であり、 $1/s$ は、積分を表す。比例ゲイン K_{pf} 及び積分ゲイン K_{if} は、界磁電流検出値 I_{fr} 及び d 軸電流 (指令値又は検出値) 等に応じて変化されてもよい。なお、式 (4) は、連続系で表しているが、実際には、式 (4) を演算周期で離散化した演算式を用いて、演算周期毎に演算処理が実行される。本実施の形態では、演算周期は、後述する界磁搬送波の周期 T_{sf} と同じに設定されている。

【 0 0 5 1 】

或いは、電圧指令値算出部 3 5 2 は、電流検出値を用いず、界磁電流指令値 I_{fo} に基づいて、回転機の諸元を用い、界磁電圧指令値 V_{fo} を算出するフィードフォワード制御を実行してもよい。例えば、電圧指令値算出部 3 5 2 は、次式に示すように、界磁電流指令値 I_{fo} に基づいて、回転機の諸元 (界磁巻線 4 の抵抗値 R_f) に基づいて、界磁電圧指令値 V_{fo} を算出してもよい。この際、次式に示すように、一次進み処理が加えられてもよい。ここで、 T_{fo} は、一次進み処理の定数であり、 s は、ラプラス演算子である。一次進み処理の定数 T_{fo} は、界磁電流検出値 I_{fr} 及び d 軸電流 (指令値又は検出値) 等に応じて変化されてもよい。この場合は、界磁電流センサ 6 及び界磁電流検出部 3 4 が備えられなくてもよい。

20

$$V_{fo} = (T_{fo} \times s + 1) \times R_f \times I_{fo} \quad \dots (5)$$

【 0 0 5 2 】

電圧指令値算出部 3 5 2 は、次式に示すように、界磁電圧指令値 V_{fo} を上限電圧値 V_{fmax} により上限制限すると共に、界磁電圧指令値 V_{fo} を下限電圧値 V_{fmin} により下限制限する。ここで、 $\text{MIN}(A, B)$ は、 A 、 B のいずれか小さい方を出力する関数である。 $\text{MAX}(A, B)$ は、 A 、 B のいずれか大きい方を出力する関数である。

30

$$V_{fo} = \text{MAX}(V_{fmin}, \text{MIN}(V_{fmax}, V_{fo})) \quad \dots (6)$$

【 0 0 5 3 】

上限電圧値 V_{fmax} は、界磁巻線 4 に印加できる最大電圧に設定される。下限電圧値 V_{fmin} は、界磁巻線 4 に印加できる最小電圧に設定される。本実施の形態では、上限電圧値 V_{fmax} は、直流電圧 V_{dc} に設定される。下限電圧値 V_{fmin} は、 $-1 \times$ 直流電圧 V_{dc} に設定される。スイッチング直後のリングングの影響、後述する短絡防止期間の設定等を考慮して、上限電圧値 V_{fmax} は、直流電圧 V_{dc} よりも小さい値に設定されてもよく、下限電圧値 V_{fmin} は、 $-1 \times$ 直流電圧 V_{dc} よりも大きい値に設定されてもよい。

40

【 0 0 5 4 】

なお、電圧指令値算出部 3 5 2 は、界磁電圧指令値 V_{fo} を上限電圧値 V_{fmax} 及び下限電圧値 V_{fmin} により上限制限及び下限制限しなくてもよい。このように、上限制限及び下限制限を行わなくても、後述するように、界磁電圧指令値 V_{fo} は、最大電圧 (V_{dc}) と最小電圧 ($-V_{dc}$) との間を振動する界磁搬送波信号 C_f と比較されるので、コンバータ 9 のスイッチング素子のオンオフ制御結果は、上限制限及び下限制限の有無にかかわらず同様になる。

50

【 0 0 5 5 】

スイッチング制御部 3 5 3 は、界磁電圧指令値 V_{fo} に基づいて、PWM 制御 (Pulse Width Modulation) により、コンバータ 9 のスイッチング素子をオンオフ制御する。

【 0 0 5 6 】

例えば、図 5 に示すように、スイッチング制御部 3 5 3 は、界磁電圧指令値 V_{fo} と、界磁搬送波の周期 T_{sf} で振動する界磁搬送波信号 C_f とを比較することにより、複数のスイッチング素子をオンオフ制御する。界磁搬送波信号 C_f は、界磁搬送波の周期 T_{sf} で $-1 \times$ 直流電圧 V_{dc} から直流電圧 V_{dc} の間を振動する三角波とされている。直流電圧 V_{dc} は、電圧センサにより検出されてもよい。

【 0 0 5 7 】

スイッチング制御部 3 5 3 は、界磁搬送波信号 C_f が界磁電圧指令値 V_{fo} を下回った場合は、第 1 組の正極側のスイッチング素子 $SP1$ のスイッチング信号 $QP1$ をオン (本例では、1) し、第 1 組の負極側のスイッチング素子 $SN1$ のスイッチング信号 $QN1$ をオフ (本例では、0) し、第 2 組の正極側のスイッチング素子 $SP2$ のスイッチング信号 $QP2$ をオフ (0) し、第 2 組の負極側のスイッチング素子 $SN2$ のスイッチング信号 $QN2$ をオン (1) する。

【 0 0 5 8 】

一方、スイッチング制御部 3 5 3 は、界磁搬送波信号 C_f が界磁電圧指令値 V_{fo} を上回った場合は、第 1 組の正極側のスイッチング信号 $QP1$ をオフ (0) し、第 1 組の負極側のスイッチング信号 $QN1$ をオン (1) し、第 2 組の正極側のスイッチング信号 $QP2$ をオン (1) し、第 2 組の負極側のスイッチング信号 $QN2$ をオフ (0) する。なお、各組については、正極側のスイッチング素子のオン期間と負極側のスイッチング素子のオン期間との間には、正極側及び負極側のスイッチング素子の双方をオフにする短絡防止期間 (デッドタイム) が設けられてもよい。

【 0 0 5 9 】

1 - 5 - 3 . 界磁電圧飽和時の d 軸電流の増加制御

< 比較例における界磁電圧飽和による影響 >

図 6 及び図 7 に、トルク指令値 T_o がステップ的に増加した場合の比較例に係る制御挙動を示す。比較例では、後述する界磁電圧飽和時の d 軸の電流指令値の増加処理が行われな
ない。図 6 では、界磁電圧指令値 V_{fo} の増加量が小さく、界磁電圧指令値 V_{fo} が最大電
圧 (上限電圧値 V_{fmax}) に到達しておらず、最大電圧飽和状態になっていない。一方、
図 7 では、界磁電圧指令値 V_{fo} の増加量が大きく、界磁電圧指令値 V_{fo} が最大電
圧 (上限電圧値 V_{fmax}) に到達しており、最大電圧飽和状態になっている。

【 0 0 6 0 】

まず、図 6 について説明する。各グラフの縦軸は、物理量を無次元化して表している。界磁電圧は、印加可能な最大電圧を 1 で表している。

【 0 0 6 1 】

時刻 t_{01} で、トルク指令値 T_o が 0 からステップ的に増加している。そして、トルク指令値 T_o に応じて算出される界磁電流指令値 I_{fo} が、0 からステップ的に増加している。また、トルク指令値 T_o に応じて、最大トルク電流制御により算出される q 軸の電流指令値 I_{qo} が、0 からステップ的に増加し、d 軸の電流指令値 I_{do} が、0 からステップ的に減少している。

【 0 0 6 2 】

それにより、界磁電流指令値 I_{fo} と界磁電流検出値 I_{fr} との界磁電流偏差 I_f が増加し、PI 制御 (特に、比例項) により演算される界磁電圧指令値 V_{fo} が増加している。しかし、界磁電流偏差 I_f が比較的小さいため、界磁電圧指令値 V_{fo} の増加量が小さく、界磁電圧指令値 V_{fo} は、上限電圧値 V_{fmax} により上限制限されていない。すなわち、界磁電流のフィードバック制御系の操作量である界磁電圧指令値 V_{fo} は、上限制限されていない。そのため、界磁電流のフィードバック制御系の応答性は、損なわれ
ておらず、界磁電流検出値 I_{fr} は、界磁電流指令値 I_{fo} にフィードバック制御系の応

10

20

30

40

50

答性（時定数）で追従している。

【0063】

出力トルク T_r は、ロータ磁束 と q 軸電流 I_q との乗算値に比例する。ロータ磁束 は、界磁電流 I_f に応じて変化する。界磁電流のフィードバック制御系の応答性は、 d 軸及び q 軸の電流のフィードバック制御系の応答性よりも遅いため、界磁電流検出値 I_{fr} は、 d 軸及び q 軸の電流検出値 I_{dr} 、 I_{qr} よりも遅れて変化する。よって、主に、界磁電流 I_f の応答遅れによって、出力トルク T_r の応答遅れが生じている。

【0064】

時刻 t_{01} の直後において、界磁電流検出値 I_{fr} の増加によるロータ磁束の増加量よりも、 d 軸の電流検出値 I_{dr} の減少によるロータ磁束の減少量が上回ったため、ロータ磁束が一時的に低下し、出力トルク T_r が一時的に低下している。

10

【0065】

次に、図7について説明する。図6と同様に、各グラフの縦軸は、物理量を無次元化して表している。界磁電圧は、印加可能な最大電圧を1で表している。

【0066】

時刻 t_{11} で、図6と同様に、トルク指令値 T_o が0からステップ的に増加し、界磁電流指令値 I_{fo} が、0からステップ的に増加し、 q 軸の電流指令値 I_{qo} が、0からステップ的に増加し、 d 軸の電流指令値 I_{do} が、0からステップ的に減少している。しかし、図6に比べて、トルク指令値 T_o の増加量が大きくなっているため、界磁電流指令値 I_{fo} の増加量、 q 軸の電流指令値 I_{qo} の増加量、 d 軸の電流指令値 I_{do} の減少量が大きくなっている。

20

【0067】

そのため、図6に比べて、界磁電流偏差 I_f が大きくなっており、PI制御（特に、比例項）により演算される界磁電圧指令値 V_{fo} が大きくなっている。PI制御により算出される界磁電圧指令値 V_{fo} の増加量が大きく、界磁電圧指令値 V_{fo} は、上限電圧値 V_{fmax} により上限制限され、最大電圧飽和状態になっている（時刻 t_{11} から時刻 t_{12} まで）。すなわち、界磁電流のフィードバック制御系の操作量である界磁電圧指令値 V_{fo} は、上限制限されている。そのため、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が、損なわれており、界磁電流検出値 I_{fr} は、界磁電流指令値 I_{fo} にフィードバック制御系の本来の応答性（時定数）よりも遅い応答性で追従している。

30

【0068】

よって、界磁電流検出値 I_{fr} の応答遅れが大きくなっており、界磁電流検出値 I_{fr} に応じて変化するロータ磁束 及び出力トルク T_r の応答遅れが大きくなっている。このように、比較例では、界磁電圧指令値 V_{fo} が最大電圧（上限電圧値 V_{fmax} ）に到達する最大電圧飽和状態になると、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化し、界磁電流の応答性及びトルクの応答性が悪化する。

【0069】

<電流微分インダクタンス dL_{If} の低減による界磁巻線の応答性の向上>
界磁巻線の電圧方程式は、次式で表せられる。ここで、 は、ロータの鉄心の磁束であり、 R_f は、界磁巻線の抵抗であり、 V_f は、界磁巻線の印加電圧である。

40

【数2】

数2

$$V_f = R_f I_f + \frac{d\phi}{dt} \quad \dots (7)$$

【0070】

式(7)を変形すると次式を得る。ここで、電流微分インダクタンス dL_{If} は、ロータ磁束 を界磁電流 I_f について微分したものである。電流微分インダクタンス dL_{If} は、界磁電流 I_f の各動作点における、界磁電流 I_f の変化に対するロータ磁束 の変化の比とも表現できる。

50

【数 3】

数 3

$$V_f = R_f I_f + \frac{d\phi}{dt} \frac{dI_f}{dt}$$

$$dL_{If} = \frac{d\phi}{dI_f} \quad \dots (8)$$

【0071】

式(8)をラプラス変換して変形すると、界磁巻線の伝達関数 $G_{pf}(s)$ は、次式のようになる。

【数 4】

数 4

$$G_{pf}(s) = \frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{R_f} \frac{1}{\frac{dL_{If}}{R_f} s + 1} \quad \dots (9)$$

【0072】

式(9)に示すように、制御対象である界磁巻線の伝達関数 $G_{pf}(s)$ の応答性(時定数)は、電流微分インダクタンス dL_{If} に比例する。よって、電流微分インダクタンス dL_{If} を減少させることで、制御対象である界磁巻線の応答性を向上させることができる。

【0073】

従って、界磁電圧指令値 V_{fo} が最大電圧(上限電圧値 V_{fmax})に上制限されて、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化した場合に、電流微分インダクタンス dL_{If} を減少させて、制御対象である界磁巻線の応答性を向上させることにより、応答性の悪化を抑制することが考えられる。以下で、ロータの鉄心の磁気飽和により、電流微分インダクタンス dL_{If} を低下させることを検討する。

【0074】

<ロータの磁気飽和を考慮した制御系設計>

図8の上段に示すように、 d 軸電流 $I_d = 0$ の条件では、界磁電流 I_f が動作点Aよりも小さい領域では、ロータに磁気飽和が生じておらず、界磁電流 I_f に比例して、ロータ磁束が増加しており、電流微分インダクタンス dL_{If} は一定値になっている。一方、界磁電流 I_f が動作点Aよりも大きくなると、ロータの鉄心に磁気飽和が生じ、界磁電流 I_f の増加に対するロータ磁束の増加の傾きが減少している。ここで、ロータ磁束は、ロータ磁束の d 軸成分である。そのため、図8の下段に示すように、ロータ磁束を界磁電流 I_f について微分した電流微分インダクタンス dL_{If} は、界磁電流 I_f が動作点Aよりも増加するに従って減少している。

【0075】

<理論上のロータ磁束 ϕ_0 と、磁気飽和による実際の磁束 ϕ >

磁気飽和が生じない場合の理論上のロータ磁束 ϕ_0 は、次式に示すように、理論上の界磁巻線のインダクタンス L_{f0} に界磁電流 I_f を乗算した磁束と、理論上の d 軸インダクタンス L_{d0} に d 軸電流 I_d を乗算した磁束と、を合計した磁束になる。ここで、理論上の界磁巻線のインダクタンス L_{f0} は、界磁巻線の巻数(巻数の2乗)に応じたインダクタンスであり、理論上の d 軸インダクタンス L_{d0} は、電機子巻線の巻数(巻数の2乗)に応じたインダクタンスである。

$$\phi_0 = L_{f0} \times I_f + L_{d0} \times I_d \quad \dots (10)$$

【0076】

しかし、次式及び図9に示すように、磁気飽和が生じると、実際のロータ磁束 ϕ は、磁気飽和が生じない場合の理論上の磁束 ϕ_0 から低下する。 $f(\phi_0)$ は、ロータの鉄心の磁気飽和特性を表す関数である。

10

20

30

40

50

$$= f \quad (\quad 0) \quad \cdot \cdot \cdot (1 1)$$

【 0 0 7 7 】

< d 軸電流に応じた、磁束 の平行移動 >

式 (1 0) を変形すると次式を得る。

$$0 = L f 0 \times (I f + K s r \times I d)$$

$$K s r = L d 0 / L f 0 \quad \cdot \cdot \cdot (1 2)$$

ここで、 $K s r$ は、d 軸電流 $I d$ を界磁電流相当値に変換する換算定数である。換算定数 $K s r$ は、界磁巻線の巻数に応じた界磁巻線のインダクタンス $L f 0$ に対する、電機子巻線の巻数に応じた d 軸インダクタンス $L d 0$ の比率になる。

【 0 0 7 8 】

式 (1 2) に示すように、理論上の磁束 θ が同じ値になる界磁電流 $I f$ は、d 軸電流 $I d$ に $- K s r$ を乗算した値に応じて変化する。式 (1 1) 及び図 9 に示したように、同じ値の理論上の磁束 θ に対応する実際の磁束 θ は、同じ値になる。そのため、図 8 に示したように、実際のロータ磁束 θ 及び電流微分インダクタンス $d L I f$ の特性は、d 軸電流 $I d$ に $- K s r$ を乗算した値に応じて、界磁電流 $I f$ の方向 (横方向) に平行移動する。

【 0 0 7 9 】

< 所望の磁気飽和を得るための d 軸電流の増加 >

所望の磁気飽和を得るための d 軸電流 $I d$ の設定を検討する。例えば、図 8 に示すように、目標のロータ磁束 θ_0 を、磁気飽和が生じている状態のロータ磁束に設定し、目標の電流微分インダクタンス $d L I f 0$ を、目標のロータ磁束 θ_0 に対応させて設定する。d 軸電流 $I d = 0$ である場合に目標のロータ磁束 θ_0 が生じる目標の界磁電流値を $I f s a t 0$ とする。式 (1 2) から、界磁電流 $I f$ が、目標飽和の界磁電流値 $I f s a t 0$ であり、d 軸電流 $I d$ が 0 である場合の、理論上の目標のロータ磁束 θ_0 は、次式となる。

$$\theta_0 = L f 0 \times I f s a t 0 \quad \cdot \cdot \cdot (1 3)$$

【 0 0 8 0 】

そして、現在の界磁電流 $I f s$ において、理論上の目標のロータ磁束 θ_0 を得るための d 軸の電流指令値を $I d o i n c$ とすると、式 (1 2) から次式を得る。

$$\theta_0 = L f 0 \times (I f s + K s r \times I d o i n c) \quad \cdot \cdot \cdot (1 4)$$

【 0 0 8 1 】

式 (1 5) を式 (1 3) に代入し、d 軸の電流指令値 $I d o i n c$ について整理すると次式を得る。

$$I d o i n c = (I f s a t 0 - I f s) / K s r \quad \cdot \cdot \cdot (1 5)$$

【 0 0 8 2 】

よって、d 軸の電流指令値 $I d o i n c$ を、次式を満たす正の値に、増加させれば、ロータに目標の磁気飽和を発生させることができ、電流微分インダクタンス $d L I f$ を低下させ、界磁巻線の応答性を向上させることができる。

$$I d o i n c = (I f s a t 0 - I f s) / K s r \quad \cdot \cdot \cdot (1 6)$$

【 0 0 8 3 】

そこで、電機子電流制御部 33 は、界磁電圧指令値 $V f 0$ が界磁巻線に印加できる最大電圧 (上限電圧値 $V f m a x$) 以上になる最大電圧飽和状態になった場合に、d 軸電流の増加条件が成立したと判定し、d 軸の電流指令値 $I d 0$ を正の値に増加させる。

【 0 0 8 4 】

本実施の形態では、電機子電流制御部 33 は、d 軸電流の増加条件が成立した場合に、式 (1 6) を満たす増加時の d 軸の電流指令値 $I d o i n c$ を算出する。例えば、電機子電流制御部 33 は、式 (1 5) を用いて、増加時の d 軸の電流指令値 $I d o i n c$ を算出する。式 (1 5) の $I d = 0$ の目標飽和の界磁電流値 $I f s a t 0$ は、 $I d = 0$ において所望の磁気飽和が得られる界磁電流値に予め設定されている。一方、界磁電流指令値 $I f 0$ は、d 軸電流 $I d$ が d 軸の基本電流指令値 $I d 0 b$ である場合に、ロータに目標の磁気飽和が生じる界磁電流に設定される。基本的に d 軸の基本電流指令値 $I d 0 b$ は負の値に設定されているので、d 軸電流の増加条件が成立している場合には、界磁電流指令値 $I f 0$

10

20

30

40

50

は、 $I_d = 0$ の目標飽和の界磁電流値 I_{fsat0} よりも大きくなっている。

【0085】

現在の界磁電流 I_{fs} は、 d 軸電流の増加条件が成立した時点の界磁電流検出値 I_{fr} に設定される。換算定数 K_{sr} は、式(12)に示したように、界磁巻線の巻数に応じた界磁巻線のインダクタンス L_{f0} に対する、電機子巻線の巻数に応じた d 軸インダクタンス L_{d0} の比率に予め設定されている。或いは、式(15)に従って算出された増加時の d 軸の電流指令値 I_{doinc} に対して、1より大きい値が乗算されてもよい。

【0086】

d 軸電流の増加により、ロータ磁束が強められ、磁気飽和の状態になる。その結果、電流微分インダクタンス dL_{If} が低下し、界磁巻線の応答性が向上する。よって、界磁電圧指令値 V_{fo} が最大電圧(上限電圧値 V_{fmax})により上限制限され、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化する場合でも、制御対象である界磁巻線の応答性を向上させ、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化することを抑制し、界磁電流検出値 I_{fr} を応答性良く界磁電流指令値 I_{fo} に追従させることができる。

10

【0087】

また、本実施の形態では、電機子電流制御部33は、最大電圧飽和状態になり d 軸電流の増加条件が成立した後、界磁電流指令値 I_{fo} と界磁電流検出値 I_{fr} との偏差 I_f の絶対値が、解除判定値 $Thcn$ 以下になったときに、 d 軸電流の増加条件が成立しなくなったと判定し、 d 軸の電流指令値の増加処理を終了する。

【0088】

解除判定値 $Thcn$ は、固定値に設定されてもよいし、界磁電流指令値 I_{fo} に応じて変化されてもよい。

20

【0089】

式(1)を用いて上述したように、電流指令値算出部331は、 d 軸電流の増加条件が成立していない場合は、ベクトル制御方法に従って設定された d 軸の基本電流指令値 I_{dob} を、最終的な d 軸の電流指令値 I_{do} に設定し、 d 軸電流の増加条件が成立している場合は、増加時の d 軸の電流指令値 I_{doinc} を、最終的な d 軸の電流指令値 I_{do} に設定する。

【0090】

<制御挙動>

図10に、比較例の図7と同様の条件で、 d 軸の電流指令値の増加処理が行われる本実施の形態に係る制御挙動を示す。図7と同様に、各グラフの縦軸は、物理量を無次元化して表している。界磁電圧は、印加可能な最大電圧を1で表している。

30

【0091】

時刻 t_{21} で、図7と同様に、トルク指令値 T_o が0からステップ的に増加し、界磁電流指令値 I_{fo} が、0からステップ的に増加し、 q 軸の電流指令値 I_{qo} が、0からステップ的に増加し、 d 軸の基本電流指令値 I_{dob} が、0からステップ的に減少している。トルク指令値 T_o の増加量が大きくなっているため、界磁電流指令値 I_{fo} の増加量が大きくなっている。

【0092】

そのため、界磁電流偏差 I_f が大きくなっており、PI制御(特に、比例項)により演算される界磁電圧指令値 V_{fo} が大きくなっている。PI制御により算出される界磁電圧指令値 V_{fo} の増加量が大きく、界磁電圧指令値 V_{fo} は、上限電圧値 V_{fmax} により上限制限され、最大電圧飽和状態になっている(時刻 t_{21} から時刻 t_{22} まで)。すなわち、界磁電流のフィードバック制御系の操作量である界磁電圧指令値 V_{fo} は、上限制限されている。そのため、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化する。

40

【0093】

電機子電流制御部33は、時刻 t_{21} で、最大電圧飽和状態になり、 d 軸電流の増加条件が成立したので、式(16)又は式(15)を用い、時刻 t_{21} の時点の界磁電流検出値 I_{fr} に基づいて、増加時の d 軸の電流指令値 I_{doinc} を算出し、増加時の d 軸の電

50

流指令値 I_{doinc} を d 軸の電流指令値 I_{do} に設定している。その結果、d 軸の電流指令値 I_{do} は、正の値に増加している。

【0094】

d 軸電流の増加により、ロータ磁束が強められ、磁気飽和の状態になっている。その結果、電流微分インダクタンス dL_{if} が低下し、界磁巻線の応答性が向上している。よって、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化することを抑制し、界磁電流検出値 I_{fr} を応答性良く界磁電流指令値 I_{fo} に追従させることができている。また、d 軸電流を正の値に増加させることでロータ磁束の低下を回避することができるため、図6および図7のような出力トルク T_r の一時的な落ち込みを生じない。

【0095】

界磁巻線のインダクタンスは、電機子巻線のインダクタンスに比べて大きい。界磁電流指令値 I_{fo} から界磁電流検出値 I_{fr} までの界磁電流のフィードバック制御系の応答周波数は、d 軸及び q 軸の電流指令値 I_{do} 及び I_{qo} から d 軸及び q 軸の電流検出値 I_{dr} 、 I_{qr} までの電機子電流のフィードバック制御系の応答周波数に比べて低く設定されている。ここで、応答周波数は、閉ループ伝達関数のカットオフ周波数及び時定数の逆数に相当する。よって、d 軸電流の増加速度は、界磁電流の増加速度よりも大きくなっている。d 軸の電流指令値の増加により、速やかに d 軸電流を増加させ、磁気飽和を生じさせることができている。

【0096】

そして、時刻 t_{23} で、電機子電流制御部 33 は界磁電流指令値 I_{fo} と界磁電流検出値 I_{fr} との偏差 I_f の絶対値が、解除判定値 $Thcn$ 以下になったとので、d 軸電流の増加条件が成立しなくなったと判定し、d 軸の電流指令値の増加処理を終了し、d 軸の基本電流指令値 I_{dob} を、最終的な d 軸の電流指令値 I_{do} に設定している。

【0097】

< q 軸の電流指令値の増加 >

一方、d 軸電流が増加されている時刻 t_{21} から時刻 t_{23} まで、トルク指令値 T_o に対して出力トルク T_r が十分に増加していない。これは、d 軸電流を正の値に増加させることによりリラクタンストルクが低下することによる。

【0098】

回転機の出力トルク T_r は、次式のように、与えられる。ここで、 P_m は、極対数であり、 L_d は、上述したロータ磁束 (d 軸成分) であり、 L_q は、q 軸インダクタンスである。リラクタンストルクが生じる回転機では、多くの場合 $L_d < L_q$ になり、 $(L_d - L_q) < 0$ になる。

$$\begin{aligned}
T_r &= P_m \times I_q \times \{ L_f \times I_f + (L_d - L_q) \times I_d \} \\
&= P_m \times I_q \times \{ -L_q \times I_d \} \\
&= P_m \times I_q \times \{ -L_q \times (I_{dob} + I_d) \} \\
I_d &= I_{doinc} - I_{dob} \dots (17)
\end{aligned}$$

【0099】

式 (19) の d 軸のロータ磁束は、d 軸電流の増加により、目標のロータ磁束になる。一方、q 軸のロータ磁束は、d 軸電流の増加により、 $L_q \times I_d$ だけ減少し、出力トルクは、 $P_m \times I_q \times L_q \times I_d$ だけ低下する。よって、次式に示すように、q 軸電流 I_q を、出力トルクの減少分 $P_m \times I_q \times L_q \times I_d$ を補うように増加させれば、出力トルクの低下を抑制することができる。

【数5】

数5

$$I_{qoinc} = I_{qob} \frac{T_o}{T_o - P_m I_{qob} L_q (I_{doinc} - I_{dob})} \dots (18)$$

ここで、 I_{qoinc} は、増加時の q 軸の電流指令値であり、 T_o は、トルク指令値である。

10

20

30

40

50

【 0 1 0 0 】

よって、電機子電流制御部 3 3 は、d 軸電流の増加条件が成立した場合に、d 軸の電流指令値の増加量 ($I_{d o i n c} - I_{d o b}$) に応じて、q 軸の電流指令値 $I_{q o}$ を増加させてもよい。例えば、電機子電流制御部 3 3 は、d 軸電流の増加条件が成立している期間、演算周期毎に、式 (1 8) を用い、増加時の q 軸の電流指令値 $I_{q o i n c}$ を算出し、増加時の q 軸の電流指令値 $I_{q o i n c}$ を、最終的な q 軸の電流指令値 $I_{q o}$ に設定し、d 軸電流の増加条件が成立していない場合に、q 軸の基本電流指令値 $I_{q o b}$ を、最終的な q 軸の電流指令値 $I_{q o}$ に設定する。

【 0 1 0 1 】

なお、解除判定値 $T_{h c n}$ を図 1 0 の場合よりも大きい値に設定し、d 軸電流の増加を早めに終了することにより、出力トルクを早めに増加させることもできる。

10

【 0 1 0 2 】

< 車両の発電電動機として用いられる場合 >

本実施の形態の回転機の制御装置を、車両用の発電電動機に使用する場合、図 1 1 のような構成となる。回転機 1 のロータの回転軸は、プーリ及びベルト機構 1 0 1 を介して、内燃機関 1 0 0 のクランク軸に連結されている。回転機 1 の回転軸は、内燃機関 1 0 0 及び変速装置 1 0 2 を介して車輪 1 0 3 に連結される。回転機 1 は、電動機として機能し、内燃機関 1 0 0 の補機として、車輪 1 0 3 の駆動力源となると共に、発電機として機能し、内燃機関 1 0 0 の回転を利用して発電を行う。

【 0 1 0 3 】

近年は、アイドルストップ車が増加しており、回転機 1 の駆動トルクにより内燃機関を再始動させる際の、駆動トルクの立ち上がり時間の短縮が求められている。回転機の制御装置において、界磁電流の立ち上がり時間は駆動トルクの立ち上がり時間および発電の立ち上がり時間に大きく影響するため、界磁電流の制御応答性を高くしたい。上述したように、最大電圧飽和状態において、d 軸電流を増加させることで、界磁電流の制御応答性を高くすることができる。

20

【 0 1 0 4 】

2 . 実施の形態 2

次に、実施の形態 2 に係る回転機 1 及び制御装置 1 1 について説明する。上記の実施の形態 1 と同様の構成部分は説明を省略する。本実施の形態に係る回転機 1 及び制御装置 1 1 の基本的な構成は実施の形態 1 と同様であるが、増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ の設定方法が、実施の形態 1 と異なる。

30

【 0 1 0 5 】

本実施の形態では、電機子電流制御部 3 3 は、最大電圧飽和状態になり、d 軸電流の増加条件が成立した場合に、d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ を増加させた後、d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ の増加量を次第に減少させる。

【 0 1 0 6 】

この構成によれば、d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ の増加により、磁気飽和が生じると、界磁巻線の応答性が向上し、界磁電流 I_f が応答性よく増加する。界磁電流 I_f が増加すると、ロータの磁気飽和を生じさせるために必要な d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ の増加量が減少する。よって、d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ の増加後、d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ の増加量を次第に減少させても、ロータの磁気飽和を生じさせ、界磁電流の応答性を向上させることができる。また、d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ の増加量を次第に減少させることにより、d 軸電流 I_d の増加による出力トルクの低下を減少させることができ、出力トルクを応答性よく増加させることができる。

40

【 0 1 0 7 】

例えば、電機子電流制御部 3 3 は、最大電圧飽和状態になり、d 軸電流の増加条件が成立した場合に、実施の形態 1 と同様に、増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ を、d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ に設定した後、d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ を、増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ から d 軸の基本電流指令値 $I_{d o b}$ に次第に近づける。

50

【 0 1 0 8 】

或いは、電機子電流制御部 33 は、d 軸電流の増加条件が成立した後、式 (1 5) を用いて、増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ を算出し、増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ を、d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ に設定する。

【 0 1 0 9 】

式 (1 5) を用いた算出は、d 軸電流の増加条件が成立している期間、演算周期毎に行われる。上述したように、式 (1 5) の $I_d = 0$ の目標飽和の界磁電流値 $I_{f s a t 0}$ は、 $I_d = 0$ において所望の磁気飽和が得られる界磁電流値に予め設定されている。界磁電流指令値 $I_{f o}$ は、d 軸電流 I_d が d 軸の基本電流指令値 $I_{d o b}$ である場合に、ロータに目標の磁気飽和が生じる界磁電流に設定されており、 $I_d = 0$ の目標飽和の界磁電流値 $I_{f s a t 0}$ よりも大きくなる。式 (1 5) の現在の界磁電流 $I_{f s}$ は、演算周期の時点の界磁電流検出値 $I_{f r}$ に設定される。式 (1 5) を用いて算出される増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ は、界磁電流検出値 $I_{f r}$ が増加するに従って、減少していく。

10

【 0 1 1 0 】

この構成によれば、界磁電流 I_f の増加に応じて、式 (1 5) によりロータの磁気飽和を生じさせるために必要な増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ を精度よく算出することができる。よって、界磁電流 I_f が増加するに従って、精度よく、界磁電流の応答性を向上させつつ、d 軸の電流指令値 $I_{d o}$ の増加量を次第に減少させることができる。

【 0 1 1 1 】

そして、界磁電流検出値 $I_{f r}$ が、 $I_d = 0$ の目標飽和の界磁電流値 $I_{f s a t 0}$ に到達すると、増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ は 0 になる。界磁電流検出値 $I_{f r}$ が、 $I_d = 0$ の目標飽和の界磁電流値 $I_{f s a t 0}$ を上回り、 $I_d = I_{d o b}$ である場合の界磁電流指令値 $I_{f o}$ に近づいていくと、増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ は、d 軸の基本電流指令値 $I_{d o b}$ に近づいていく。そこで、界磁電流の増加により、増加前の d 軸の電流指令値であっても磁気飽和した状態となる場合は、d 軸の電流指令値の増加処理を終了してもよい。例えば、電機子電流制御部 33 は、式 (1 8 - 1) が満たされた場合に、d 軸の電流指令値の増加処理を終了してもよい。

20

$$K_{s r} \times I_{d o b} + I_{f r} - I_{f s a t 0} \cdots (18 - 1)$$

よって、界磁電流検出値 $I_{f r}$ が、界磁電流指令値 $I_{f o}$ に近づくに従って、目標のロータ磁束を維持しつつ、増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ を d 軸の基本電流指令値 $I_{d o b}$ に次第に近づけ、出力トルク T_r をトルク指令値 T_o に次第に近づけることができる。なお、電機子電流制御部 33 は、式 (1 5) の代わりに、式 (1 8 - 2) を用いて、増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ を算出してもよい。

30

$$I_{d o i n c} = I_{d o b} + (I_{f o} - I_{f r}) / K_{s r} \cdots (18 - 2)$$

【 0 1 1 2 】

< 制御挙動 >

図 1 2 に、実施の形態 1 の図 1 0 と同様の条件で、式 (1 5) を用いて演算周期毎に増加時の d 軸の電流指令値 $I_{d o i n c}$ が算出される制御挙動を示す。図 1 0 と同様に、各グラフの縦軸は、物理量を無次元化して表している。界磁電圧は、印加可能な最大電圧を 1 で表している。

40

【 0 1 1 3 】

時刻 t_{31} で、図 1 0 と同様に、トルク指令値 T_o が 0 からステップ的に増加し、界磁電流指令値 $I_{f o}$ が、0 からステップ的に増加し、q 軸の電流指令値 $I_{q o}$ が、0 からステップ的に増加し、d 軸の基本電流指令値 $I_{d o b}$ が、0 からステップ的に減少している。トルク指令値 T_o の増加量が大きくなっているため、界磁電流指令値 $I_{f o}$ の増加量が大きくなっている。

【 0 1 1 4 】

図 1 0 と同様に、界磁電圧指令値 $V_{f o}$ は、上限電圧値 $V_{f m a x}$ により上制限され、最大電圧飽和状態になっている (時刻 t_{31} から時刻 t_{32} まで)。すなわち、界磁電流のフィードバック制御系の操作量である界磁電圧指令値 $V_{f o}$ は、上制限されている。

50

そのため、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化する。

【0115】

電機子電流制御部33は、時刻t31から時刻t34までのd軸電流の増加条件が成立している期間中、演算周期毎に、式(15)を用い、各時点の界磁電流検出値If_rに基づいて、増加時のd軸の電流指令値I_{doinc}を算出し、d軸の電流指令値I_{do}に設定している。

【0116】

よって、界磁電流検出値If_rが増加するに従って、増加時のd軸の電流指令値I_{doinc}及びd軸の電流指令値I_{do}が次第に減少している。時刻t33で、界磁電流検出値If_rが、I_d=0の目標飽和の界磁電流値I_{fsat0}に到達しており、増加時のd軸の電流指令値I_{doinc}は0になっている。時刻t33以降、界磁電流検出値If_rが、I_d=0の目標飽和の界磁電流値I_{fsat0}を上回り、I_d=I_{dob}である場合の界磁電流指令値I_{fo}に近づいていくと、増加時のd軸の電流指令値I_{doinc}は、d軸の基本電流指令値I_{dob}に近づいていく。よって、界磁電流検出値If_rが、界磁電流指令値I_{fo}に近づくに従って、目標のロータ磁束を維持しつつ、増加時のd軸の電流指令値I_{doinc}をd軸の基本電流指令値I_{dob}に次第に近づけ、出力トルクT_rをトルク指令値T_oに次第に近づけることができている。

10

【0117】

そして、時刻t34で、電機子電流制御部33は界磁電流指令値I_{fo}と界磁電流検出値If_rとの偏差I_fの絶対値が、解除判定値Th_{cn}以下になったとので、d軸電流の増加条件が成立しなくなったと判定し、d軸の電流指令値の増加処理を終了し、d軸の基本電流指令値I_{dob}を、最終的なd軸の電流指令値I_{do}に設定している。

20

【0118】

3. 実施の形態3

次に、実施の形態3に係る回転機1及び制御装置11について説明する。上記の実施の形態1及び2と同様の構成部分は説明を省略する。本実施の形態に係る回転機1及び制御装置11の基本的な構成は実施の形態1及び2と同様である。実施の形態1及び2では、電機子巻線と界磁巻線と間の相互インダクタンスが微小であったが、本実施の形態では、電機子巻線と界磁巻線と間の相互インダクタンスが無視できないほど大きい。

【0119】

そのため、界磁巻線の電圧方程式は、次式で表せられる。実施の形態1の式(8)に比べて、左辺の第2項に相互インダクタンスM_fの項が追加されている。

30

【数6】

数6

$$V_f - M_f \frac{dI_d}{dt} = R_f I_f + \frac{d\phi}{dt} \frac{dI_f}{dt} \quad \dots (19)$$

【0120】

図13に、相互インダクタンスM_fを無視できない回転機1に対して、実施の形態2と同様の制御を行った場合の制御挙動を示す。図12と同様に、各グラフの縦軸は、物理量を無次元化して表している。界磁電圧は、印加可能な最大電圧を1で表している。

40

【0121】

時刻t41で、図12と同様に、トルク指令値T_oが0からステップ的に増加し、界磁電流指令値I_{fo}が、0からステップ的に増加し、q軸の電流指令値I_{qo}が、0からステップ的に増加し、d軸の基本電流指令値I_{dob}が、0からステップ的に減少している。トルク指令値T_oの増加量が大きくなっているため、界磁電流指令値I_{fo}の増加量が大きくなっている。

【0122】

図12と同様に、界磁電圧指令値V_{fo}は、上限電圧値V_{fmax}により上制限され、最大電圧飽和状態になっている(時刻t41から時刻t42まで)。すなわち、界磁電流

50

のフィードバック制御系の操作量である界磁電圧指令値 V_{fo} は、上制限されている。そのため、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化する。

【0123】

電機子電流制御部 33 は、時刻 t_{41} から時刻 t_{44} までの d 軸電流の増加条件が成立している期間中、演算周期毎に、式 (15) を用い、各時点の界磁電流検出値 I_{fr} に基づいて、増加時の d 軸の電流指令値 I_{doinc} を算出し、 d 軸の電流指令値 I_{do} に設定している。

【0124】

時刻 t_{41} の直後に、 d 軸の電流検出値 I_{dr} が急峻に増加されるため、式 (19) の左辺の第 2 項が負方向に大きくなり、式 (19) の右辺全体が降圧されることで、界磁電流検出値 I_{fr} が低下し、負の値になっている。

10

【0125】

ロータ磁束は、式 (10) 及び式 (11) により表され、 d 軸電流 I_d と界磁電流 I_f とのバランスにより定まるが、負になる可能性がある。そこで、ロータに、電磁石と同じ磁束方向を有する永久磁石が設けられてもよい。永久磁石を設けることで、ロータ磁束が負になることを抑制できる。

【0126】

よって、図 12 と比べ、 d 軸の電流検出値 I_{dr} が増加している間は、界磁電流検出値 I_{fr} の増加が遅れており、出力トルク T_r の増加が遅れている。一方、 d 軸電流の増加により、ロータが磁気飽和の状態になり、界磁電流検出値 I_{fr} が応答性良く増加している。そして、界磁電流検出値 I_{fr} の増加によって、式 (15) により算出される増加時の d 軸の電流指令値 I_{doinc} が次第に低下し、 d 軸の電流検出値 I_{dr} が次第に低下すると、式 (19) の左辺の第 2 項が正になり、界磁電流検出値 I_{fr} を増加させる方向に作用する。よって、図 12 と比べ、界磁電流検出値 I_{fr} の増加が速くなり、出力トルク T_r の増加が速くなっている。

20

【0127】

よって、相互インダクタンス M_f が大きい回転機 1 では、 d 軸電流の増加開始直後は、界磁電流 I_f 及び出力トルク T_r の増加が遅れるが、その後、界磁電流 I_f 及び出力トルク T_r の増加が速くなる。よって、相互インダクタンス M_f が小さい回転機 1 と同じように、 d 軸電流の増加により、界磁電流 I_f 及び出力トルク T_r の応答性を向上させることができる。

30

【0128】

そして、時刻 t_{44} で、電機子電流制御部 33 は界磁電流指令値 I_{fo} と界磁電流検出値 I_{fr} との偏差 I_f の絶対値が、解除判定値 T_{hcn} 以下になったと判定し、 d 軸電流の増加条件が成立しなくなったと判定し、 d 軸の電流指令値の増加処理を終了し、 d 軸の基本電流指令値 I_{dob} を、最終的な d 軸の電流指令値 I_{do} に設定している。

【0129】

4. 実施の形態 4

次に、実施の形態 4 に係る回転機 1 及び制御装置 11 について説明する。上記の実施の形態 1 と同様の構成部分は説明を省略する。本実施の形態に係る回転機 1 及び制御装置 11 の基本的な構成は実施の形態 1 と同様であるが、コンバータ 9 の構成、コンバータ 9 の制御方法、及び d 軸電流指令値の増加処理が、実施の形態 1 と異なる。図 14 は、本実施の形態に係る回転機 1 及び制御装置 11 の概略構成図である。

40

【0130】

コンバータ 9 は、直流電源 2 の正極側に接続される正極側のパワー半導体 S_P と直流電源 2 の負極側に接続される負極側のパワー半導体 S_N とが直列接続された直列回路を 2 組設けた Hブリッジ回路とされている。第 1 組の直列回路 28 における正極側のパワー半導体 S_{P1} と負極側のパワー半導体 S_{N1} との接続点が、界磁巻線 4 の一端に接続され、第 2 組の直列回路 29 における正極側のパワー半導体 S_{P2} と負極側のパワー半導体 S_{N2} との接続点が、界磁巻線 4 の他端に接続される。

50

【 0 1 3 1 】

本実施の形態では、第 1 組の負極側のパワー半導体 S_{N1} 及び第 2 組の正極側のパワー半導体 S_{P2} は、ダイオードとされている。第 1 組の正極側のパワー半導体 S_{P1} 及び第 2 組の負極側のパワー半導体 S_{N2} は、スイッチング素子とされている。本実施の形態では、界磁巻線 4 に印加できる電圧は、0 V から直流電圧 V_{dc} となっている。なお、第 1 組の負極側のパワー半導体 S_{N1} は、スイッチング素子とされてもよい。

【 0 1 3 2 】

実施の形態 1 と同様に、電圧指令値算出部 352 は、界磁電圧指令値 V_{fo} を上限電圧値 V_{fmax} により上限制限すると共に、界磁電圧指令値 V_{fo} を下限電圧値 V_{fmin} により下限制限する。

10

【 0 1 3 3 】

上限電圧値 V_{fmax} は、界磁巻線 4 に印加できる最大電圧に設定される。下限電圧値 V_{fmin} は、界磁巻線 4 に印加できる最小電圧に設定される。本実施の形態では、上限電圧値 V_{fmax} は、直流電圧 V_{dc} に設定される。下限電圧値 V_{fmin} は、0 V に設定される。スイッチング直後のリングングの影響、後述する短絡防止期間の設定等を考慮して、上限電圧値 V_{fmax} は、直流電圧 V_{dc} よりも小さい値に設定されてもよく、下限電圧値 V_{fmin} は、0 V よりも大きい値に設定されてもよい。

【 0 1 3 4 】

なお、電圧指令値算出部 352 は、界磁電圧指令値 V_{fo} を上限電圧値 V_{fmax} 及び下限電圧値 V_{fmin} により上限制限及び下限制限しなくてもよい。このように、上限制限及び下限制限を行わなくても、後述するように、界磁電圧指令値 V_{fo} は、最大電圧 (V_{dc}) と最小電圧 (0 V) との間を振動する界磁搬送波信号 C_f と比較されるので、コンバータ 9 のスイッチング素子のオンオフ制御結果は、上限制限及び下限制限の有無にかかわらず同様になる。

20

【 0 1 3 5 】

スイッチング制御部 353 は、界磁電圧指令値 V_{fo} と、界磁搬送波の周期 T_{sf} で振動する界磁搬送波信号 C_f とを比較することにより、複数のスイッチング素子をオンオフ制御する。本実施の形態では、界磁搬送波信号 C_f は、界磁搬送波の周期 T_{sf} で 0 V から直流電圧 V_{dc} の間を振動する三角波とされている。直流電圧 V_{dc} は、電圧センサにより検出されてもよい。

30

【 0 1 3 6 】

スイッチング制御部 353 は、界磁搬送波信号 C_f が界磁電圧指令値 V_{fo} を下回った場合は、第 1 組の正極側のスイッチング素子 S_{P1} のスイッチング信号 Q_{P1} をオン (本例では、1) し、第 2 組の負極側のスイッチング素子 S_{N2} のスイッチング信号 Q_{N2} をオン (1) する。一方、スイッチング制御部 353 は、界磁搬送波信号 C_f が界磁電圧指令値 V_{fo} を上回った場合は、第 1 組の正極側のスイッチング信号 Q_{P1} をオフ (0) し、第 2 組の負極側のスイッチング信号 Q_{N2} をオフ (0) する。

【 0 1 3 7 】

< 比較例における界磁電圧飽和による影響 >

図 15 に、トルク指令値 T_o がステップ的に減少した場合の比較例に係る制御挙動を示す。比較例では、界磁電圧飽和時の d 軸の電流指令値の増加処理が行われず。図 15 の各グラフの縦軸は、物理量を無次元化して表している。界磁電圧は、印加可能な最大電圧を 1 で表し、0 V を 0 で表している。

40

【 0 1 3 8 】

時刻 t_{51} で、トルク指令値 T_o がステップ的に 0 に減少し、界磁電流指令値 I_{fo} が、ステップ的に 0 A に減少し、q 軸の電流指令値 I_{qo} が、ステップ的に 0 A に減少し、d 軸の電流指令値 I_{do} が、ステップ的に 0 に増加している。

【 0 1 3 9 】

界磁電流偏差 I_f が大きくなっており、PI 制御 (特に、比例項) により演算される界磁電圧指令値 V_{fo} が 0 よりも小さくなっているが、界磁電圧指令値 V_{fo} は、下限電圧

50

値 V_{fmin} (本例では $0V$) により下限制限され、最小電圧飽和状態になっている (時刻 t_{51} 以降)。すなわち、界磁電流のフィードバック制御系の操作量である界磁電圧指令値 V_{fo} は、下限制限されている。そのため、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が、損なわれており、界磁電流検出値 I_{fr} は、界磁電流指令値 I_{fo} にフィードバック制御系の本来の応答性 (時定数) よりも遅い応答性で追従している。なお、界磁電流指令値 I_{fo} が $0A$ に設定されている場合は、界磁電流偏差 I_f が $0A$ になり定常状態になった場合も、界磁電圧指令値 V_{fo} は、下限電圧値 V_{fmin} ($0V$) になり、最小電圧飽和状態になる。

【0140】

よって、界磁電流検出値 I_{fr} の応答遅れが大きくなっており、界磁電流検出値 I_{fr} に応じて変化するロータ磁束の応答遅れが大きくなっている。特に、界磁電流検出値 I_{fr} が減少するに従って、電流微分インダクタンス dL_{If} が増加し、界磁巻線の応答性が悪化するため、界磁電流検出値 I_{fr} の低下速度が減少し、界磁電流検出値 I_{fr} は界磁電流指令値 I_{fo} になかなか追従しない。

10

【0141】

一方、 q 軸電流 I_q は、応答性良く $0A$ に減少しているため、出力トルク T_r は応答性良く 0 に減少している。このように、比較例では、界磁電圧指令値 V_{fo} が最小電圧 (下限電圧値 V_{fmin}) に到達する最小電圧飽和状態になると、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化し、界磁電流の応答性が悪化する。

【0142】

< d 軸の電流指令値の増加 >

そこで、電機子電流制御部 33 は、界磁電圧指令値 V_{fo} が界磁巻線に印加できる最小電圧 (下限電圧値 V_{fmin}) 以下になる最小電圧飽和状態になった場合に、 d 軸電流の増加条件が成立したと判定し、 d 軸の電流指令値 I_{do} を正の値に増加させる。

20

【0143】

本実施の形態では、電機子電流制御部 33 は、 d 軸電流の増加条件が成立した場合に、式 (16) を満たす増加時の d 軸の電流指令値 I_{doinc} を算出する。例えば、電機子電流制御部 33 は、式 (15) を用い、増加時の d 軸の電流指令値 I_{doinc} を算出する。式 (15) の $I_d = 0$ の目標飽和の界磁電流値 I_{fsat0} は、 $I_d = 0$ において所望の磁気飽和が得られる界磁電流値に予め設定されている。最小電圧飽和状態になり d 軸電流の増加条件が成立している場合は、界磁電流指令値 I_{fo} は、 $I_d = 0$ の目標飽和の界磁電流値 I_{fsat0} よりも小さくなっている。

30

【0144】

現在の界磁電流 I_{fs} は、 d 軸電流の増加条件が成立した時点の界磁電流指令値 I_{fo} に設定される。換算定数 K_{sr} は、式 (12) に示したように、界磁巻線の巻数に応じた界磁巻線のインダクタンス L_{f0} に対する、電機子巻線の巻数に応じた d 軸インダクタンス L_{d0} の比率に予め設定されている。或いは、式 (15) に従って算出された増加時の d 軸の電流指令値 I_{doinc} に対して、1 より大きい値が乗算されてもよい。

【0145】

d 軸電流の増加により、ロータ磁束が強められ、磁気飽和の状態になる。その結果、電流微分インダクタンス dL_{If} が低下し、界磁巻線の応答性が向上する。よって、界磁電圧指令値 V_{fo} が最小電圧 (下限電圧値 V_{fmin}) により下限制限され、最小電圧飽和状態になり、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化する場合でも、制御対象である界磁巻線の応答性を向上させ、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化することを抑制し、界磁電流検出値 I_{fr} を応答性良く界磁電流指令値 I_{fo} に追従させることができる。

40

【0146】

トルク指令値 T_o が 0 でない状態で、 d 軸の電圧指令値の増加を行うと、 d 軸電流の増加により出力トルクの絶対値が減少するが、界磁電流の応答性を向上させることができる。また、出力トルクの絶対値の減少に対して、実施の形態 1 の式 (19) に示したように、

50

電機子電流制御部 33 は、d 軸電流の増加条件が成立した場合に、d 軸の電流指令値の増加量 ($I_{doinc} - I_{dob}$) に応じて、q 軸の電流指令値 I_{qo} を増加させてもよい。

【0147】

一方、トルク指令値 T_o が 0 である状態で、d 軸の電圧指令値の増加を行っても、出力トルクは 0 から変化しない。よって、電機子電流制御部 33 は、d 軸の電流指令値の増加量 ($I_{doinc} - I_{dob}$) に応じて、q 軸の電流指令値 I_{qo} を増加させなくてもよい。なお、トルク指令値 T_o が 0 である場合は、q 軸の基本電流指令値 I_{qob} は 0 A になるので、式 (19) により算出される増加時の q 軸の電流指令値 I_{qoinc} は、q 軸の基本電流指令値 I_{qob} になる。よって、トルク指令値 T_o の値に関わらず、q 軸の電流指令値の増加処理が行われても、悪影響はない。

10

【0148】

出力トルクへの影響がないようにするため、最小電圧飽和状態は、界磁電流指令値 I_{fo} が 0 A である状態 (又はトルク指令値 T_o が 0 である状態、q 軸の基本電流指令値 I_{qob} が 0 A である状態) で、界磁電圧指令値が最小電圧 (下限電圧値 V_{fmin}) 以下になった状態とされてもよい。

【0149】

また、実施の形態 1 と同様に、電機子電流制御部 33 は、最小電圧飽和状態になり d 軸電流の増加条件が成立した後、界磁電流指令値 I_{fo} と界磁電流検出値 I_{fr} との偏差 I_f の絶対値が、解除判定値 $Thcn$ 以下になったときに、d 軸電流の増加条件が成立しなくなると判定し、d 軸の電流指令値の増加処理を終了する。

20

【0150】

<制御挙動>

図 16 に、比較例の図 15 と同様の条件で、d 軸の電流指令値の増加処理が行われる本実施の形態に係る制御挙動を示す。図 15 と同様に、各グラフの縦軸は、物理量を無次元化して表している。界磁電圧は、印加可能な最大電圧を 1 で表し、0 V を 0 で表している。

【0151】

時刻 t_{61} で、図 15 と同様に、トルク指令値 T_o がステップ的に 0 に減少し、界磁電流指令値 I_{fo} が、ステップ的に 0 に減少し、q 軸の電流指令値 I_{qo} が、ステップ的に 0 に減少し、d 軸の基本電流指令値 I_{dob} が、ステップ的に 0 に増加している。

【0152】

界磁電流偏差 I_f が大きくなっており、PI 制御 (特に、比例項) により演算される界磁電圧指令値 V_{fo} が 0 よりも小さくなっているが、界磁電圧指令値 V_{fo} は、下限電圧値 V_{fmin} (本例では 0 V) により下限制限され、また、界磁電流指令値 I_{fo} は 0 A であり、最小電圧飽和状態になっている (時刻 t_{61} 以降)。界磁電流のフィードバック制御系の操作量である界磁電圧指令値 V_{fo} は、下限制限されているので、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化している。

30

【0153】

電機子電流制御部 33 は、時刻 t_{61} で、最小電圧飽和状態になり、d 軸電流の増加条件が成立したので、式 (16) 又は式 (15) を用い、時刻 t_{61} の時点の界磁電流指令値 I_{fo} (0 A) に基づいて、増加時の d 軸の電流指令値 I_{doinc} を算出し、増加時の d 軸の電流指令値 I_{doinc} を d 軸の電流指令値 I_{do} に設定している。その結果、d 軸の電流指令値 I_{do} は、正の値に増加している。

40

【0154】

d 軸電流の増加により、ロータ磁束 が強められ、界磁電流検出値 I_{fr} が減少しても、磁気飽和の状態になる。その結果、界磁電流検出値 I_{fr} が減少しても、電流微分インダクタンス $dL I_f$ が低下した状態を維持でき、界磁巻線の応答性が向上している。よって、界磁電流のフィードバック制御系の応答性が悪化することを抑制し、界磁電流検出値 I_{fr} を応答性良く界磁電流指令値 I_{fo} に追従させることができている。

【0155】

そして、時刻 t_{62} で、電機子電流制御部 33 は界磁電流指令値 I_{fo} と界磁電流検出値

50

I_{fr} との偏差 I_f の絶対値が、解除判定値 $Thcn$ 以下になったとので、 d 軸電流の増加条件が成立しなくなったと判定し、 d 軸の電流指令値の増加処理を終了し、 d 軸の基本電流指令値 I_{dob} （本例では、 $0A$ ）を、最終的な d 軸の電流指令値 I_{do} に設定している。

【0156】

図16の例では、 d 軸電流の増加条件が成立した時刻 t_{61} で、 q 軸の電流指令値 I_{qo} が $0A$ に減少されていた。しかし、図17に示すように、 d 軸電流の増加条件が成立した時刻 t_{71} で、 q 軸の電流指令値 I_{qo} は $0A$ に減少されずに、 d 軸電流の増加条件が成立する前の値に維持されてもよい。この場合であっても、 d 軸電流を増加させることにより、界磁電流の応答性を向上させ、界磁電流を応答性よく低下させることができる。界磁電流の低下によりロータ磁束を低下させ、出力トルクを低下させることができる。

10

【0157】

なお、コンバータ9が実施の形態1と同様に構成され、最小電圧（下限電圧値 V_{fmin} ）が $-V_{dc}$ である場合においても、電機子電流制御部33は、界磁電圧指令値 V_{fo} が界磁巻線に印加できる最小電圧（下限電圧値 V_{fmin} ）以下になる最小電圧飽和状態になった場合に、 d 軸電流の増加条件が成立したと判定し、 d 軸の電流指令値 I_{do} を正の値に増加させてもよい。

【0158】

<転用例>

上記の各実施の形態では、回転機1は、車両用の発電電動機である場合を例に説明した。しかし、回転機1は、電動機とされてもよく、発電機とされてもよく、車両以外の各種の装置に用いられてもよい。

20

【0159】

上記の各実施の形態では、ステータに1組の3相の電機子巻線が設けられる場合を例に説明した。しかし、ステータに複数組（例えば2組）の電機子巻線が設けられ、各組の電機子巻線に対応してインバータ及び制御装置の電機子電流制御部が設けられてもよい。

【0160】

本願は、様々な例示的な実施の形態及び実施例が記載されているが、1つ、または複数の実施の形態に記載された様々な特徴、態様、及び機能は特定の実施の形態の適用に限られるのではなく、単独で、または様々な組み合わせで実施の形態に適用可能である。従って、例示されていない無数の変形例が、本願明細書に開示される技術の範囲内において想定される。例えば、少なくとも1つの構成要素を変形する場合、追加する場合または省略する場合、さらには、少なくとも1つの構成要素を抽出し、他の実施の形態の構成要素と組み合わせる場合が含まれるものとする。

30

【符号の説明】

【0161】

1 回転機、4 界磁巻線、5 インバータ、9 コンバータ、11 回転機の制御装置、12 電機子巻線、14 ロータ、18 ステータ、32 電機子電流検出部、33 電機子電流制御部、 I_{do} d 軸の電流指令値、 I_{dob} d 軸の基本電流指令値、 I_{doinc} 増加時の d 軸の電流指令値、 I_{dr} d 軸の電流検出値、 I_{qo} q 軸の電流指令値、 I_{qob} q 軸の基本電流指令値、 I_{qoinc} 増加時の q 軸の電流指令値、 I_{qr} q 軸の電流検出値、 I_{fo} 界磁電流指令値、 I_{fr} 界磁電流検出値、 I_{fs} 現在の界磁電流、 I_{fsat0} $I_d = 0$ の目標飽和の界磁電流値、 K_{sr} 換算定数、 M_f 相互インダクタンス、 $Thcn$ 解除判定値、 To トルク指令値、 Tr 出力トルク、 V_{dc} 直流電圧、 V_{do} d 軸の電圧指令値、 V_{qo} q 軸の電圧指令値、 V_{fmax} 界磁電圧指令値の上限電圧値、 V_{fmin} 界磁電圧指令値の下限電圧値、 V_{fo} 界磁電圧指令値、 dLI_f 電流微分インダクタンス

40

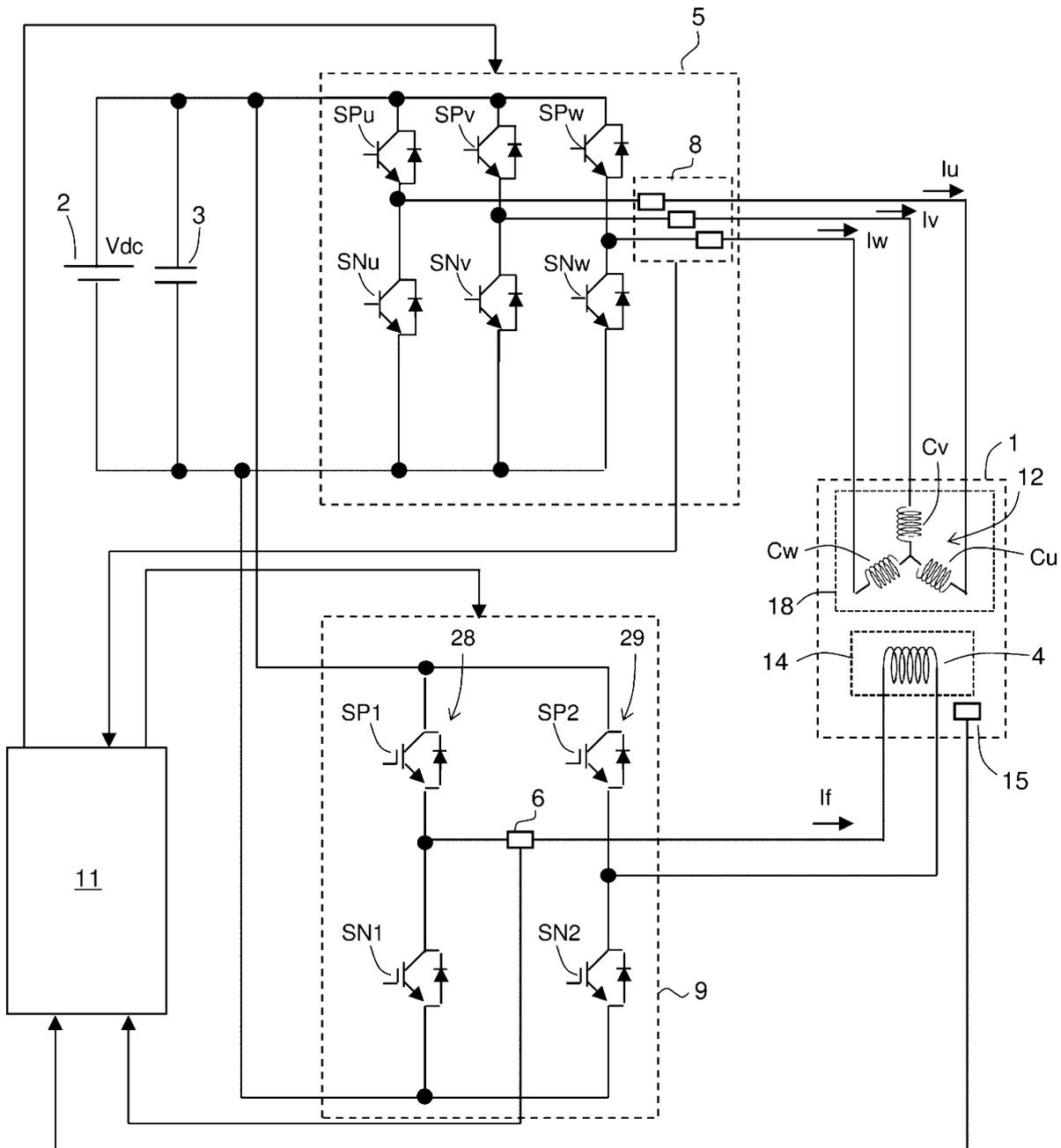
【要約】

【課題】内燃機関の始動時に限定されることなく、界磁電流の制御応答性が悪化する条件で、界磁電流の制御応答性を向上させることができる回転機の制御装置を提供する。

【解決手段】電機子巻線の電流指令値である電機子電流指令値を算出し、磁巻線の電流指令値である界磁電流指令値を算出し、界磁電圧指令値が界磁巻線に印加できる最大電圧以上になる最大電圧飽和状態になった場合、又は界磁電圧指令値が界磁巻線に印加できる最小電圧以下になる最小電圧飽和状態になった場合に、電機子電流指令値のd軸成分を正の値に増加させる交流回転機の制御装置。

【選択図】図1

図1



10

20

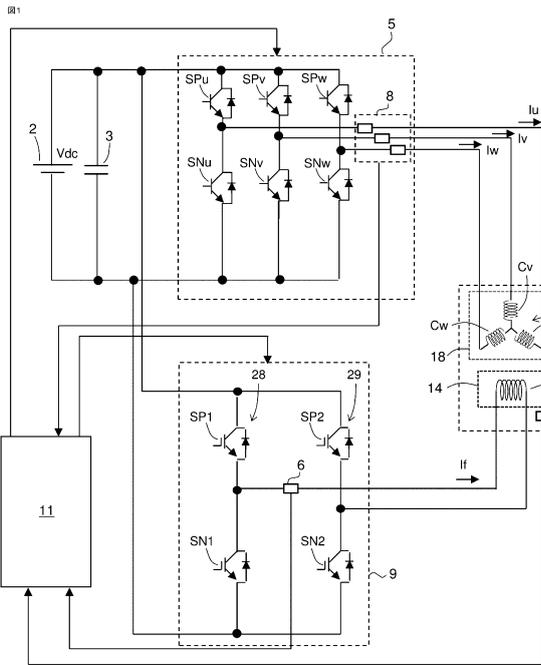
30

40

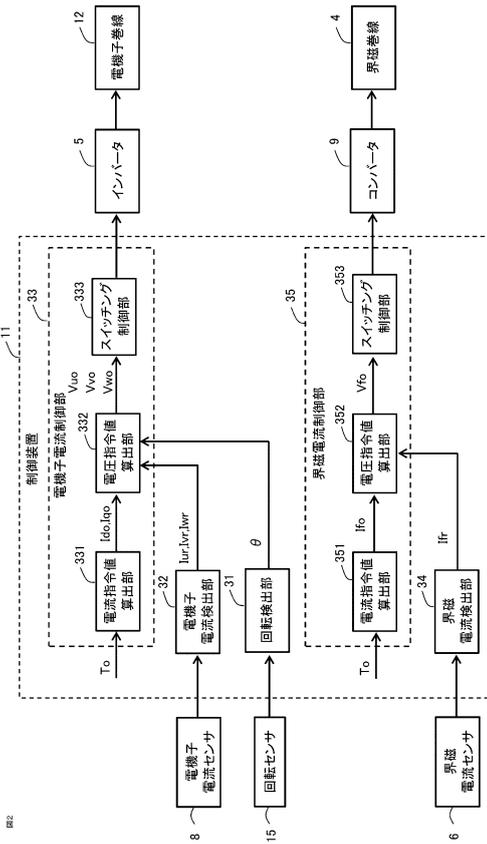
50

【図面】

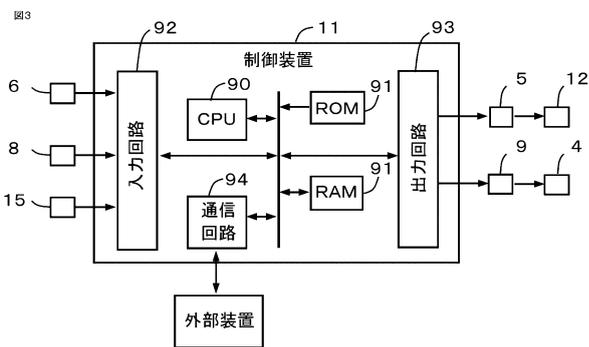
【図 1】



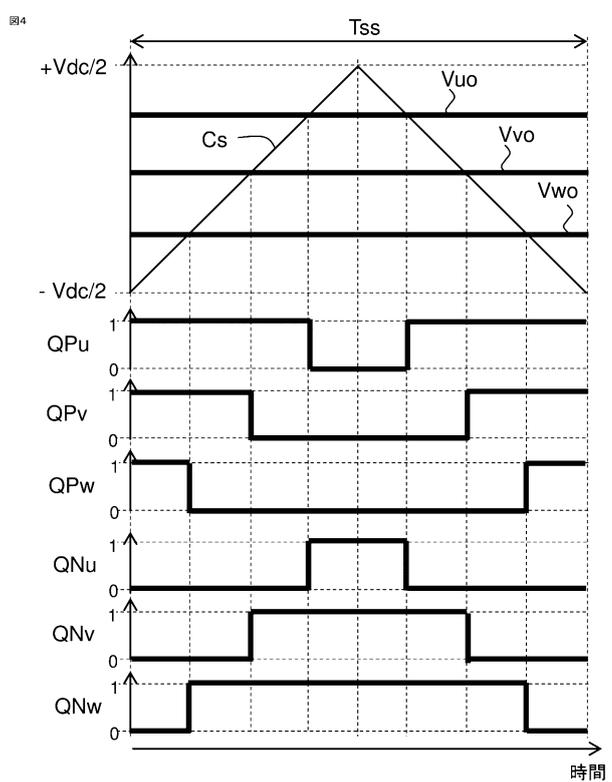
【図 2】



【図 3】



【図 4】



10

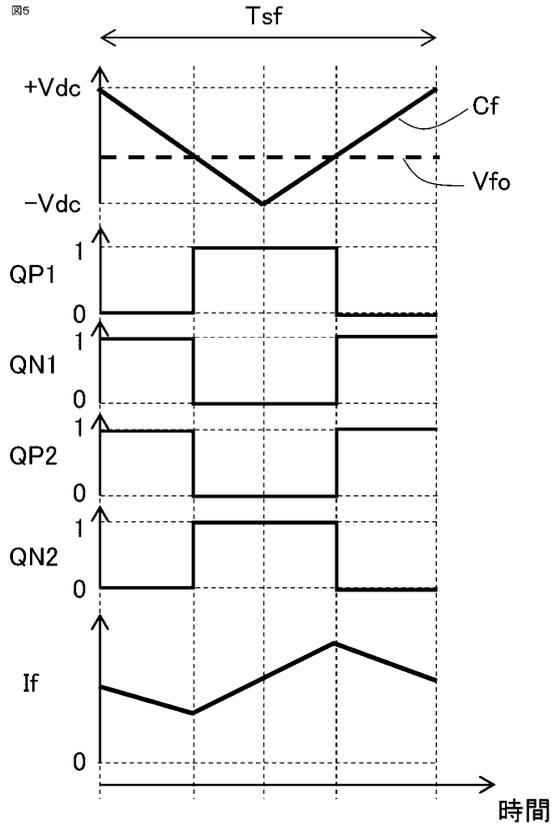
20

30

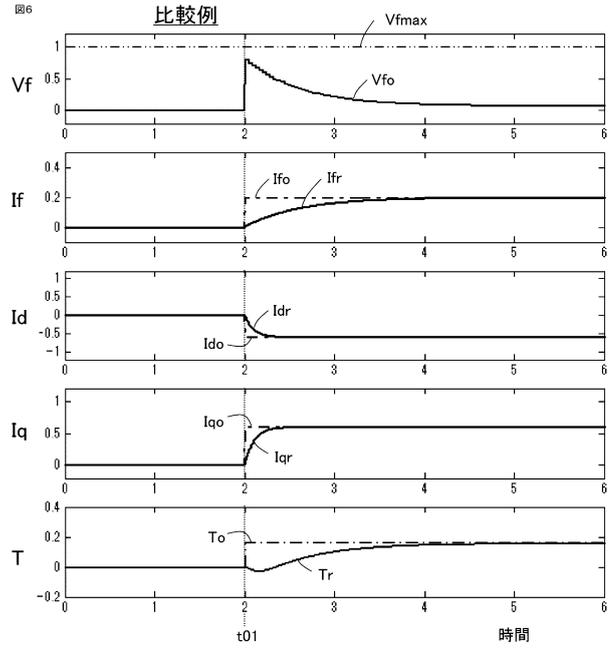
40

50

【図5】



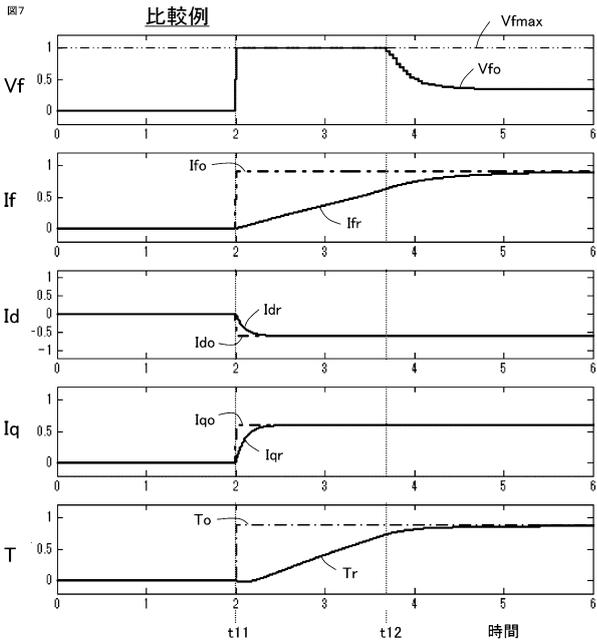
【図6】



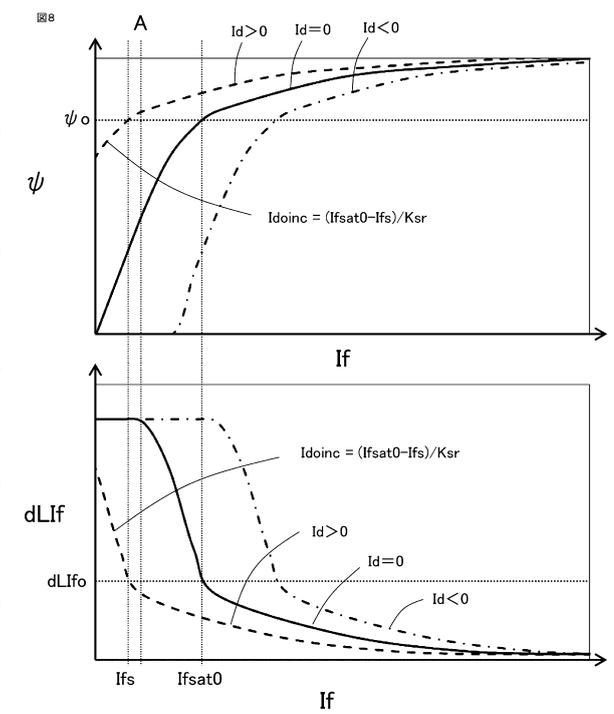
10

20

【図7】



【図8】

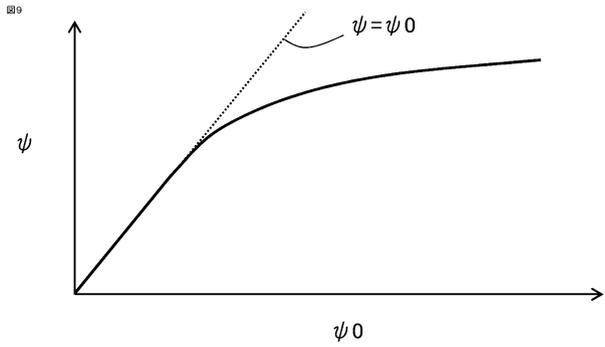


30

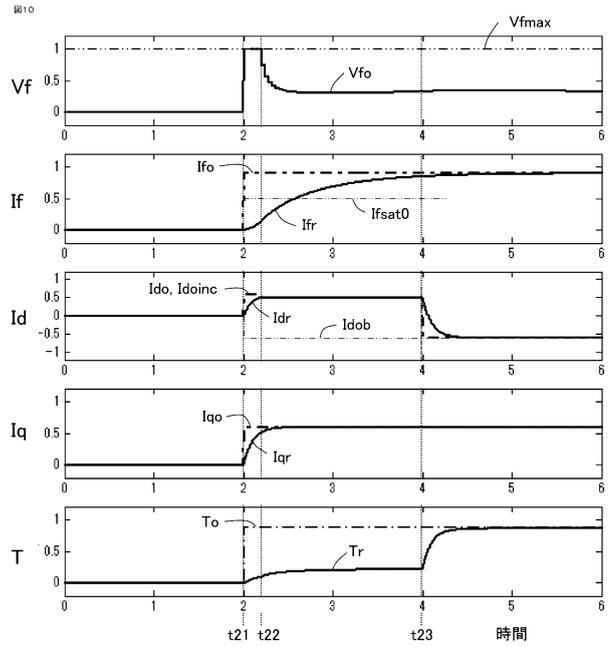
40

50

【図9】

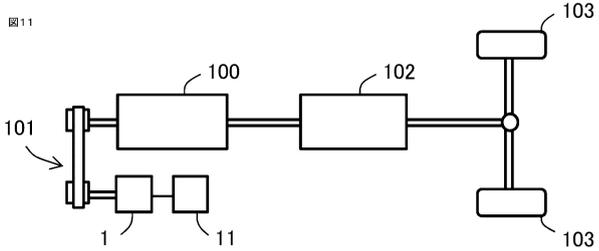


【図10】

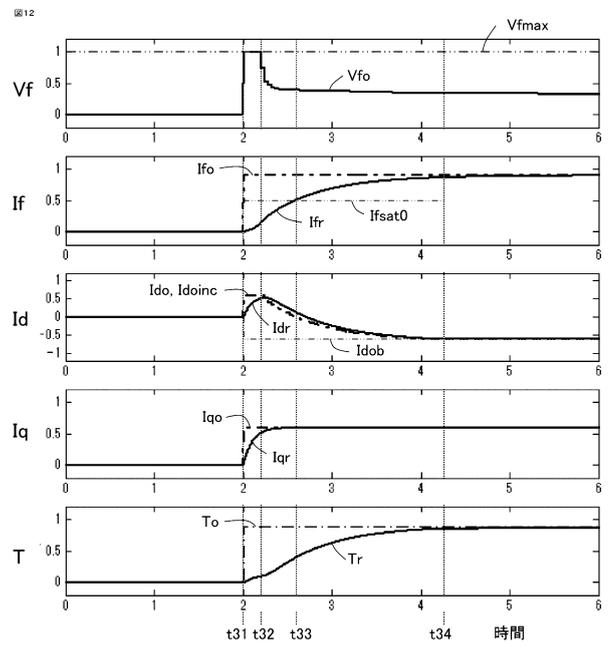


10

【図11】



【図12】

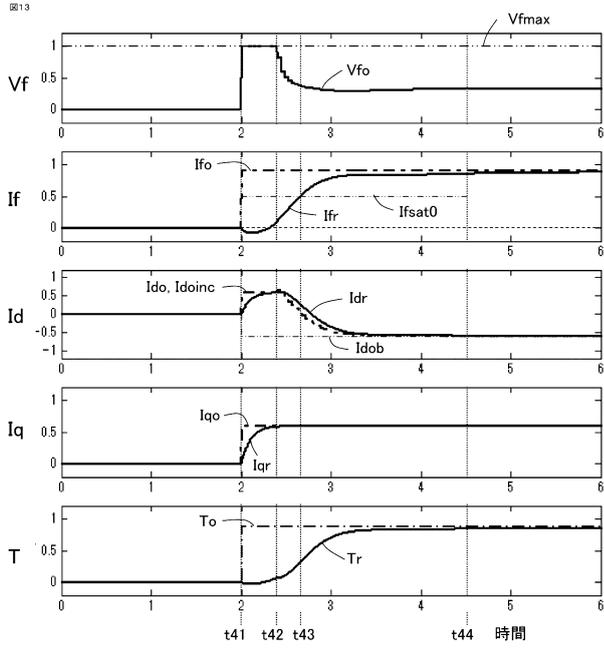


30

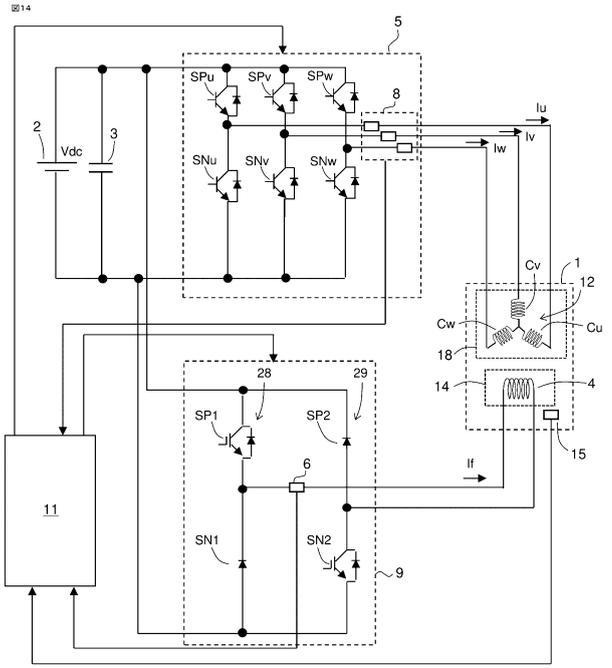
40

50

【図 13】



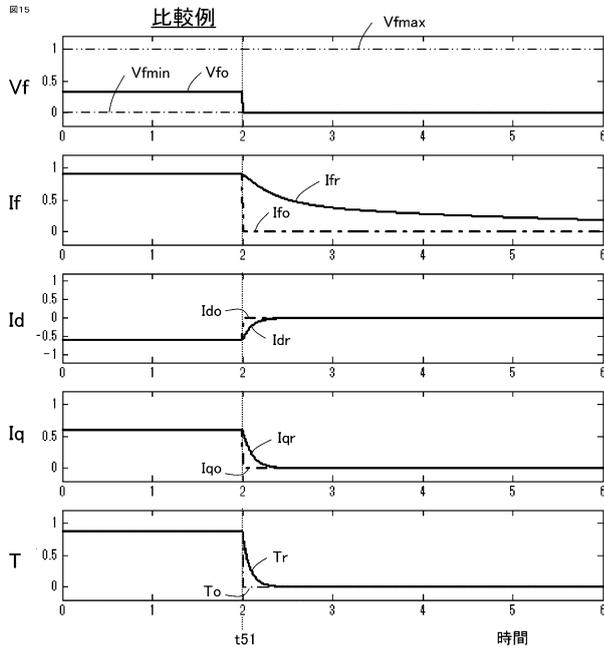
【図 14】



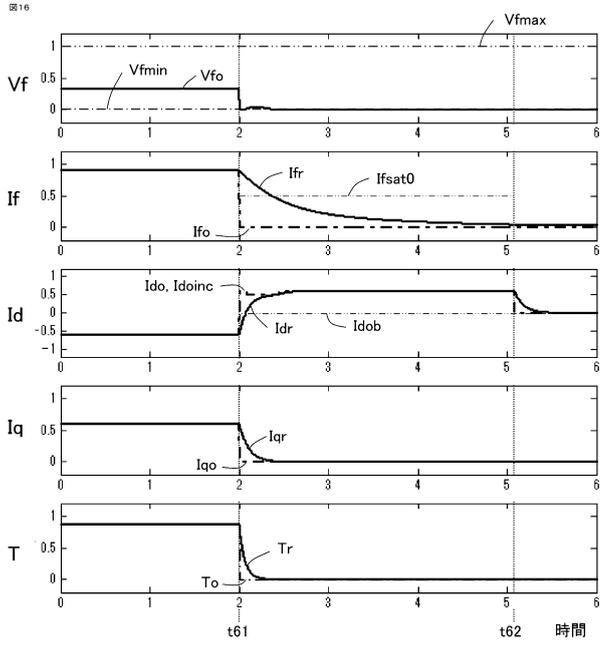
10

20

【図 15】



【図 16】



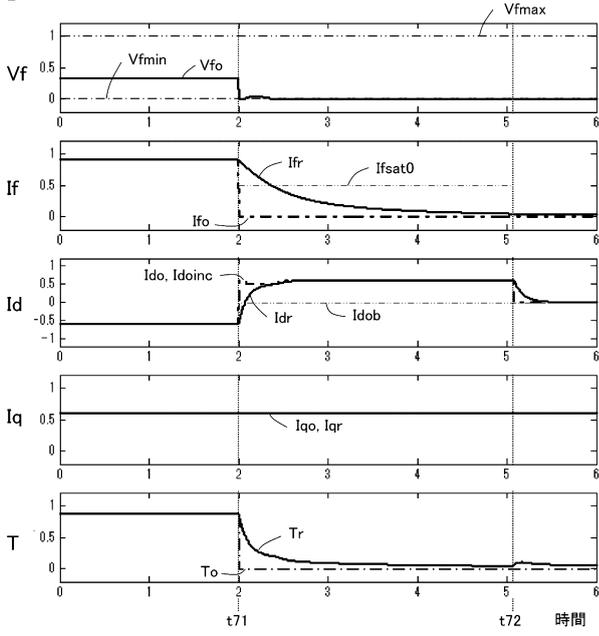
30

40

50

【 17 】

図17



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開 2015 - 35885 (JP, A)
特開 2002 - 191158 (JP, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H02P 21 / 22