

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2016年6月16日(16.06.2016)



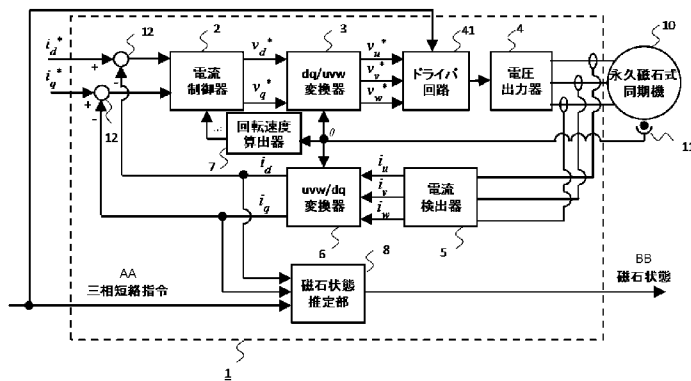
(10) 国際公開番号
WO 2016/092910 A1

- (51) 国際特許分類:
H02P 21/00 (2006.01) H02P 27/04 (2006.01)
H02P 6/16 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/073979
- (22) 国際出願日: 2015年8月26日(26.08.2015)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2014-251585 2014年12月12日(12.12.2014) JP
- (71) 出願人: 三菱電機株式会社(MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 高木 史朗(TAKAGI, Fumiaki); 〒1008310 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 Tokyo (JP). 小林 貴彦(KOBAYASHI, Takahiko); 〒1008310 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 Tokyo (JP). 家澤 雅宏(IEZAWA, Masahiro); 〒1008310 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 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 稲葉 忠彦, 外(INABA, Tadahiko et al.); 〒1008310 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 知的財産センター内 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: CONTROL DEVICE AND CONTROL METHOD

(54) 発明の名称: 制御装置および制御方法



- 2 Current controller
- 3 dq/uvw converter
- 4 Voltage output unit
- 5 Current detector
- 6 uvw/dq converter
- 7 Rotational speed calculator
- 8 Magnet state estimation unit
- 10 Permanent magnet synchronous machine
- 41 Driver circuit
- AA Three-phase short-circuit command
- BB Magnet state

(57) Abstract: In a conventional control device, there has been the problem of low induced voltage estimation accuracy due to a q-axis current flow at low rotational speed in magnet temperature estimation during three-phase short-circuit operation. The purpose of this invention is to more accurately estimate magnet flux or magnet temperature during three-phase short-circuit operation than the case using only d-axis current. A control device (1) is equipped with a phase short-circuit unit (50) for short-circuiting the three-phase terminals (51-1) to (51-3) of a permanent magnet synchronous machine (10) having a permanent magnet, and estimates the magnet state of the permanent magnet on the basis of the d-axis characteristics and q-axis characteristics during three-phase short-circuit operation in which the permanent magnet synchronous machine (10) is operated while the three-phase terminals (51-1 to 51-3) are short-circuited by the phase short-circuit unit (50).

(57) 要約: 従来の制御装置では、三相短絡運転時の磁石温度推定において、回転速度が低い場合にはq軸電流が流れるために、誘起電圧の推定精度が低いという課題があった。この発明は、三相短絡運転時において磁石磁束または磁石温度をd軸電流の

みを用いる場合よりも高い精度で推定することを目的とするものである。制御装置(1)は、永久磁石を有する永久磁石式同期機(10)の三相端子(51-1)~(51-3)を短絡させる相短絡部(50)を備え、相短絡部(50)によって三相端子(51-1)~(51-3)を短絡させて永久磁石式同期機(10)を運転する三相短絡運転時には、d軸特性およびq軸特性に基づいて、永久磁石の磁石状態を推定するものである。

WO 2016/092910 A1

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称： 制御装置および制御方法

技術分野

[0001] この発明は、永久磁石式同期機の制御装置および制御方法に関する。

背景技術

[0002] 永久磁石を有するモータにおいて高負荷運転を継続する場合、モータの温度上昇による永久磁石の過熱から、永久磁石が保護されることが重要である。磁石温度が過度に上昇すると、永久磁石の磁力が不可逆的に減少し、磁石温度が常温に戻っても、磁力が元に戻らない。このため、同一電流を通流した場合に同期機から得られるトルクが、磁力が元に戻らなかった分だけ減少してしまう。このような事態をさけるため、モータの温度上昇による過熱から永久磁石が保護される必要がある。

[0003] 永久磁石を過熱から保護する方法は、いかなる運転状況であっても永久磁石が過熱しないように放熱に予め余裕を持たせて設計する方法と、磁石温度を検知して加熱時には運転負荷を緩めたり冷却器を作動させたりして運転制御する方法とに大別される。

さらに、運転制御する方法において、磁石温度を検知する方法は、温度センサまたは磁石温度に応じて変動する磁束を検出するセンサを別途設置して磁石温度を検知するものと、モータの運転時の電流や電圧などから磁石温度を推定するものとに大別される。

[0004] また、モータの運転時の電流や電圧などから磁石温度を推定する方法において、磁石温度が上昇しやすい運転の例としては、モータが大電流による大トルクで高速回転される状況以外に、モータが三相短絡運転される状況が挙げられる。ここで、三相短絡運転とは、モータの三相端子を仮想的に短絡させる運転である。

三相短絡運転時における従来の磁石温度推定手法としては、三相短絡状態における電流検出値を d 軸座標および q 軸座標の値に変換し、変換された d

軸電流と所定のd軸インダクタンスとから誘起電圧定数を求め、その誘起電圧定数から磁石温度に換算する手法が知られている（例えば、特許文献1参照）。

[0005] なお、参考として、三相短絡運転以外の状況で磁石温度を推定する手法として、下記の2つの手法がある。

[0006] 第1の手法としては、磁束基本波と高調波の比率が、基準時とくらべてどう変わったかという情報に基いて、磁石温度を推定するものである（例えば、特許文献2参照）。

[0007] 第2の手法としては、実際の電圧と、制御器内部で所持するモータモデルから計算した電圧とのずれから、磁石磁束や磁石温度を推定するものである。（例えば、特許文献3および特許文献4参照）。

先行技術文献

特許文献

- [0008] 特許文献1：特開2006-280141
特許文献2：特開2014-007851
特許文献3：特開2001-186800
特許文献4：特開2005-192325

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0009] 永久磁石を過熱から保護するため、いかなる運転状況であっても永久磁石が過熱しないように放熱に予め余裕を持たせて設計する方法においては、モータや放熱器の容量を大きくせざるを得ず、永久磁石式同期機であるモータの小型化や軽量化が困難であるという課題があった。

また、温度センサ（あるいは、磁石温度に応じて変化する磁束を検出するセンサ）を設置して磁石温度を検知する場合、設置するセンサに応じたスペースを必要とし、設置場所の制約を受けるため、永久磁石式同期機であるモータまたは制御装置の小型化や軽量化が困難であるという課題があった。

[0010] 特許文献1に示された従来の制御装置においては、三相短絡運転時の磁石温度推定に使用する電流値としてd軸電流のみを用いているが、回転速度が低い場合にはq軸電流が流れるために、誘起電圧の推定精度が低いという課題があった。

[0011] また、特許文献2に示された三相短絡運転以外の状況で磁石温度を推定する第1の手法においては、電流高調波による磁束高調波と、磁石温度変化による磁束高調波の区別をつけがたく、磁石温度の推定精度が低いという課題があった。

[0012] また、特許文献3に示された三相短絡運転以外の状況で磁石温度を推定する第2の手法においては、磁石温度と巻線温度が同一と仮定することで、推定値を一意に決定しているが、実際には磁石温度と巻線温度が異なることが通常である。

特許文献4に示された三相短絡運転以外の状況で磁石温度を推定する第2の手法においては、磁石温度が巻線温度の α 倍という関係を仮定することで、推定値を一意に決定しているが、 α の値を正確に決定する方法については記載されていない。環境温度やモータの駆動状態によって、 α の値は時々刻々と変化するのが通常であるため、予め α の値を設定した場合には推定精度の劣化が起こる。

特許文献3および特許文献4のいずれにおいても、電圧のずれが、磁石磁束や磁束変化によるものか、それとも、巻線の温度変化による巻線抵抗変化によるものかを区別しがたく、磁石磁束の推定精度が低いという課題があった。

[0013] 本発明は、前述のような課題を解決するためになされたものであり、温度センサや磁束センサなどの別段のセンサ類を必要とせず永久磁石式同期機または制御装置の小型化を可能とし、三相短絡運転時において磁石磁束または磁石温度をd軸電流のみを用いる場合よりも高い精度で推定することを目的とするものである。

課題を解決するための手段

[0014] この発明に係る制御装置は、永久磁石を有する永久磁石式同期機の三相端子を短絡させる相短絡部を備え、相短絡部によって三相端子を短絡させて永久磁石式同期機を運転する三相短絡運転時には、 d 軸特性および q 軸特性に基づいて、永久磁石の磁石状態を推定するものである。

[0015] また、この発明に係る制御方法は、永久磁石を有する永久磁石式同期機の運転中において永久磁石式同期機の三相端子を短絡させる三相短絡ステップと、三相短絡ステップで三相端子が短絡された場合に、永久磁石式同期機の d 軸特性および q 軸特性を検出する検出ステップと、検出ステップで検出された d 軸特性および q 軸特性に基づいて、永久磁石の磁石状態を推定する磁石状態推定ステップとをプロセッサが実行するものである。

発明の効果

[0016] 上記のように構成された制御装置および制御方法は、三相短絡運転時において、別段の温度センサ等を必要とせず永久磁石式同期機または制御装置の小型化を可能とし、 d 軸電流のみを用いる場合よりも、磁石磁束または磁石温度を精度よく推定することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0017] [図1]この発明の実施の形態1に係る制御装置を備える同期機システムのハードウェア構成を示す図である。

[図2]この発明の実施の形態1に係る制御装置、および永久磁石式同期機の全体の構成を示す図である。

[図3]この発明の実施の形態1に係る制御装置における電圧出力器およびドライバ回路の構成を示す図である。

[図4]この発明の実施の形態1に係る制御装置に用いられる d 軸インダクタンス L_d の設定例を示す図である。

[図5]この発明の実施の形態1に係る制御装置に用いられる q 軸インダクタンス L_q の設定例を示す図である。

[図6]この発明の実施の形態1に係る制御装置に用いられる磁石温度の単位変化あたりの磁石磁束の変化率の設定例を示す図である。

[図7]この発明の実施の形態1に係る制御装置における磁石状態推定部の構成を示す図である。

[図8]この発明の実施の形態1に係る制御方法におけるフロー図である。

[図9]この発明の実施の形態2に係る制御装置における三相短絡電流軌跡の例を示す図である。

[図10]この発明の実施の形態2に係る制御装置における三相短絡電流軌跡の例を示す図である。

[図11]この発明の実施の形態2に係る制御装置における三相短絡電流軌跡の近似曲線のパラメータの例を示す図である。

[図12]この発明の実施の形態2に係る制御装置において三相短絡電流軌跡を用いて、d軸電流 i_d および q軸電流 i_q に基づいて磁石磁束推定値を得るための説明図である。

[図13]この発明の実施の形態2に係る制御装置における三相短絡電流軌跡を用いて、d軸電流 i_d および q軸電流 i_q に基づいて磁石温度推定値を得るための説明図である。

[図14]この発明の実施の形態2に係る制御装置に用いられる磁石磁束を表す残留磁束密度の温度依存性を示す図である。

発明を実施するための形態

[0018] 実施の形態1.

図1は、この発明を実施するための実施の形態1に係る制御装置を備える同期機システムのハードウェア構成を示す図である。

図1において、同期機システム200は、上位のコントローラ102と、制御装置1と、永久磁石式同期機10と、回転角度検出器11とを備える。

制御装置1は、ハードウェアとして、プロセッサ100と、記憶装置101と、電圧出力器4と、電流検出器5とを備える。

[0019] 記憶装置101は、図示していないが、ランダムアクセスメモリ等の揮発性記憶装置と、フラッシュメモリ等の不揮発性の補助記憶装置とを具備する。また、記憶装置101は、図示していないが、ランダムアクセスメモリ等

の揮発性記憶装置と、不揮発性の補助記憶装置の代わりにハードディスク等の補助記憶装置とを具備してもよい。

[0020] プロセッサ100は、記憶装置101から入力されたプログラムを実行する。記憶装置101が補助記憶装置と揮発性記憶装置とを具備するため、プロセッサ100に、補助記憶装置から揮発性記憶装置を介してプログラムが入力される。また、プロセッサ100は、演算結果等のデータを記憶装置101の揮発性記憶装置に出力してもよいし、揮発性記憶装置を介して補助記憶装置に前記データを保存してもよい。

図1におけるハードウェアの構成要素間におけるデータ等の入出力については、後述する。

[0021] 図2は、この発明を実施するための実施の形態1に係る制御装置、および永久磁石式同期機の全体の構成を示す図である。図2を用いて、本実施の形態にかかる制御装置1の構成を説明する。制御装置1は、電流制御器2と、 dq/uvw 変換器3と、電圧出力器4と、電流検出器5と、 uvw/dq 変換器6と、回転速度算出器7と、磁石状態推定部8と、加算減算器12と、ドライバ回路41とを備えている。制御装置1は、図示していない上位のコントローラ102からのd軸電流指令 i_d^* 、q軸電流指令 i_q^* および三相短絡指令、並びに永久磁石式同期機10に設置された回転角度検出器11から得られる回転角度 θ を入力とし、永久磁石式同期機10に入力され三相電圧指令に相当する電圧、および磁石状態を出力としている。なお、制御装置1は、上位のコントローラ102からトルク指令などを入力としてもよい。この場合、制御装置1は、トルク指令などをd軸電流指令 i_d^* およびq軸電流指令 i_q^* に換算する。

[0022] 永久磁石式同期機10は、図示していないが、三相電圧指令に相当する電圧によって生じる三相電流が流れる巻線を有する固定子と、永久磁石によって形成され回転軸に対して周方向に交互に配置された異なる磁極を有する回転子とを備えている。回転角度検出器11は、永久磁石式同期機10の回転子に設置されており、回転子の回転角度 θ を検出する。

- [0023] 電流制御器 2 は、制御装置 1 の外部の装置（例えば、図示していない上位のコントローラ 102）によって与えられる d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q を、加算減算器 12 によって d 軸電流指令 i_d^* 、q 軸電流指令 i_q^* から減算したものと、永久磁石式同期機 10 の回転子の回転速度 ω とを受け取る。そして、電流制御器 2 は、これらの入力を受けて、d 軸電圧指令 v_d^* および q 軸電圧指令 v_q^* を出力する。d 軸電圧指令 v_d^* および q 軸電圧指令 v_q^* は、永久磁石式同期機 10 に流れる d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q を d 軸電流指令 i_d^* および q 軸電流指令 i_q^* に追従させる値に設定される。
- [0024] dq/uvw 変換器 3 は、永久磁石式同期機 10 の回転子における周方向を示す θ に基づいて、周知の座標変換の手法を用いて、d 軸電圧指令 v_d^* および q 軸電圧指令 v_q^* を三相電圧指令 v_u^* 、 v_v^* 、 v_w^* に変換する。
- [0025] ドライバ回路 41 は、三相電圧指令 v_u^* 、 v_v^* 、 v_w^* または三相短絡指令を受け取り、後述するスイッチング素子を駆動するスイッチング信号を電圧出力器 4 に送る。
- [0026] 電圧出力器 4 は、前記スイッチング信号を受けて、三相電圧指令 v_u^* 、 v_v^* 、 v_w^* に相当する電圧を出力するとともに、図示していない上位のコントローラ 102 から三相短絡指令を受け取った場合に、電圧出力器 4 の後述するスイッチング素子を導通させることにより永久磁石式同期機 10 の三相端子を短絡させる。
- [0027] 電流検出器 5 は、例えば、電圧出力器 4 と永久磁石式同期機 10 とを接続する導線に設置された抵抗などの電流センサであり、電圧出力器 4 から永久磁石式同期機 10 に流れる三相電流 i_u 、 i_v 、 i_w を検出する。
- [0028] uvw/dq 変換器 6 は、周知の座標変換の手法を用いて、電流検出器 5 で検出された三相電流 i_u 、 i_v 、 i_w を d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q に変換する。
- [0029] 回転速度算出器 7 は、永久磁石式同期機 10 に設置された回転角度検出器

11から得られる回転子の回転角度 θ に基づいて、永久磁石式同期機10の回転子の回転速度 ω を出力する。

[0030] 磁石状態推定部8は、三相短絡指令の受信時において、 uvw/dq 変換器6から得られるd軸電流 i_d およびq軸電流 i_q に基づいて、永久磁石式同期機10の磁石状態を推定する。

ここで、磁石状態とは、永久磁石の磁石温度や磁石磁束を指す。また、磁石状態は、磁石磁束とほぼ等価である誘起電圧定数やトルク定数を含む。

[0031] また、図2の電流制御器2、 dq/uvw 変換器3、 uvw/dq 変換器6、回転速度算出器7、磁石状態推定部8、加算減算器12およびドライバ回路41は、記憶装置101に記憶されたプログラムを実行するプロセッサ100、または図示していないシステムLSI等の処理回路により実現される。また、複数のプロセッサ100および複数の記憶装置101が連携して上記機能を実行してもよいし、複数の処理回路が連携して上記機能を実行してもよい。また、複数のプロセッサ100および複数の記憶装置101と、複数の処理回路との組み合わせにより連携して上記機能を実行してもよい。

[0032] 図3は、本実施の形態に係る制御装置における電圧出力器およびドライバ回路の構成を示す図である。図3には、本実施例の電圧出力器4の具体的な構成例が示されている。電圧出力器4には、バッテリー等の電源52から直流電力が供給されている。電圧出力器4は、図3に示すように、6個のスイッチング素子42~47を有する三相ブリッジ回路を具備している。ドライバ回路41は、スイッチング素子42~47を駆動するスイッチング信号を送る。

[0033] 電圧出力器4の三相ブリッジ回路は、それぞれ、例えばMOSFETのような6個のスイッチング素子42~47を用いたブリッジで構成されている。三相ブリッジ回路では、スイッチング素子42、45が直列接続され、スイッチング素子43、46が直列接続され、スイッチング素子44、47が直列接続されて、さらにこの3組のスイッチング素子が並列に接続されている。

[0034] また、下側の3つのスイッチング素子45、46、47のGND54（グラウンド）側には、図示していないがそれぞれシャント抵抗が電流検出器5として1つずつ接続されていてもよい。これらのシャント抵抗は、電圧出力器4から永久磁石式同期機10に流れる三相電流 i_u 、 i_v 、 i_w の検出に用いられる。なお、シャント抵抗は、3個の例を示したが、2個のシャント抵抗であってもよいし、1個のシャント抵抗であっても電流検出は可能であり、そのような構成であってもよい。

[0035] ただし、電流検出器5として1個のシャント抵抗が用いられる場合であっても、通常のいわゆる1シャント方式とは異なり、スイッチング素子45、46、47のGND54側が電氣的に接続された接続部分53とGND54との間に、1個のシャント抵抗が設置されることはない。このように設置された1個のシャント抵抗は、三相短絡時の電流を検出できないためである。よって、1個のシャント抵抗が用いられる場合であっても、スイッチング素子45、46、47のいずれかのGND54側と接続部分53との間にシャント抵抗が設置される必要がある。

また、電流検出器5として1個のシャント抵抗が用いられる場合において、図示していないが、電流検出器5は、位相同期回路であるPLL等によって電流位相を検出し、三相電流が概ね平衡しているという仮定に基づいて、三相電流を推定する。

[0036] 三相電流 i_u 、 i_v 、 i_w は、スイッチング素子42とスイッチング素子45との間からバスバー等を通じて永久磁石式同期機10のU相端子51-1へ、スイッチング素子43とスイッチング素子46との間からバスバー等を通じて永久磁石式同期機10のV相端子51-2へ、スイッチング素子44とスイッチング素子47との間からバスバー等を通じて永久磁石式同期機10のW相端子51-3へそれぞれ流れて永久磁石式同期機10に供給される。

[0037] また、これらのバスバー等には、カレントトランス等を1つずつ接続してもよい。これらのカレントトランス等は、電圧出力器4から永久磁石式同期

機10に流れる三相電流 i_u 、 i_v 、 i_w の検出に用いられる。最も好適な実施の形態として、図2には、3個のカレントトランスと周辺アンプ回路から構成される電流検出器5を示している。

なお、カレントトランスは2個でもよい。この場合、電流検出器5は、三相電流の和がゼロであることを用いて残りの1相の電流値を得る。

また、カレントトランスは1個でもよい。この場合、電流検出器5は、前述と同様に電流位相検出と三相電流が概ね平衡しているとの仮定とから、三相電流を得る。

あるいは、コスト的な観点から、カレントトランスに代えて、バスバー等に直列にシャント抵抗を接続してもよい。

[0038] ドライバ回路41は、PWM回路49と、相短絡部50とを有している。

PWM回路49は、三相電圧指令 v_u^* 、 v_v^* 、 v_w^* に相当する電圧に応じてスイッチング素子42～47をスイッチングさせる波形からなるスイッチング信号を、スイッチング素子42～47に送る。

[0039] 相短絡部50は、図示されない上位のコントローラ102から三相短絡指令を受け取った場合に、スイッチング素子42～47のうち特定のグループのみを導通させる三相短絡スイッチング信号をスイッチング素子42～47に送る。三相短絡スイッチング信号としては、上アーム導通による三相短絡スイッチング信号と、下アーム導通による三相短絡スイッチング信号とがある。上アーム導通による三相短絡スイッチング信号とは、スイッチング素子42～44を導通させ、スイッチング素子45～47を導通させない信号を指す。下アーム導通による三相短絡スイッチング信号とは、スイッチング素子45～47を導通させ、スイッチング素子42～44を導通させない信号を指す。

また、電流検出器5として、スイッチング素子45、46、47のGND54側に置いたシャント抵抗を用いる場合、必ず下アーム導通による三相短絡スイッチング信号を出力する必要がある。

また、電流検出器5として、前述のバスバー等に接続されるカレントトラ

ンス等による構成とした場合、上アーム導通と下アーム導通とのいずれであっても差し支えない。

[0040] 三相短絡スイッチング信号を受けたスイッチング素子42～44および45～47のいずれかが導通されることによって、永久磁石式同期機10の三相端子であるU相端子51-1、V相端子51-2およびW相端子51-3がそれぞれ短絡される。すなわち、相短絡部50は、永久磁石式同期機10の三相端子であるU相端子51-1、V相端子51-2およびW相端子51-3を短絡させる。

[0041] 磁石状態推定部8は、uvw/dq変換器6から得られたd軸電流 i_d およびq軸電流 i_q と、予め設定されたd軸インダクタンス L_d およびq軸インダクタンス L_q とを用いて、下記の数式に基づいて磁石状態としての磁石磁束の磁石磁束推定値 Φ_{PM} を演算する。

[0042] [数1]

$$\Phi_{PM} = -\frac{L_d i_d^2 + L_q i_q^2}{i_d} \quad (1)$$

[0043] 図4は、本実施の形態に係る制御装置に用いられるd軸インダクタンス L_d の設定例を示す図である。図4の横軸は、d軸電流 i_d を表し、図4の縦軸は、q軸電流 i_q を表し、図4の高さ軸は、d軸インダクタンス L_d を表している。図5は、本実施の形態に係る制御装置に用いられるq軸インダクタンス L_q の設定例を示す図である。図5の横軸は、d軸電流 i_d を表し、図5の縦軸は、q軸電流 i_q を表し、図5の高さ軸は、q軸インダクタンス L_q を表している。予め設定されるd軸インダクタンス L_d およびq軸インダクタンス L_q は、一定の値ではなく、図4および図5に示すように、d軸電流 i_d およびq軸電流 i_q に応じたマップとして設定してもよい。これらの設定値は、制御装置1の駆動対象である永久磁石式同期機10によって異なる。

[0044] また、磁石状態推定部8は、式(1)の代替的な計算方法として、d軸イ

ンダクタンス L_d および q 軸インダクタンス L_q を陽に用いることなく、直接 d 軸磁束 Φ_d および q 軸磁束 Φ_q を用いてもよい。具体的には、磁石状態推定部8は、 d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q から、 d 軸磁束 Φ_d および q 軸磁束 Φ_q をマップによって求め、下記の数式に基づいて磁石磁束推定値 Φ_{PM} を演算してもよい。

[0045] [数2]

$$\Phi_{PM} = -\frac{\phi_d i_d + \phi_q i_q}{i_d} \quad (2)$$

[0046] さらに、式(2)の演算に加えて、磁石状態推定部8が、その内部で演算した磁石磁束推定値 Φ_{PM} から、磁石温度推定値 T_{PM} を演算する方法を以下に述べる。

図6は、本実施の形態に係る制御装置に用いられる磁石温度の単位変化あたりの磁石磁束の変化率の設定例を示す図である。図6の横軸は、 d 軸電流 i_d を表し、図6の縦軸は、 q 軸電流 i_q を表し、図6の高さ軸は、磁石温度の単位変化あたりの磁石磁束の変化率を表している。磁石状態推定部8は、式(2)で演算した磁石磁束推定値 Φ_{PM} から、さらに下記の数式に基づいて磁石状態としての磁石温度の磁石温度推定値 T_{PM} を演算する。

[0047] [数3]

$$T_{PM} = T_{PM0} + \frac{\Phi_{PM} - \Phi_{PM0}}{k} \quad (3)$$

[0048] ここで、 Φ_{PM0} は、予め設定される基準磁石磁束を示し、基準磁石温度 T_{PM0} における磁石磁束に相当する値である。 k は、磁石温度の単位変化あたりの磁石磁束の変化率を示し、予め設定される値である。ただし、 k は、一定の値として設定される必要はなく、図6に示すように、 d 軸電流 i_d と q 軸電流 i_q に応じたマップとして設定してもよい。 k の設定値は、制御装置1の駆動対象である永久磁石式同期機10によって異なる。

[0049] 図7は、本実施の形態に係る制御装置における磁石状態推定部の構成を示す図である。kをマップで求めてから式(3)に基づいて磁石温度推定値 T_{PM} を計算する代わりに、図7の磁石状態推定部8に示すように、式(1)および式(2)に基づいて求めた磁石磁束推定値 Φ_{PM} 、d軸電流 i_d およびq軸電流 i_q に基づいて、直接に磁石温度推定値 T_{PM} を得ることもできる。

[0050] 図7の磁石状態推定部8による磁石温度推定の動作を説明する。図7において、q軸磁束マップ81は、d軸電流 i_d およびq軸電流 i_q からq軸磁束 Φ_q を求める。d軸磁束マップ82は、d軸電流 i_d およびq軸電流 i_q からd軸磁束 Φ_d を求める。乗算除算器83は、q軸磁束 Φ_q をd軸電流 i_d で除し、q軸電流 i_q を乗じる。減算器84は、乗算除算器83の出力値の符号を反転させたものと、d軸磁束マップ82の出力値の符号を反転させたものとを足し合わせる。減算器84の出力値は、式(2)に示す磁石磁束推定値 Φ_{PM} と等価である。

[0051] 温度推定マップ85では、d軸電流 i_d 、q軸電流 i_q および減算器84の出力値である磁石磁束推定値 Φ_{PM} から、磁石温度推定値 T_{PM} が求められる。温度推定マップ85は、式(3)に相当するものである。一方で、式(3)のkおよび Φ_{PM0} が、d軸電流 i_d およびq軸電流 i_q に応じて若干変化する場合があることから、温度推定マップ85は、これらの変化を考慮した上でマップとして実装されたものである。

スイッチ86は、三相短絡指令が有効の場合のみ磁石温度推定値 T_{PM} を出力する。

[0052] 図8は、本実施の形態に係る制御方法におけるフロー図である。図8において、本実施の形態に係る制御方法では、永久磁石式同期機10の運転が開始された後から永久磁石式同期機10の運転が終了するまでの間に、三相短絡ステップS301と、検出ステップS302と、磁石状態推定ステップS303とをプロセッサ100が順に実行する。

[0053] まず、三相短絡ステップS301では、永久磁石式同期機10の三相端子

であるU相端子51-1、V相端子51-2およびW相端子51-3をそれぞれ短絡させる。

次に、検出ステップS302では、永久磁石式同期機10のd軸特性としてd軸電流 i_d 、およびq軸特性としてq軸電流 i_q を検出する。

最後に、磁石状態推定ステップS303では、検出ステップS302で検出されたd軸特性であるd軸電流 i_d およびq軸特性であるq軸電流 i_q に基づいて、式(1)、または式(2)を用いて、永久磁石の磁石状態としての磁石磁束の磁石磁束推定値 Φ_{PM} を推定する。また、検出ステップS302で検出されたd軸電流 i_d およびq軸電流 i_q に基づいて、式(3)、図6、または図7を用いて、永久磁石の磁石状態としての磁石温度の磁石温度推定値 T_{PM} を推定する。

[0054] したがって、本実施の形態に係る制御装置1は、相短絡部50によって三相端子51-1~51-3を短絡させて永久磁石式同期機10を運転する三相短絡運転時には、d軸電流 i_d 、予め設定されたd軸インダクタンス L_d 、q軸電流 i_q および予め設定されたq軸インダクタンス L_q に基づいて、永久磁石式同期機10の永久磁石の磁石状態として磁石磁束の磁石磁束推定値 Φ_{PM} を算出する。

すなわち、三相短絡運転時には、d軸電流 i_d および予め設定されたd軸インダクタンス L_d であるd軸特性、並びにq軸電流 i_q および予め設定されたq軸インダクタンス L_q であるq軸特性に基づいて、永久磁石式同期機10の永久磁石の磁石状態を推定する。

[0055] この構成によって、別段の温度センサ等を必要とせず永久磁石式同期機または制御装置の小型化を可能とし、q軸電流 i_q が流れる場合であっても、d軸電流 i_d のみを用いる場合よりも、磁石磁束を精度よく推定することが可能となる。また、放熱設計に余裕が少ない小型化した永久磁石式同期機であっても、永久磁石を過熱から保護することが可能となる。

[0056] 一般に、三相短絡時において、永久磁石式同期機の巻線の温度上昇などにより、巻線抵抗が変化すると、d軸電流もまた変化する。このため、d軸電

流のみを用いる場合、磁石温度の変化により d 軸電流が変化したのか、あるいは、巻線抵抗の変化により d 軸電流が変化したのかを区別することが通例は困難である。これが可能となるのは、巻線抵抗の変化による d 軸電流の変化が十分小さくなる場合である。具体的には、高回転速度（永久磁石式同期機特性によるので一概には言えないが、実験に用いた永久磁石式同期機の場合、約 2000 rpm 以上）で回転している場合のみである。

[0057] 一方、本実施の形態の構成のように、q 軸電流も用いることにより、巻線抵抗の変化による電流変化と磁石状態の変化による電流変化とを区別して、d 軸電流を用いる場合よりも、より低回転速度（永久磁石式同期機特性によるので一概には言えないが、実験に用いた永久磁石式同期機の場合、約 300 rpm 以上）で精度よく磁石状態を推定することが可能となる。

[0058] ところで、モータの回転を停止させるために制動動作をする場合、回転方向とは逆の方向のトルクが発生するように駆動するが、ある一定以下の回転速度にまで減速すると、モータの三相を短絡させることで制動のためのトルクが発生させる場合がある。このようなとき、本実施の形態に係る制御装置 1 は、三相短絡で制動トルクを発生させるような低回転速度の場合でも、磁石状態の十分な推定精度を得ることができる。

[0059] あるいは、例えば、自動車用オルタネータのように、動力源につながることで発電をする場合、動力源の回転速度（例えば、車速に応じたエンジンの回転速度）から同期機の運転中の回転速度も決まるのが通例である。このようなとき、中程度の回転速度（例えば 1000 rpm）でも永久磁石の過熱を招く場合があるために、磁石状態を推定し続ける必要がある。

d 軸電流のみで推定した場合は、中程度の回転速度で磁石状態の十分な推定精度が得られないため、このような運転状態において磁石状態を推定できないという欠点があった。このため、中程度の回転速度では永久磁石が過熱しないような放熱設計とする必要があり、例えば永久磁石式同期機の体格が大きくなるという欠点があった。

[0060] 本実施の形態に係る制御装置 1 は、中程度の回転速度の場合でも、磁石状

態の十分な推定精度を得ることができる。そして、磁石状態の推定精度が向上した分、放熱設計に余裕ができ、例えば永久磁石式同期機の体格を小さくすることが可能となるという利点がある。

[0061] また、本実施の形態に係る制御装置 1 は、三相短絡運転時には、d 軸電流 i_d 、d 軸磁束 Φ_d 、q 軸電流 i_q および q 軸磁束 Φ_q に基づいて、永久磁石式同期機 10 の永久磁石の磁石状態として磁石磁束の磁石磁束推定値 Φ_{PM} を算出する。

すなわち、三相短絡運転時には、d 軸電流 i_d および d 軸磁束 Φ_d である d 軸特性、並びに q 軸電流 i_q および q 軸磁束 Φ_q である q 軸特性に基づいて、永久磁石式同期機 10 の永久磁石の磁石状態を推定する。

[0062] この構成によっても、予め設定された d 軸インダクタンス L_d および予め設定された q 軸インダクタンス L_q に基づいて、磁石磁束推定値 Φ_{PM} を推定した前述の場合と同様の効果を奏する。

また、式 (2) のように磁石磁束を陽に用いることによって、d 軸インダクタンス L_d および q 軸インダクタンス L_q の磁気飽和による変化を考慮することができるため、大きな電流が流れる場合であっても、磁石磁束を精度よく推定することが可能となる。

[0063] また、本実施の形態に係る制御装置 1 は、三相短絡運転時には、予め設定された基準磁石温度 T_{PM0} 、基準磁石温度 T_{PM0} において予め設定された基準磁石磁束 Φ_{PM0} 、および磁石温度の単位変化あたりにおいて予め設定された磁石磁束の変化率 k を用いて、磁石磁束推定値 Φ_{PM} に基づいて、さらに永久磁石式同期機 10 の永久磁石の磁石状態として磁石温度の磁石温度推定値 T_{PM} を算出する。

[0064] この構成によって、別段の温度センサ等を必要とせず永久磁石式同期機または制御装置の小型化を可能とし、q 軸電流 i_q が流れる場合であっても、d 軸電流 i_d のみを用いる場合よりも、磁石磁束に加えてさらに磁石温度を精度よく推定することが可能となる。また、放熱設計に余裕が少ない小型化した永久磁石式同期機であっても、永久磁石を過熱から保護することが可能

となる。

また、流す電流の大きさが同一であっても、磁石温度により永久磁石式同期機 10 のトルクや発電量が変動する。このトルクや発電量の変動を磁石温度推定値 T_{PM} で補正することが可能となる。

[0065] また、本実施の形態に係る制御装置 1 は、三相短絡運転時には、予め設定された温度推定マップ 85 を用いて、 d 軸電流 i_d 、 q 軸電流 i_q および磁石磁束推定値 Φ_{PM} に基づいて、さらに永久磁石式同期機 10 の永久磁石の磁石状態として磁石温度の磁石温度推定値 T_{PM} を算出する。

[0066] この構成によっても、予め設定された基準磁石温度 T_{PM0} 、基準磁石温度 T_{PM0} において予め設定された基準磁石磁束 Φ_{PM0} 、および磁石温度の単位変化あたりにおいて予め設定された磁石磁束の変化率 k を用いて、磁石磁束推定値 Φ_{PM} に基づいて、磁石温度推定値 T_{PM} を算出した前述の場合と同様の効果を奏する。

この構成が必要となるのは、磁石温度の単位変化あたりの磁石磁束の変化率 k が一定でなく、補正する必要が生じた場合である。

また、磁石温度および磁石磁束が、 d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q に対して非線形となる場合も温度推定マップ 85 によって考慮することができるため、磁石温度推定値 T_{PM} の精度が向上する。

[0067] 実施の形態 2.

図 9 は、この発明を実施するための実施の形態 2 に係る制御装置における三相短絡電流軌跡の例を示す図である。図 9 の横軸は、 d 軸電流 i_d を表し、図 9 の縦軸は、 q 軸電流 i_q を表している。本実施の形態に係る制御装置 1 は、以下に述べる点で実施の形態 1 と異なる。本実施の形態における磁石状態推定部 8 は、 uvw/dq 変換器 6 から得られた d 軸電流 i_d 、 q 軸電流 i_q および予め設定された三相短絡電流軌跡に基づいて、磁石状態を演算する。

[0068] ここで、三相短絡電流軌跡とは、制御装置 1 の駆動対象である永久磁石式同期機 10 の三相端子 51-1 ~ 51-3 を短絡させた状態において、永久

磁石式同期機 10 の回転子を外部より回転させ、回転速度をゆっくりと変化させた時の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q を d q 軸座標平面に描いた軌跡を指す。すなわち、回転速度毎に異なる d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q の定常値によって構成される曲線を指す。三相短絡電流軌跡は、永久磁石式同期機 10 の磁石状態の違いによって異なる軌跡となる。

[0069] 図 9 において、実測した三相短絡電流軌跡の例として、磁石温度が 28℃ の場合における三相短絡電流軌跡 71 と、磁石温度が 57℃ の場合における三相短絡電流軌跡 72 が示されている。永久磁石式同期機 10 の三相端子 51-1 ~ 51-3 を短絡させた状態において、永久磁石式同期機 10 の回転子を外部から回転させると、静止時には d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q が流れないが、回転子の回転速度が増すにつれて、d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q の絶対値が大きくなっていく。回転速度を変化させた時のこれらの d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q を d q 軸座標平面上にプロットしたものが図 9 である。

[0070] 図 9 に示すように、三相短絡電流軌跡 72 の q 軸電流 i_q の絶対値は、同じ d 軸電流 i_d における三相短絡電流軌跡 71 の q 軸電流 i_q の絶対値よりも小さく、三相短絡電流軌跡 71 および 72 の形状は、磁石温度により異なる形状となる。これは、磁石温度の変化により永久磁石の磁石磁束が変化し、磁石磁束の回転によって誘起される電圧もまた変化するため、流れる d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q が異なってくるためである。

[0071] 図 10 は、本実施の形態に係る制御装置における三相短絡電流軌跡の例を示す図である。図 10 の横軸は、d 軸電流 i_d を表し、図 10 の縦軸は、q 軸電流 i_q を表している。図 10 において、細線で示される三相短絡電流軌跡 71 は、磁石温度 28℃ において回転速度を変化させながら記録したものである。図 10 において太線で示される三相短絡電流軌跡 73 は、回転速度 700 [rpm] で一定速度にしたまま巻線の温度を上昇させることで巻線抵抗を漸増させた時の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q をプロットしたものである。図 10 において、三相短絡電流軌跡 71 および 73 の両方が重なっ

ている。

[0072] 三相短絡電流軌跡 7 1 の特筆すべき特徴として、永久磁石式同期機 1 0 の巻線抵抗などの電氣的な抵抗が変化しても、三相短絡電流軌跡 7 1 の形状が変化しない点がある。図 1 0 は、この特徴を実験的に確認したものである。

巻線抵抗が上昇した状態での三相短絡電流軌跡 7 1 は、巻線抵抗が小さい状態での三相短絡電流軌跡 7 1 と重なる。さらに詳述すると、巻線抵抗が上昇した状態での三相短絡電流軌跡 7 1 のうち、より高回転速度で回転した場合における点が、巻線抵抗が小さい状態での三相短絡電流軌跡 7 1 のうち、より低回転速度で回転した場合における点と重なる。具体的には、巻線抵抗を R 、回転子の回転速度を ω とすると、三相短絡電流軌跡 7 1 のうち、 $R \div \omega$ が等しい点同士が重なる。

図 1 0 において、三相短絡電流軌跡 7 1 および 7 3 の両方が重なることから、巻線抵抗が変化しても、三相短絡電流軌跡 7 1 の形状が変化しないことの傍証となっている。

[0073] 続いて、磁石状態推定部 8 における三相短絡電流軌跡の設定内容を説明する。

図 1 1 は、本実施の形態に係る制御装置における三相短絡電流軌跡の近似曲線のパラメータの例を示す図である。

測定された三相短絡電流軌跡の形状を曲線近似するため、曲線近似された近似曲線のパラメータを設定する。具体的には、例えば、パラメータ $p_1 \sim p_5$ 、 $q_1 \sim q_4$ 、 m 、 s の 11 個の定数値を設定して、三相短絡電流軌跡の形状を下記の有理関数によって曲線近似する。

[0074] [数4]

$$i_q = \frac{p_1 X^4 + p_2 X^3 + p_3 X^2 + p_4 X + p_5}{X^4 + q_1 X^3 + q_2 X^2 + q_3 X + q_4} \quad (4)$$

[0075] ただし、式 (4) の X は正規化された d 軸電流 i_d を指し、下記の数式で与えられる。

[0076] [数5]

$$X = \frac{i_d - m}{s} \quad (5)$$

[0077] 設定した11個のパラメータの具体的数値例が図11に示されている。図11における高温側のパラメータは、磁石温度が高温の57℃の時に取得された三相短絡電流軌跡に対応する近似パラメータである。図11における低温側のパラメータは、磁石温度が低温の28℃の時に取得した三相短絡電流軌跡に対応する近似パラメータである。高温側のパラメータは、図9における三相短絡電流軌跡72に対応する。低温側のパラメータは、図9における三相短絡電流軌跡71に対応する。

[0078] 続いて、磁石状態推定部8が、予め設定された三相短絡電流軌跡を用いて、d軸電流*i_d*およびq軸電流*i_q*とに基づいて、磁石状態を推定する手法について説明する。

図12は、本実施の形態に係る制御装置において三相短絡電流軌跡を用いて、dq軸電流値に基づいて磁石磁束推定値を得るための説明図である。図12の横軸は、d軸電流*i_d*を表し、図12の縦軸は、q軸電流*i_q*を表している。図12において、三相短絡運転時のd軸電流*i_d*およびq軸電流*i_q*をプロットした点をAとする。この時、原点OからAに向けて半直線OAを引き、半直線OAが予め設定された三相短絡電流軌跡74と交わる点をBとする。このとき、三相短絡運転時の磁石磁束推定値Φ_{PM}と三相短絡電流軌跡74を取得した時の磁石磁束Φ_{PM, B}との比は、OAとOBとの長さの比に等しい。よって、三相短絡運転時の磁石磁束推定値Φ_{PM}は、三相短絡電流軌跡74を取得した時のBに対応する磁石磁束の値、すなわち三相短絡電流軌跡74に対応する磁石磁束基準値Φ_{PM, B}を、OBの長さで除してOAの長さを乗じることで求まる。

[0079] なお、磁石磁束基準値Φ_{PM, B}は、三相短絡電流軌跡74を取得した時の磁石磁束を指し、予め設定される値であるのが望ましい。この設定値とし

ては、駆動対象となる永久磁石式同期機 10 の設計値を用いる。設計値を利用できない場合は、無負荷誘起電圧試験（同期機の回転子を外部から与えたトルクにより機械的に回転させ、その際の誘起電圧から磁石磁束を測定する試験）などの手法によって、別途測定した値が設定される。

また、三相短絡電流軌跡に対応する磁石磁束基準値 $\Phi_{PM, B}$ は、予め設定された値に限らず、実施の形態 1 における式 (1) または式 (2) によって算出された磁石磁束推定値 Φ_{PM} であってもよい。

[0080] 次に磁石温度を推定する手法について説明する。前述において求めた磁石磁束推定値 Φ_{PM} と、実施の形態 1 に記載の方法とを用いて、磁石温度すなわち磁石温度推定値を算出できる。例えば実施の形態 1 の式 (3) において、磁石磁束推定値 Φ_{PM} には図 12 における三相短絡運転時の磁石磁束推定値 Φ_{PM} を、基準磁石磁束 Φ_{PM0} には図 12 における三相短絡電流軌跡 74 に対応する磁石磁束基準値 $\Phi_{PM, B}$ を、基準磁石温度 T_{PM0} には図 12 における後述する三相短絡電流軌跡 74 に対応して予め設定された磁石温度基準値 $T_{PM, B}$ を当てはめることによって、点 A の三相短絡運転時の磁石温度推定値 T_{PM} を算出できる。

したがって、1 つの三相短絡電流軌跡に対応する磁石温度基準値に基づいて、磁石温度推定値 T_{PM} を推定できる。

[0081] また以降では、本実施の形態に特有の 2 つ以上の三相短絡電流軌跡を用いて磁石温度を推定する手法について、図 13 を参照して説明する。

図 13 は、本実施の形態に係る制御装置における三相短絡電流軌跡を用いて、d 軸電流および q 軸電流に基づいて磁石温度推定値を得るための説明図である。図 13 の横軸は、d 軸電流 i_d を表し、図 13 の縦軸は、q 軸電流 i_q を表している。図 13 において、三相短絡運転時の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q をプロットした点を A とする。この時、原点 O から A に向けて半直線 OA を引き、半直線 OA が予め設定された高温側の三相短絡電流軌跡 76 と交わる点を B とし、予め設定された低温側の三相短絡電流軌跡 75 と交わる点を C とする。このとき、線分 AB の長さ と 線分 AC の長さ との比が

、三相短絡運転時の磁石温度推定値 T_{PM} , A から低温側の三相短絡電流軌跡 7 5 を取得した時の磁石温度 T_{PM} , C を引いた差と、高温側の三相短絡電流軌跡 7 6 を取得した時の磁石温度 T_{PM} , B から三相短絡運転時の磁石温度推定値 T_{PM} , A を引いた差との比に対応する。ただし、点 A が点 B より原点 O に近い場合は、線分 AB の長さを負とし、点 A が点 C より原点 O から遠い場合は、線分 AC の長さを負とする。上述の内容を用いて点 A の磁石温度推定値 T_{PM} , A を計算するには、例えば下記の数式を計算すればよい。

[0082] [数6]

$$T_{PM,A} = \frac{T_{PM,C}(i_d - i_{d,B}) + T_{PM,B}(i_{d,C} - i_d)}{i_{d,C} - i_{d,B}} \quad (6)$$

[0083] ここで、 T_{PM} , B は、高温側の三相短絡電流軌跡 7 6 を取得したときの磁石温度、すなわち三相短絡電流軌跡 7 6 に対応して予め設定された磁石温度基準値を示す。 T_{PM} , C は、低温側の三相短絡電流軌跡 7 5 を取得した時の磁石温度、すなわち三相短絡電流軌跡 7 5 に対応して予め設定された磁石温度基準値を示す。 $i_{d,B}$ は点 B の d 軸電流、 $i_{d,C}$ は点 C の d 軸電流、 i_d は三相短絡運転時の d 軸電流を示す。なお、式 (6) の $i_{d,B}$ 、 $i_{d,C}$ 、 i_d に代えて、点 B の q 軸電流 $i_{q,B}$ 、点 C の q 軸電流 $i_{q,C}$ 、三相短絡運転時の q 軸電流 i_q を用いても良い。

また、三相短絡電流軌跡 7 5、7 6 に対応する磁石温度基準値 T_{PM} , B、 T_{PM} , C は、予め設定された値に限らず、実施の形態 1 における式 (3) または図 7 によって算出された磁石温度推定値 T_{PM} であってもよい。

[0084] また、実施の形態 1 の式 (3) と 1 つの三相短絡電流軌跡とを用いて磁石温度推定値 T_{PM} を推定する場合には、d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q と、磁石磁束との関係の非線形性、すなわち磁束飽和の影響を考慮できない場合がある。

一方、2 つの三相短絡電流軌跡 7 5、7 6 を用いて磁石温度推定値 T_{PM}

、 A を推定する場合には、2つの三相短絡電流軌跡 75 、 76 が、 d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q と、磁石磁束との関係の非線形性、すなわち磁束飽和の影響を含んだ軌跡であるため、磁束飽和の影響を考慮して磁石温度推定値 T_{PM} 、 A を推定できる。

したがって、1つの三相短絡電流軌跡を用いて磁石温度推定値 T_{PM} 、 A を推定する場合よりも、2つの三相短絡電流軌跡を用いた場合において、磁石温度推定値 T_{PM} 、 A の推定精度が向上する。

[0085] また、三相短絡電流軌跡に対応する磁石温度基準値の個数は、上述のように2つである場合に限らず、2つ以上すなわち複数である場合でも、磁石温度推定値 T_{PM} 、 A を算出することが可能である。

例えば、3つの磁石温度基準値 T_{PM} 、 B 、 T_{PM} 、 C 、 T_{PM} 、 D が予め設定されており、三相短絡運転時の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q をプロットした点を A とした場合を想定する。点 A が点 B および点 C との間にある場合、すなわち点 A の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q が、点 B の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q と、点 C の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q との間にある場合には、2つの磁石温度基準値 T_{PM} 、 B 、 T_{PM} 、 C を用いて磁石温度推定値 T_{PM} 、 A を式(6)によって推定する。

また、点 A が点 C および点 D との間にある場合、すなわち点 A の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q が、点 C の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q と、点 D の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q との間にある場合には、2つの磁石温度基準値 T_{PM} 、 C 、 T_{PM} 、 D を用いて磁石温度推定値 T_{PM} 、 A を式(6)によって推定する(式(6)の添字 B が C に、添字 C が D に置き換えられる)。

[0086] したがって、複数の三相短絡電流軌跡のそれぞれに対応する磁石温度基準値の場合でも、磁石温度推定値 T_{PM} 、 A を推定できる。

さらに、2つの三相短絡電流軌跡の場合よりも磁石温度推定値 T_{PM} 、 A の推定精度が向上する。推定精度が向上する理由としては、磁石磁束(および磁石磁束によって決まる三相短絡電流軌跡)と磁石温度との間の関係の非

線形性が補正されるためである。

[0087] 図14は、本実施の形態に係る制御装置に用いられる磁石磁束を表す残留磁束密度の温度依存性を示す図である。図14の横軸は、磁石温度を表し、図14の縦軸は、代表的な材質の永久磁石の残留磁束密度の実測値を表している。図14に示すように、当該磁石では、特に高温になるほど磁石磁束密度と磁石温度との関係が線形ではなくなるが、3つ以上の三相短絡電流軌跡を用いることで、磁石磁束密度と磁石温度との関係の非線形性を補正することが可能となる。

[0088] 続いて、式(4)によって近似された三相短絡電流軌跡と、原点から三相短絡運転時のd軸電流およびq軸電流をプロットした点に伸ばした半直線との交点を求めるための演算内容について以下に記す。

磁石状態推定部8は、Newton-Raphson法による繰り返し計算によって演算を行う。具体的には、磁石状態推定部8は、下記の数式による演算を繰り返す。

[0089] [数7]

$$X \leftarrow X - \frac{i_{d,0}p(X) - i_{q,0}q(X)(sX + m)}{i_{d,0} \frac{dp}{dX} - i_{q,0} \left(sq(X) + \frac{dq}{dX} (sX + m) \right)} \quad (7)$$

[0090] [数8]

$$\begin{aligned} p(X) &= p_1 X^4 + p_2 X^3 + p_3 X^2 + p_4 X + p_5 \\ q(X) &= X^4 + q_1 X^3 + q_2 X^2 + q_3 X + q_4 \\ \frac{dp}{dX} &= 4p_1 X^3 + 3p_2 X^2 + 2p_3 X + p_4 \\ \frac{dq}{dX} &= 4X^3 + 3q_1 X^2 + 2q_2 X + q_3 \end{aligned} \quad (8)$$

[0091] ここで、式（7）中の記号は、式（8）で与えられ、 $i_{d,0}$ は三相短絡運転時の d 軸電流、 $i_{q,0}$ は三相短絡運転時の q 軸電流を示す。

[0092] 磁石状態推定部 8 は、 X の変化がほぼゼロになると、式（7）の繰り返し計算を終了させる。なお、前記の繰り返し計算の回数を 5 回と固定してもよい。

また、 X の初期値は、下記の数式で決定される。

[0093] [数9]

$$X = \begin{cases} \frac{i_{d,\min} - m}{s} & (i_{d,0} \leq i_{d,\min} \text{ のとき}) \\ \frac{i_{d,0} - m}{s} & (i_{d,\min} < i_{d,0} \leq 0 \text{ のとき}) \\ -\frac{m}{s} & (i_{d,0} > 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (9)$$

[0094] ここで、 $i_{d,\min}$ は三相短絡電流軌跡の中で最小となる d 軸電流を示す。

なお、三相短絡電流軌跡 71～76 を、実測に限らず、解析で求めてもよい。

[0095] したがって、本実施の形態に係る制御装置 1 は、予め設定された三相短絡電流軌跡 74 を用いて、三相短絡運転時の d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q 、並びに三相短絡電流軌跡に対応する d 軸電流 i_d 、q 軸電流 i_q および磁石磁束基準値 Φ_{PM} 、 B に基づいて、磁石状態として磁石磁束の磁石磁束推定値 Φ_{PM} を算出する。

すなわち、三相短絡運転時には、d 軸電流 i_d である d 軸特性、および q 軸電流 i_q である q 軸特性に基づいて、永久磁石式同期機 10 の永久磁石の磁石状態を推定する。

[0096] この構成によって、本実施の形態に係る制御装置 1 は、d 軸電流 i_d 、予め設定された d 軸インダクタンス L_d 、q 軸電流 i_q および予め設定された

q軸インダクタンス L_q に基づいて、磁石磁束推定値 Φ_{PM} を算出する実施の形態1の場合と同様の効果を奏する。

さらに、三相短絡電流軌跡の事前測定という比較的簡易な事前準備にもかかわらず、磁束変化の非線形性を考慮して磁石状態として磁石磁束を推定することができるため、実施の形態1よりも高精度に磁石磁束を推定することが可能となる。

[0097] また、本実施の形態に係る制御装置1は、予め設定された三相短絡電流軌跡75、76を用いて、三相短絡運転時のd軸電流 i_d およびq軸電流 i_q 、並びに三相短絡電流軌跡75、76に対応する磁石温度基準値 $T_{PM, B}$ 、 $T_{PM, C}$ に基づいて、磁石状態として磁石温度の磁石温度推定値 $T_{PM, A}$ を算出する。

[0098] この構成によっても、本実施の形態に係る制御装置1は、d軸電流 i_d 、q軸電流 i_q 、予め設定された三相短絡電流軌跡74、および三相短絡電流軌跡74に対応する磁石磁束基準値 $\Phi_{PM, B}$ を用いて、磁石状態として磁石磁束の磁石磁束推定値 Φ_{PM} を算出する前述の場合と同様の効果を奏する。

さらに、三相短絡電流軌跡の事前測定という比較的簡易な事前準備にもかかわらず、磁束変化の非線形性を考慮して磁石状態としての磁石温度を推定することができるため、実施の形態1よりも高精度に磁石温度を推定することが可能となる。

また、流す電流の大きさが同一であっても、磁石温度により永久磁石式同期機10のトルクや発電量が変動する。このトルクや発電量の変動を磁石温度推定値 $T_{PM, A}$ で補正することが可能となる。

符号の説明

[0099] 1 制御装置、2 電流制御器、3 dq/uvw 変換器、4 電圧出力器、5 電流検出器、6 uvw/dq 変換器、7 回転速度算出器、8 磁石状態推定部、10 永久磁石式同期機、11 回転角度検出器、12 加算減算器、41 ドライバ回路、42~47 スイッチング素子、49 P

WM回路、50 相短絡部、51-1 U相端子、51-2 V相端子、51-3 W相端子、52 電源、53 接続部分、54 GND、71~76 三相短絡電流軌跡、81 q軸磁束マップ、82 d軸磁束マップ、83 乗算除算器、84 減算器、85 温度推定マップ、86 スイッチ、100 プロセッサ、101 記憶装置、102 上位のコントローラ、200 同期機システム、S301 三相短絡ステップ、S302 検出ステップ、S303 磁石状態推定ステップ。

請求の範囲

- [請求項1] 永久磁石を有する永久磁石式同期機の三相端子を短絡させる相短絡部を備え、
- 前記相短絡部によって前記三相端子を短絡させて前記永久磁石式同期機を運転する三相短絡運転時には、d軸特性およびq軸特性に基づいて、前記永久磁石の磁石状態を推定する制御装置。
- [請求項2] 前記d軸特性は、d軸電流および予め設定されたd軸インダクタンスであり、
- 前記q軸特性は、q軸電流および予め設定されたq軸インダクタンスであり、
- 前記三相短絡運転時には、前記d軸特性および前記q軸特性に基づいて、前記磁石状態として磁石磁束の磁石磁束推定値を算出する請求項1に記載の制御装置。
- [請求項3] 前記d軸特性は、d軸電流およびd軸磁束であり、
- 前記q軸特性は、q軸電流およびq軸磁束であり、
- 前記三相短絡運転時には、前記d軸特性および前記q軸特性に基づいて、前記磁石状態として磁石磁束の磁石磁束推定値を算出する請求項1に記載の制御装置。
- [請求項4] 前記三相短絡運転時には、予め設定された基準磁石温度、前記基準磁石温度において予め設定された基準磁石磁束、および磁石温度の単位変化あたりにおいて予め設定された前記磁石磁束の変化率を用いて、前記磁石磁束推定値に基づいて、さらに前記磁石状態として前記磁石温度の磁石温度推定値を算出する請求項2または請求項3に記載の制御装置。
- [請求項5] 前記三相短絡運転時には、予め設定された温度推定マップを用いて、d軸電流、q軸電流および前記磁石磁束推定値に基づいて、さらに前記磁石状態として磁石温度の磁石温度推定値を算出する請求項2または請求項3に記載の制御装置。

[請求項6]

前記 d 軸特性は、d 軸電流であり、
前記 q 軸特性は、q 軸電流であり、
前記三相短絡運転時には、前記三相短絡運転時に前記永久磁石式同期機の回転速度を変化させた時の d 軸電流および q 軸電流の軌跡であって予め設定された三相短絡電流軌跡を用いて、前記三相短絡運転時の前記 d 軸特性および前記 q 軸特性、並びに前記三相短絡電流軌跡に対応する磁石磁束基準値に基づいて、前記磁石状態として磁石磁束の磁石磁束推定値を算出する請求項 1 に記載の制御装置。

[請求項7]

前記 d 軸特性は、d 軸電流であり、
前記 q 軸特性は、q 軸電流であり、
前記三相短絡運転時には、前記三相短絡運転時に前記永久磁石式同期機の回転速度を変化させた時の d 軸電流および q 軸電流の軌跡であって予め設定された三相短絡電流軌跡を用いて、前記三相短絡運転時の前記 d 軸特性および前記 q 軸特性、並びに前記三相短絡電流軌跡に対応する磁石温度基準値に基づいて、前記磁石状態として磁石温度の磁石温度推定値を算出する請求項 1 に記載の制御装置。

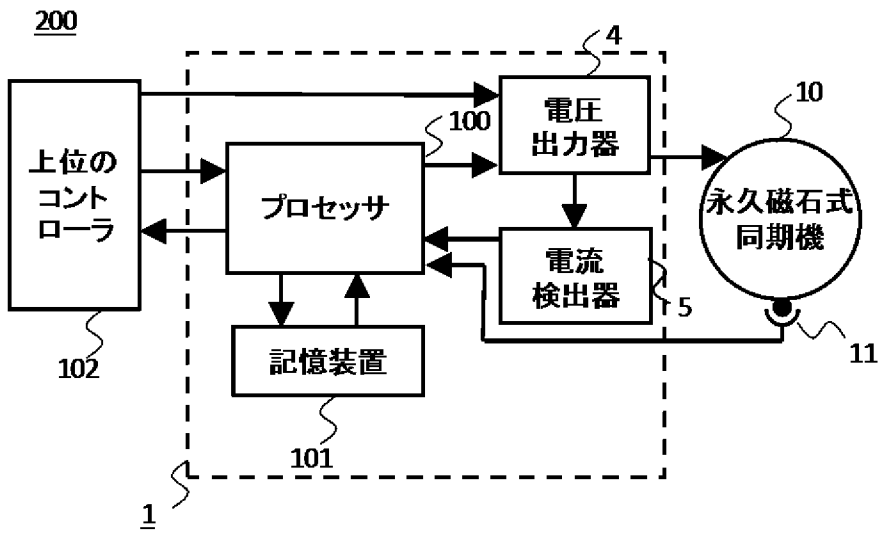
[請求項8]

永久磁石を有する永久磁石式同期機の運転中において前記永久磁石式同期機の三相端子を短絡させる三相短絡ステップと、
前記三相短絡ステップで前記三相端子が短絡された場合に、前記永久磁石式同期機の d 軸特性および q 軸特性を検出する検出ステップと、
前記検出ステップで検出された前記 d 軸特性および前記 q 軸特性に基づいて、前記永久磁石の磁石状態を推定する磁石状態推定ステップとをプロセッサが実行する制御方法。

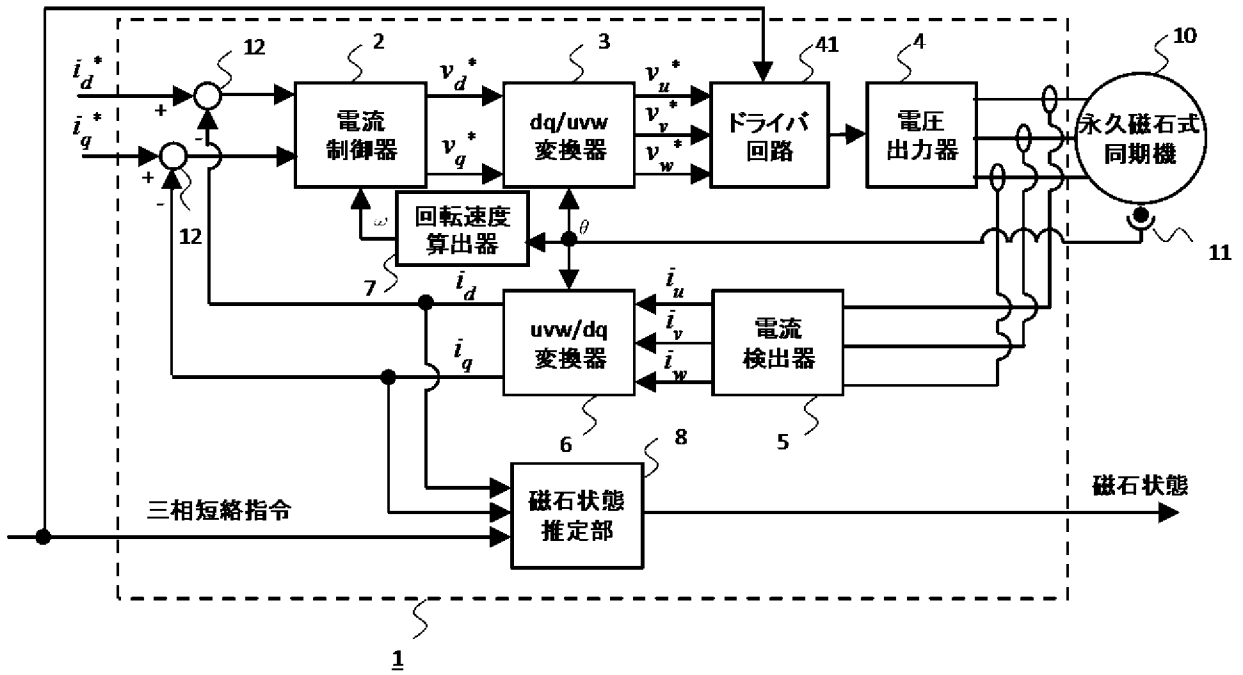
[請求項9]

前記検出ステップでは、
前記 d 軸特性として d 軸電流を検出し、
前記 q 軸特性として q 軸電流を検出する請求項 8 に記載の制御方法。

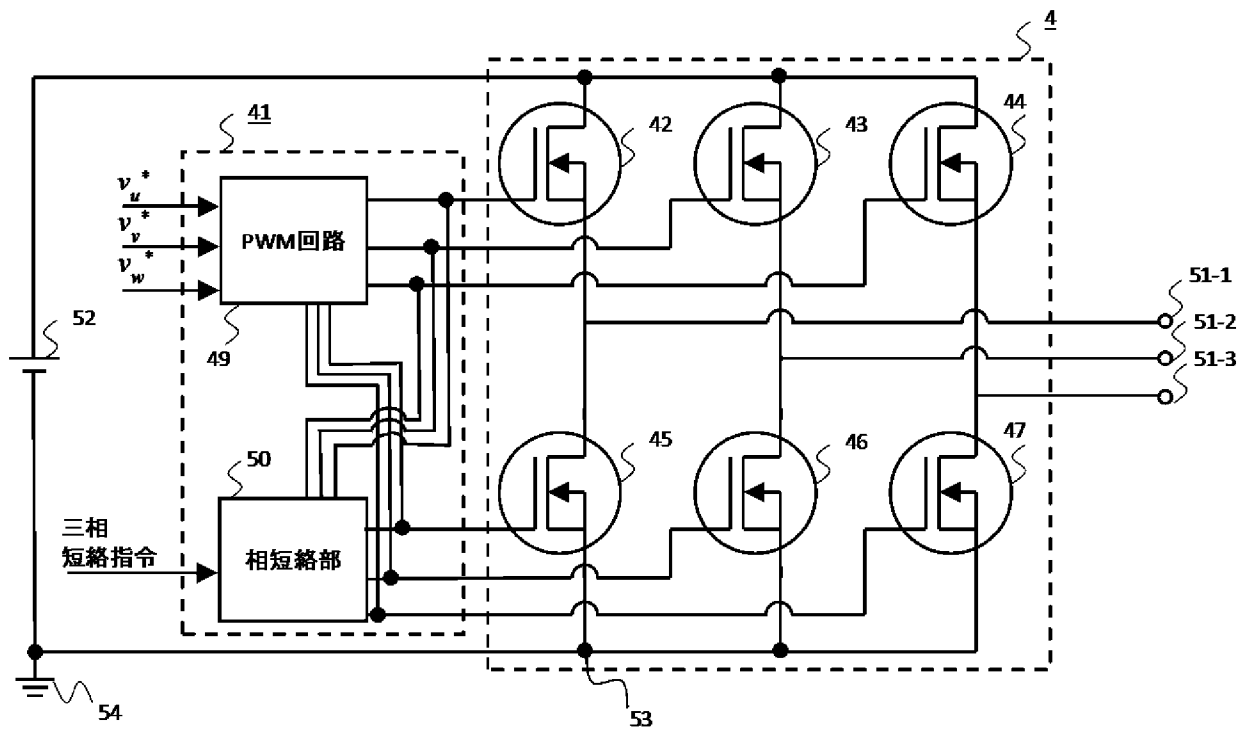
[図1]



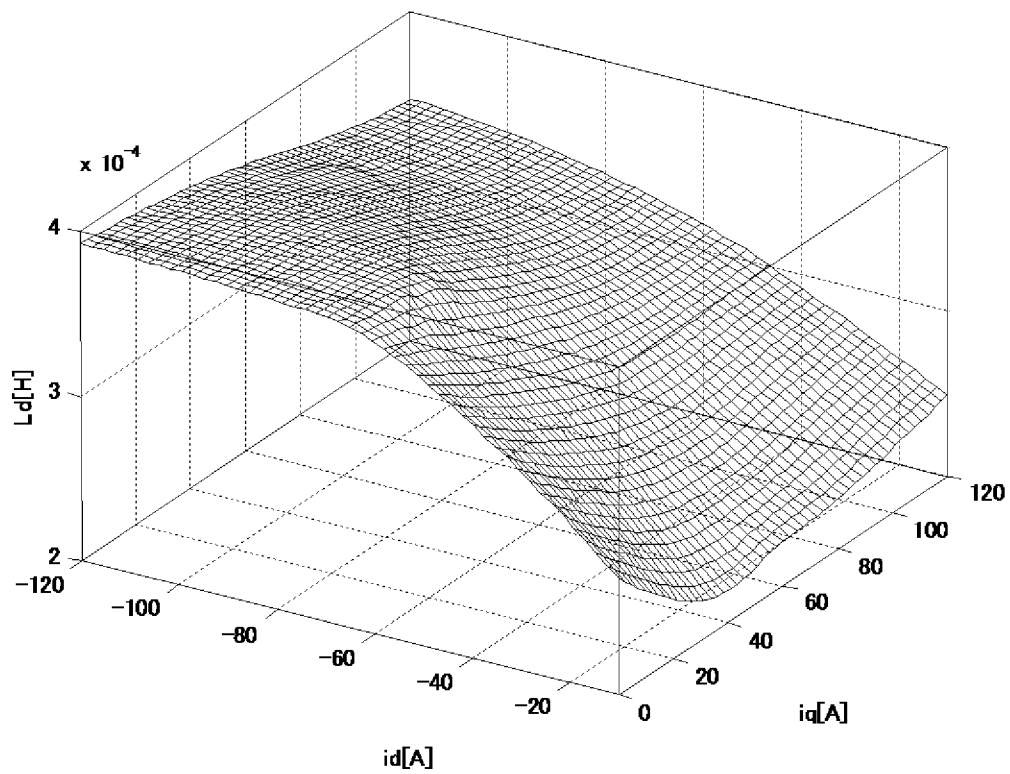
[図2]



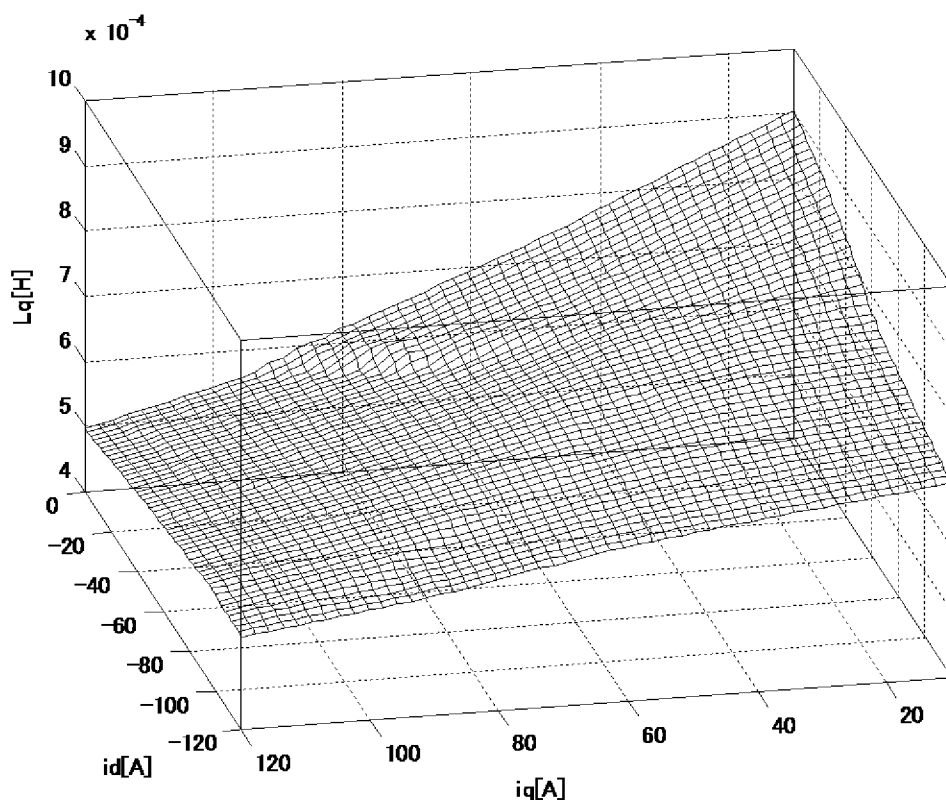
[図3]



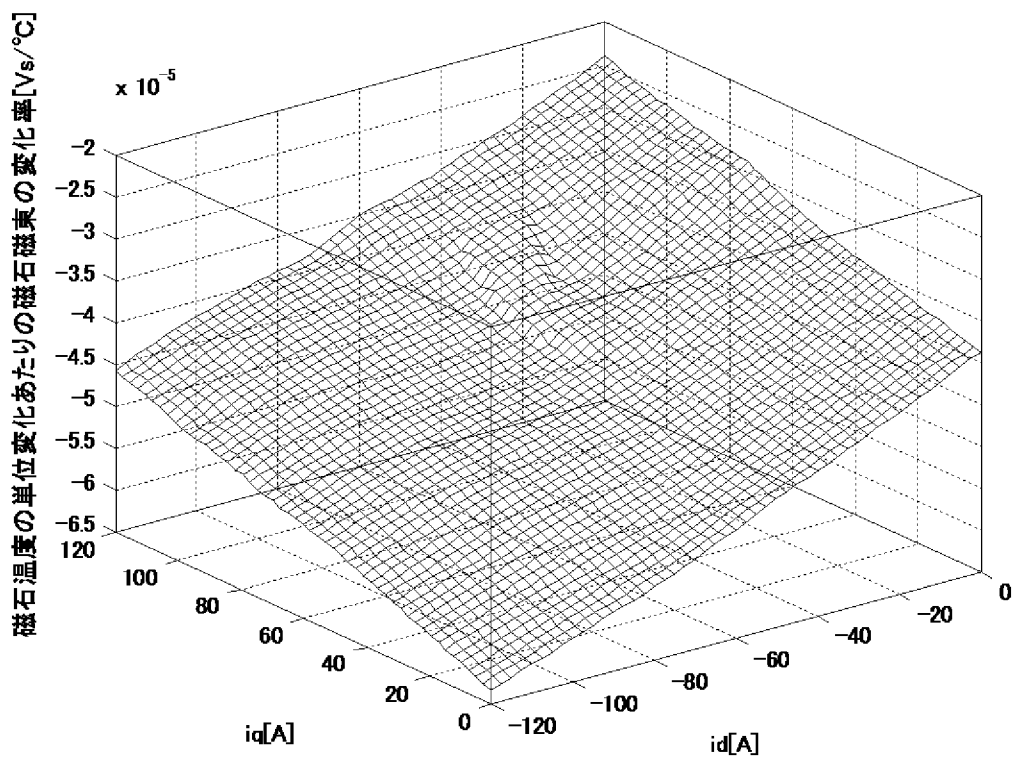
[図4]



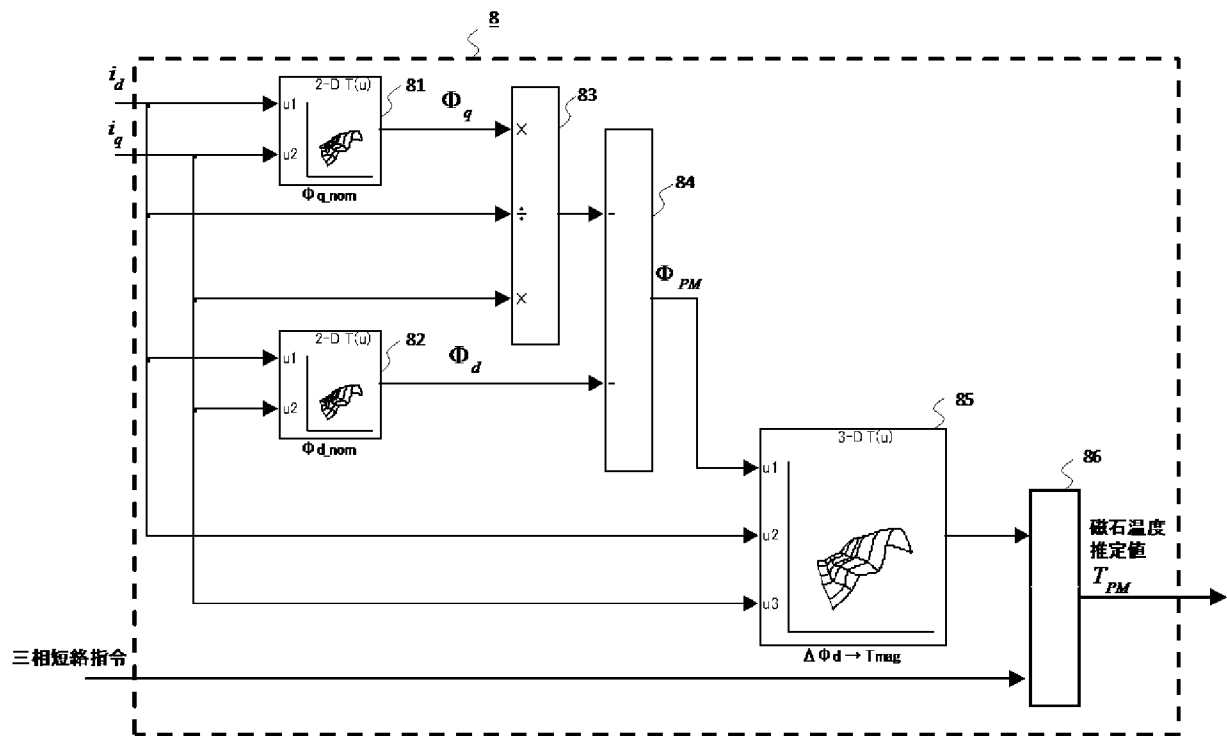
[図5]



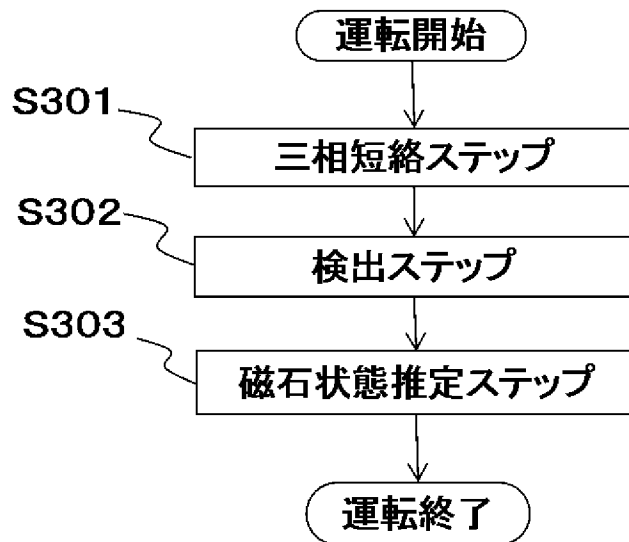
[図6]



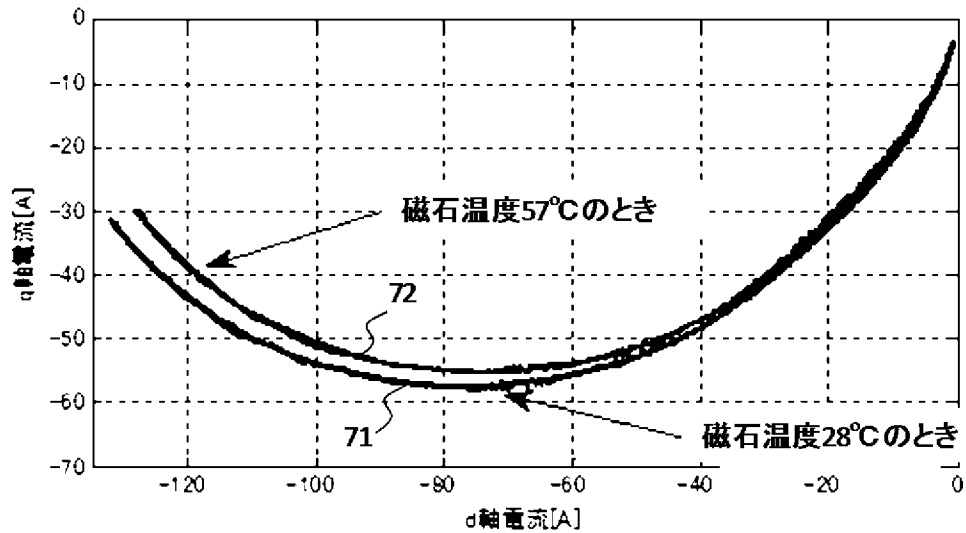
[図7]



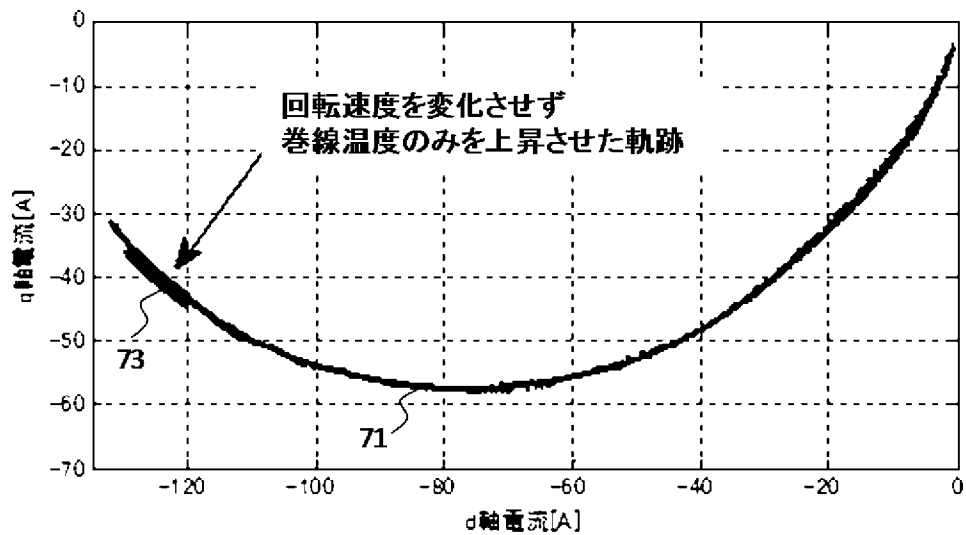
[図8]



[図9]



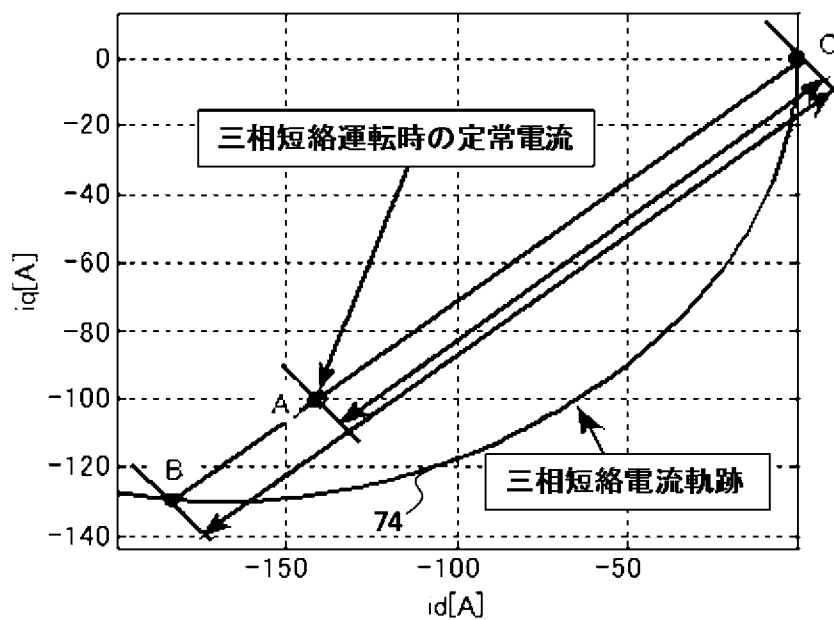
[図10]



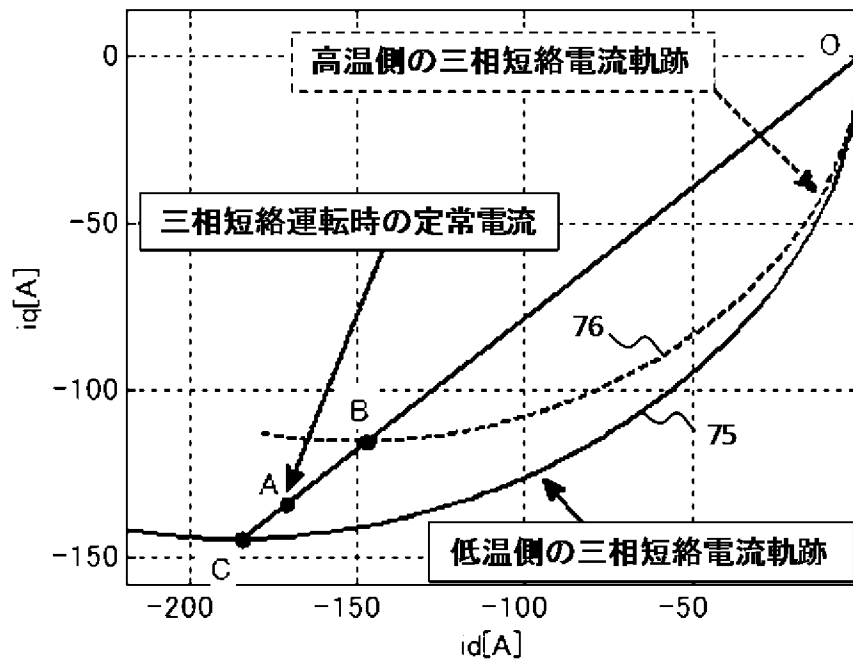
[図11]

パラメータ	高温側	低温側
p1	-188350.2	-187175.9
p2	-201161.1	-187171.5
p3	3325108	3265031
p4	-1270094	-1268368
p5	-7084064	-6972777
q1	5362.512	5100.131
q2	-35798.01	-34158.52
q3	682.2378	1363.559
q4	133437.8	126228.9
m	-91.87234	-94.63623
s	38.03945	39.29553

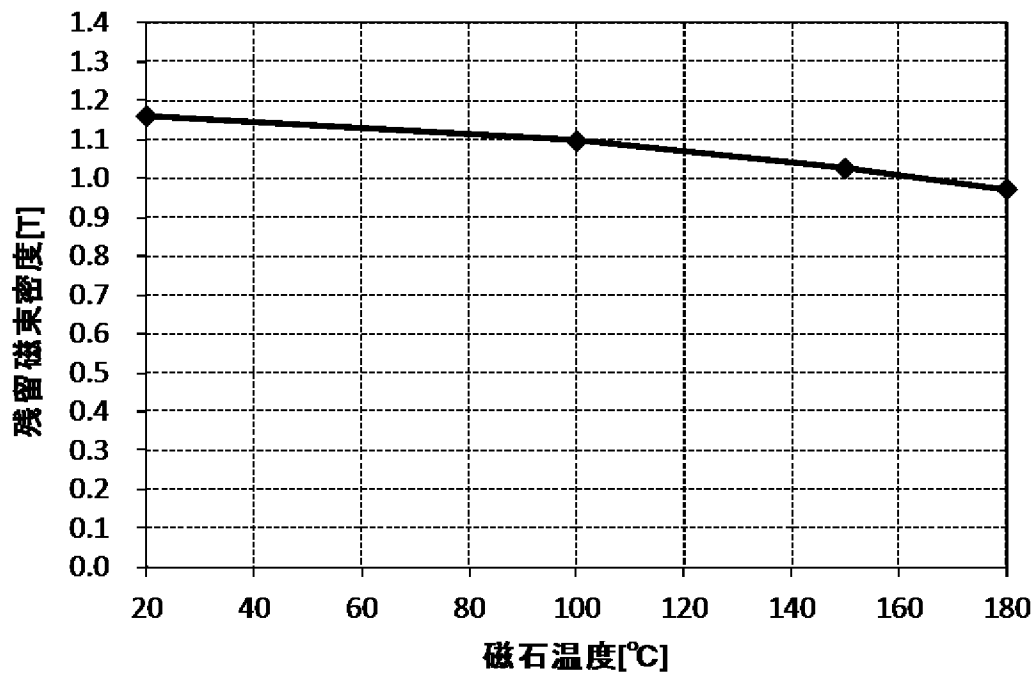
[図12]



[図13]



[図14]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2015/073979

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
H02P21/00(2006.01)i, H02P6/16(2006.01)i, H02P27/04(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
H02P21/00, H02P6/16, H02P27/04

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2006-280141 A (Honda Motor Co., Ltd.), 12 October 2006 (12.10.2006), paragraphs [0004] to [0024], [0048] to [0053]; fig. 1 (Family: none)	1-5, 8-9 6-7
Y A	JP 2010-268566 A (Nissan Motor Co., Ltd.), 25 November 2010 (25.11.2010), paragraph [0055]; fig. 2 (Family: none)	1-5, 8-9 6-7
Y A	WO 2013/108877 A1 (Mitsubishi Electric Corp.), 25 July 2013 (25.07.2013), paragraph [0069] & US 2014/0354204 A1 paragraph [0081] & DE 112013000640 T5 & CN 104081652 A	5 6-7

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 30 October 2015 (30.10.15)	Date of mailing of the international search report 10 November 2015 (10.11.15)
---	---

Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer Telephone No.
--	---

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H02P21/00(2006.01)i, H02P6/16(2006.01)i, H02P27/04(2006.01)i										
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H02P21/00, H02P6/16, H02P27/04										
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2015年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2015年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2015年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2015年	日本国実用新案登録公報	1996-2015年	日本国登録実用新案公報	1994-2015年
日本国実用新案公報	1922-1996年									
日本国公開実用新案公報	1971-2015年									
日本国実用新案登録公報	1996-2015年									
日本国登録実用新案公報	1994-2015年									
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)										
C. 関連すると認められる文献										
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号								
Y A	JP 2006-280141 A (本田技研工業株式会社) 2006. 10. 12, 段落 [0004] - [0024]、[0048] - [0053]、[図1] (ファミリーなし)	1-5, 8-9 6-7								
Y A	JP 2010-268566 A (日産自動車株式会社) 2010. 11. 25, 段落 [0055]、[図2] (ファミリーなし)	1-5, 8-9 6-7								
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。										
* 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献										
国際調査を完了した日 30. 10. 2015	国際調査報告の発送日 10. 11. 2015									
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 宮崎 基樹 電話番号 03-3581-1101 内線 3357	3V 5561								

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	WO 2013/108877 A1 (三菱電機株式会社) 2013.07.25, 段落 [0069] & US 2014/0354204 A1, 段落 [0081] & DE 112013000640 T5 & CN 104081652 A	5 6-7