

(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
2014 年 4 月 3 日(03.04.2014)



(10) 国際公開番号
WO 2014/050283 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/JP2013/070271
- (22) 国際出願日: 2013 年 7 月 26 日(26.07.2013)
- (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 2012-210973 2012 年 9 月 25 日(25.09.2012) JP
- (71) 出願人: 日立オートモティブシステムズ株式会社 (HITACHI AUTOMOTIVE SYSTEMS, LTD.)
[JP/JP]; 〒3128503 茨城県ひたちなか市高場 2 5 2 0 番地 Ibaraki (JP).
- (72) 発明者: 星野 勝洋(HOSHINO Katsuhiko); 〒3128503 茨城県ひたちなか市高場 2 5 2 0 番地
日立オートモティブシステムズ株式会社内 Ibaraki (JP). 宮崎 英樹(MIYAZAKI Hideki); 〒3128503 茨城県ひたちなか市高場 2 5 2 0 番地
日立オートモティブシステムズ株式会社内 Ibaraki (JP). 大山 和人(OYAMA Kazuto); 〒3128503 茨城県ひたちなか市高場 2 5 2 0 番地 日立

オートモティブシステムズ株式会社内 Ibaraki (JP). 西口 慎吾(NISHIGUCHI Shingo); 〒3128503 茨城県ひたちなか市高場 2 5 2 0 番地 日立オートモティブシステムズ株式会社内 Ibaraki (JP).

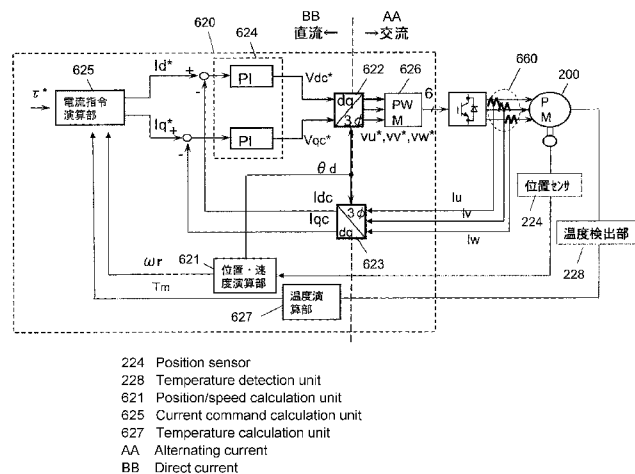
- (74) 代理人: 井上 学, 外(INOUE Manabu et al.); 〒1008220 東京都千代田区丸の内一丁目 6 番 1 号 株式会社日立製作所内 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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, 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, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ

[続葉有]

(54) Title: DRIVE CONTROL DEVICE FOR ROTARY ELECTRIC MACHINE AND ELECTRIC VEHICLE DRIVE SYSTEM

(54) 発明の名称: 回転電機の駆動制御装置および電動車両駆動システム

【図8】



224 Position sensor
228 Temperature detection unit
621 Position/speed calculation unit
625 Current command calculation unit
627 Temperature calculation unit
AA Alternating current
BB Direct current

(57) Abstract: In order to provide a drive control device for a rotary electric machine that is capable of causing the rotary electric machine to generate a torque faithful to a torque command irrespective of the magnet temperature of permanent magnets provided on a rotor, the drive control device (600) performs vector control for currents in the rotary electric machine (200), which has the permanent magnets on the rotor, on the basis of a torque command (τ^*) from a vehicle controller in order to drive the rotary electric machine (200), which utilizes a battery (180) as a power source, and cause the rotary electric machine (200) to perform regenerative charging of the battery (180). The drive control device (600) is equipped with a temperature calculation unit (627) that calculates a magnet temperature (T_m) on the basis of a value detected by a temperature detection unit (228) and a current command calculation unit (625) that generates different current command values (I_d^* , I_q^*) corresponding to the magnet temperature (T_m) in response to the same torque command (τ^*) such that the torque (τ) of the rotary electric machine (200) matches the torque command (τ^*).

(57) 要約:

[続葉有]



WO 2014/050283 A1



(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

回転子に設けられた永久磁石の磁石温度によらず、トルク指令値通りのトルクを回転電機に発生させることができる、回転電機の駆動制御装置の提供するために、駆動制御装置 600 は、回転子に永久磁石が設けられた回転電機 200 の電流を車両コントローラからのトルク指令値 τ^* に基づいてベクトル制御し、バッテリー 180 を電源とする回転電機 200 の駆動および回転電機 200 によるバッテリー 180 の回生充電を行う。そして、駆動制御装置 600 は、温度検出部 228 の検出値に基づいて磁石温度 T_m を算出する温度演算部 627 と、回転電機 200 のトルク τ がトルク指令値 τ^* と一致するように、同一トルク指令値 τ^* に対して磁石温度 T_m に応じた異なる電流指令値 I_d^*, I_q^* を生成する電流指令演算部 625 と、を備える。

明 細 書

発明の名称：

回転電機の駆動制御装置および電動車両駆動システム

技術分野

[0001] 本発明は、回転電機の駆動制御装置、およびその駆動制御装置を備える電動車両駆動システムに関する。

背景技術

[0002] 電気自動車（EV）やハイブリッド自動車（HEV）に用いられる駆動用回転電機（モータ）には大出力および高トルク応答が求められるため、強力なエネルギーを保持する希土類の焼結磁石を用いた永久磁石式回転電機（PMモータ）を3相インバータで駆動する方式が一般に用いられている。駆動用モータには、永久磁石モータの内でも、低速大トルク、かつ、広範囲な回転速度領域という要求を満たすことができる埋込み磁石式モータ（IPM）が利用されている。

[0003] 駆動用主機となるモータにおいて、特に、電気自動車での使用を考えた場合、市街地走行ではモータ動作点は比較的、小さい負荷点に集中し、追越や合流時の加速および高速道路の走行では高回転側で高出力が必要となり、さらに勾配の急な登坂では低速で大トルクが必要となる。このように電気自動車用のモータでは走行状態に応じてモータ動作点は頻繁に変化し、モータの発熱量も変化するため、モータは温度変化を続ける。モータ温度が変化すると永久磁石の磁束の変化が起りモータのトルクと機械出力が変化する。

[0004] このようなモータ温度変化による永久磁石の不可逆減磁を防止するために、PMモータの永久磁石の温度を検出し、永久磁石が高温の場合に電流を小さくする手法が提案されている（例えば、特許文献1参照）。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開2004-222387号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0006] しかしながら、従来のモータ駆動の方法では、モータのトルク制御を行う電流指令値は、モータ温度によらず各動作点で一意的に決まっていた。そのため、モータに入っている永久磁石の温度が基準値よりも低ければ出力トルクは設計値よりも大きくなり、また、永久磁石の温度が基準値よりも高ければ出力トルクは小さくなる。そのため、トルクの増減に伴って機械出力も必要な値とならず、必要量よりも多かったり、少なかったりする。

課題を解決するための手段

- [0007] 請求項 1 の発明は、回転子に永久磁石が設けられた回転電機の電流をトルク指令値に基づいてベクトル制御し、バッテリーを電源とする回転電機の駆動および回転電機によるバッテリーの回生充電を行う回転電機駆動制御装置において、回転電機に設けられた温度検出部の検出信号に基づいて、永久磁石の温度を算出する温度演算部と、回転電機のトルクがトルク指令値と一致するように、同一トルク指令値に対して磁石温度に応じた異なる電流指令値を生成する電流指令演算部と、を備えることを特徴とする。

請求項 7 の発明は、回転子に永久磁石が設けられた回転電機と、請求項 4 に記載の回転電機駆動制御装置と、油圧ブレーキ制御装置と、油圧ブレーキ力および回生ブレーキ力を用いた回生協調ブレーキ動作時の油圧ブレーキ指令値およびトルク指令値を演算する上位制御装置と、を備える電動車両駆動システムにおいて、車両制御部は、磁石温度が所定温度よりも低い低温時には、トルク限界値を回生協調ブレーキ動作時のトルク指令値として電流指令演算部に出力することを特徴とする。

発明の効果

- [0008] 本発明によれば、回転子に設けられた永久磁石の磁石温度によらず、トルク指令値通りのトルクを回転電機に発生させることができる。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]図1は、本実施の形態の駆動制御装置600を搭載したハイブリッド型電気自動車（HEV）の概略構成を示す図である。

[図2]図2は、HEV車両の各種走行モードにおけるモータ使用頻度分布（車両動作点）の一例を示す図である。

[図3]図3は、EVやHEV等の電動車両駆動用の回転電機200として用いられるPMモータの一例を示す図である。

[図4]図4は、固定子230および回転子250の断面を示す図である。

[図5]図5は、図4に示した断面図の一部を拡大して示したものである。

[図6]図5は、リラクタンストルクの発生原理を説明する図である。

[図7]図7は、駆動制御装置600の回路構成の概略を示す図である。

[図8]図8は、モータコントローラ620で行われるベクトル制御を説明する制御ブロック図である。

[図9]図9は、ネオジウム磁石の温度変化による特性変化を説明する図である。

[図10]図10は、永久磁石の温度変化により生じる誘起電圧の変化を示す図である。

[図11]図11は、永久磁石の温度変化により生じるモータ出力トルクの変化を示す図である。

[図12]図12は、永久磁石の温度変化により生じる、最大電流におけるモータ出力特性の変化を示す図である。

[図13]図13は、トルク指令値 τ^* と実際に発生するトルク値 τ との関係を示す図である。

[図14]図14は、第1の補正方法を説明する図である。

[図15]図15は、電流マップの一例を示す図である。

[図16]図16は、電流マップ6252～6254の同一の動作点（ τ^* 、 ω_r ）に格納される電流指令値を説明する図である。

[図17]図17は、図16のラインTm0、TmH、TmLを $\tau^*-\tau$ 座標上に表示した図である。

[図18]図18は、磁石温度 T_{m0} 、 T_{mh} 、 T_{ml} における回生トルク指令値 τ^* と実際のモータ回生トルク τ との関係を示す図である。

[図19]図19は、補正後の回生トルク指令値 τ^* と実際の回生トルク値 τ との関係を示す図である。

[図20]図20は、回生協調ブレーキ動作時における、回生ブレーキ分と油圧ブレーキ分との間の制動力分配の一例を示したものである。

[図21]図21は、回生協調ブレーキ動作の手順を示す図である。

[図22]図22は、磁石温度が所定温度 T_{m0} から高温 T_{mh} に変化した場合を説明する図である。

[図23]図23は、磁石温度が所定温度 T_{m0} から低温 T_{ml} に変化した場合を説明する図である。

発明を実施するための形態

[0010] 以下、図を参照して本発明を実施するための形態について説明する。図1は、本実施の形態の駆動制御装置600を搭載したハイブリッド型電気自動車(HEV)の概略構成を示す図である。車両の前部には、エンジン120およびエンジン120と同軸に接続された回転電機200が搭載されている。変速機130とデファレンシャルギア132を介して、エンジン120および回転電機200の駆動力により後輪110が駆動される。なお、図1のHEV100はいわゆるFRタイプであるが、本発明は、前輪を駆動するFFタイプであっても適用できる。

[0011] 車両にはバッテリー180が搭載されており、回転電機200による駆動力が必要な場合には、回転電機200の駆動装置600にバッテリー180から直流電力が供給され、駆動装置600は回転電機200に3相交流電力を供給する。HEV100の回生走行時には、回転電機200が発電した3相交流電力を電力変換装置600で直流電力に変換し、その直流電力をバッテリー180に供給してバッテリー180を充電する。バッテリー制御部710は、バッテリー180の制御や監視を行う。車両コントローラ700は車両全体の制御を行うものである。駆動装置600およびバッテリー制御部710は車両コ

ントローラ 700 の指令により動作する。

[0012] 高電圧のバッテリー 180 は、リチウムイオン電池あるいはニッケル水素電池などの 2 次電池が複数個直並列に接続されて構成される。高電圧の直流電力が、バッテリー 180 から駆動装置 600 に供給される。車両の走行時における回転電機 200 は、力行運転と回生運転を繰返している。

[0013] 図 2 は、EV 車両の JC08、LA4、EUDC などの走行モードでのモータ使用頻度分布（車両動作点）の例を N-T マップ上で示した図である。モータトルクが正の領域では力行運転が行われ、モータトルクが負の部分では回生運転が行われる。モータのトルクは、通常は図 2 に示す実線部分で囲まれた領域で出力可能であり、したがって、JC08、LA4、EUDC などの走行モードでの動作は、図 2 上に示される各モードの動作点の例のように行われる。

[0014] 図 3 は、EV や HEV 等の電動車両駆動用の回転電機 200 として用いられる PM モータの一例を示す図である。図 3 に示す回転電機 200 は、12 極の回転子と 72 スロットの分布巻き固定子とを備えている。回転電機 200 のハウジング 212 の内部には、固定子 230 が保持されている。固定子 230 は、固定子鉄心 232 と固定子巻線 238 とを備えている。固定子鉄心 232 の内側には、回転子 250 が空隙 222 を介して回転可能に保持されている。回転子 250 は、回転子鉄心 252 と永久磁石 254 と非磁性体のあて板 226 を備えており、シャフト 218 に固定されている。ハウジング 212 は軸受 216 が設けられた一対のエンドブラケット 214 を有しており、シャフト 218 はこれらの軸受 216 により回転自在に保持されている。

[0015] シャフト 218 には、回転子 250 の極の位置や回転速度を検出する回転センサ（レゾルバ）224 が設けられている。この回転センサ 224 からの出力は、後述するモータコントローラ 620 に取り込まれる。

[0016] 図 4 は、固定子 230 および回転子 250 の断面を示す図である。また、図 5 は、図 4 に示した断面図の一部を拡大して示したものである。固定子鉄

心 2 3 2 の内周側には、多数のスロット 2 4 0 とティース 2 3 6 とが全周に渡って均等に配置されている。なお、図 4 では、スロットおよびティースの全てに符号を付すことはせず、代表して一部のティースとスロットにのみに符号を付した。また、図示は省略したが、スロット 2 4 0 内には、固定子巻線 2 3 8 と、その固定子巻線 2 3 8 と固定子鉄心 2 3 2 とを絶縁するスロット絶縁材とが設けられている。

[0017] 図 4 に示す例では、固定子巻線 2 3 8 を構成する u 相、v 相、w 相の複数の相巻線が複数のスロットに分布して装着される分布巻を採用している。分布巻とは、複数のスロット 2 4 0 を跨いで離間した 2 つのスロットに相巻線が収納されるように、相巻線が固定子鉄心 2 3 2 に巻かれる巻線方式である。分布巻では、固定子で生成される各相の磁束分布は正弦波状に近く、リラクタンストルクを得やすい。そのため、弱め界磁制御やリラクタンストルクを活用して、低回転速度だけでなく高回転速度までの広い回転数範囲についての制御が可能であり、電気自動車などのモータ特性を得るのに適している。

[0018] もちろん、集中巻を採用しても良く、本発明は、固定子巻線 2 3 8 の巻き方によらず同様の効果を奏する。なお、通常、集中巻の場合は、固定子のスロット数は図 4 に示すスロット数より少ない。

[0019] 回転子鉄心 2 5 2 のコア 3 0 1 には、磁石挿入孔 3 1 0 が複数形成されている。各磁石挿入孔 3 1 0 には、矩形の永久磁石 2 5 4 (2 5 4 a, 2 5 4 b) が埋め込まれ接着剤などで固定されている。永久磁石 2 5 4 a, 2 5 4 b は回転子 2 5 0 の界磁極として作用するものであり、着磁方向の異なる永久磁石 2 5 4 a, 2 5 4 b が周方向に交互に配置されている。磁石挿入孔 3 1 0 の円周方向の幅は、永久磁石 2 5 4 a, 2 5 4 b の円周方向の幅よりも大きく設定されており、永久磁石 2 5 4 a, 2 5 4 b の両側には磁気的空隙 2 5 7 が形成されている。この磁気的空隙 2 5 7 は接着剤を埋め込んでも良いし、成形樹脂で永久磁石 2 5 4 a, 2 5 4 b と一体に固めても良い。磁気的空隙 2 5 7 は、コギングトルク低減のために設けられたものである。

[0020] 3相交流電流により回転磁界が固定子230に発生すると、この回転磁界が回転子250の永久磁石254a, 254bに作用して磁石トルクが生じる。さらに、回転子250には、この磁石トルクに加えてリラクタンストルクが作用する。なお、回転電機200は、図4, 5において、どちらの回転方向にも回転可能である。しかし、説明の都合上、以下では回転子250あるいは回転子鉄心252はこれらの図で反時計回りに回転するものとする。以下では、図3, 4に示したPMモータを例に、本発明による駆動制御装置600の動作について説明する。

[0021] 図6は、リラクタンストルクの発生原理を説明する図である。一般に、磁束が磁石中心を通る軸をd軸、磁束が磁石の極間から極間へ流れる軸をq軸と呼ぶ。このとき、磁石の極間中心にある鉄心部分を補助突極部259と呼ぶ。回転子250に設けられた永久磁石254の透磁率は空気とほぼ同じであるため、固定子側から見た場合、d軸部は磁氣的に凹んでおり、抵抗が大きく、q軸部は磁氣的に凸になっており、抵抗が小さい。そのため、q軸部の鉄心部分は突極と呼ばれる。リラクタンストルクは、このd軸とq軸の磁束の通り易さの差、すなわち、磁気抵抗の差によって生じる。

[0022] 図7は、駆動制御装置600の回路構成の概略を示す図であり、バッテリー180、駆動制御装置600および回転電機200を示した。駆動制御装置600は、回転電機200を駆動するためのインバータ610と、インバータ610を駆動制御するドライバ650と、ドライバ650を制御するモータコントローラ620と、平滑コンデンサ615とを備えている。

[0023] インバータ610はパワーモジュール610a, 610b, 610cで構成されている。パワーモジュール610a~610cは、それぞれ3相の交流出力の各相U, V, Wの電流を出力する。パワーモジュール610a~610cは、それぞれパワー半導体素子611a, 611bで構成されている。本実施の形態では、パワー半導体素子611a, 611bとしてIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を使用しているが、必要な周波数や電圧に応じて他のパワー半導体素子 (例えばMOS-FETなど) を用いて

もよい。

[0024] 図7に示す例では、各パワーモジュール610a～610cは、正極側（上アーム側）にIGBT611aとフリーホイリングダイオード612aを備え、負極側（下アーム側）にIGBT611bとフリーホイリングダイオード612bを備えている。なお、パワー半導体素子611a、611bには同じパワー半導体素子が用いられており、パワー半導体素子611と総称する。また、フリーホイリングダイオード612a、612bもフリーホイリングダイオード612と総称する。

[0025] 駆動制御装置600において、ドライバ650は、モータコントローラ620からの制御信号に基づき駆動制御され、パワーモジュール610a～610cのそれぞれのパワー半導体素子611a、611bのスイッチング動作を制御する。バッテリー180からの直流電力は、駆動制御装置600のインバータ610を構成するパワーモジュール610a～610cの、それぞれの正極側および負極側の直流端子に供給される。駆動制御装置600は、パワー半導体素子611のスイッチング動作を制御することにより、供給された直流電力を3相交流電力に変換し回転電機200に供給する。このようなパワー半導体素子611のスイッチング動作により、回転電機200に3相交流電流が供給されて、回転電機200は電動機として駆動される。

[0026] 一方、車両の回生動作時には、回転電機200は発電機として運転される。このとき、回転電機200の回転子が外部から加えられる回転トルクで回転駆動され、回転電機200の固定子巻線から3相交流電力が出力される。出力された3相交流電流は、パワー半導体素子611a、611bおよびフリーホイリングダイオード612a、612bの動作によって直流に変換されて、バッテリー180に供給されてバッテリー180が充電される。

[0027] バッテリー180とインバータ610の間には、平滑コンデンサ615がバッテリー180と並列に接続されている。パワー半導体素子611a、611bのスイッチング動作により発生する直流電圧の脈動（リップル）は、この平滑コンデンサ615により平滑される。

[0028] ドライバ650は対応するインバータ装置610を制御するための駆動部を構成している。ドライバ650は、制御部として動作するモータコントローラ620から出力された制御信号（PWM信号）に基づいて、パワー半導体素子611a、611bを動作（オン・オフ）させるためのゲート駆動信号を発生する。図示は省略するが、ドライバ650には、各相の各上下アームのゲートに供給する駆動信号を発生する集積回路が6個設けられている。これらの集積回路からは、各パワーモジュール610a～610cのそれぞれのパワー半導体素子611のゲートを駆動するゲート信号が出力される。

[0029] ドライバ650を制御するためのPWM信号は、モータコントローラ620に備えられたマイクロコンピュータ（不図示）での演算によって生成される。モータコントローラ620には、不図示の上位制御装置からのトルク指令信号（トルク指令値 τ^* ）、電流センサ660のセンサ出力、回転電機200に搭載された回転センサ（レゾルバ）224のセンサ出力が入力される。モータコントローラ620はトルク指令値および各センサ出力に基づいて制御値を演算し、ドライバ650にゲート駆動信号を生成するためのPWM信号を出力する。

[0030] 各パワーモジュール610a～610cのそれぞれのパワー半導体素子611は、ゲート信号に基づきスイッチング動作を行い、バッテリー180から供給される直流電力を3相交流電力に変換する。この3相交流電力は固定子巻線238に供給され、回転磁界が固定子230に発生する。3相交流電流の周波数はレゾルバ224の検出値に基づいて制御され、3相交流電流の回転子250に対する位相も同じくレゾルバ224の検出値に基づいて制御される。

[0031] 図8は、モータコントローラ620で行われるベクトル制御を説明する制御ブロック図である。モータコントローラ620には、レゾルバ224の検出値および温度検出部228の検出値（熱電対等の温度センサを磁石に付けて検出、印加電圧と電流から推定、他の部分の温度から推定、など）が入力される。温度演算部627は、温度検出部228の検出値から磁石温度 T_m を

算出する。温度検出部 228 は、回転電機 200 の回転子 250（図 4 参照）に設けられた永久磁石 254 の温度を直接または間接的に検出する手段であって、例えば、回転電機 200 の固定子鉄心 232 や固定子巻線 238 の温度を検出するための温度センサで検出された温度を、間接的に検出された磁石温度として利用する。例えば、固定子鉄心 232 や固定子巻線 238 の温度と磁石温度との関係を実測により求めておき、温度センサで検出された温度とその相関関係とから、磁石温度を推定する。

[0032] モータコントローラ 620 の位置速度演算部 621 は、レゾルバ 224 の検出値に基づいて回転電機 200 の回転子（不図示）の磁極位置 θ_d および角速度 ω_r を算出する。磁極位置 θ_d は、 dq 軸（2 相）系から UVW （3 相）系へ変換する 2 相－3 相変換部 622、および UVW （3 相）系から dq 軸（2 相）系へ変換する 3 相－2 相変換部 623 にそれぞれ入力され、それぞれにおける変換計算に用いられる。3 相－2 相変換部 623 では、位置速度演算部 621 から入力された磁極位置 θ_d に基づいて、電流センサ 660 から入力された電流値 I_u 、 I_v 、 I_w を dq 軸電流 I_{dc} 、 I_{qc} に変換する。変換された dq 軸電流 I_{dc} 、 I_{qc} は、電流制御部 624 に入力される前の d 軸電流指令 I_d^* 、 q 軸電流指令 I_q^* にフィードバック（負帰還）される。

[0033] 電流指令演算部 625 では、回転電機 200 への d 軸電流指令 I_d^* 、 q 軸電流指令 I_q^* を演算される。従来、 d 軸電流指令 I_d^* 、 q 軸電流指令 I_q^* は、位置速度演算部 621 から入力された角速度 ω_r および上位制御装置から入力されるトルク指令 τ^* に基づいて演算される。しかし、本実施の形態では、後述するように、トルク指令 τ^* および角速度 ω_r に加えて磁石温度 T_m も考慮して d 軸電流指令 I_d^* 、 q 軸電流指令 I_q^* の演算が行われる。

[0034] 電流指令演算部 625 から出力された d 軸電流指令 I_d^* 、 q 軸電流指令 I_q^* は、上述したように dq 軸電流 I_{dc} 、 I_{qc} がフィードバック（負帰還）された後、電流制御部 624 に入力される。電流制御部 624 は、入力された dq 軸電流指令を、電圧指令値（ d 軸電圧指令 V_{dc}^* 、 q 軸電圧指令 V

q c*) に変換し、それらを 2 相－3 相変換部 6 2 2 に出力する。2 相－3 相変換部 6 2 2 は、磁極位置 θ_d に基づいて、d 軸電圧指令 V_{dc}^* 、q 軸電圧指令 V_{qc}^* を 3 相電圧指令 V_u^* 、 V_v^* 、 V_w^* に変換する。ゲート制御信号演算部 6 2 6 は、その 3 相電圧指令 V_u^* 、 V_v^* 、 V_w^* に基づいて、インバータ 6 1 0 に設けられたパワー半導体素子 6 1 1 を導通または遮断するための制御信号を生成する。

[0035] このように、ベクトル制御は、検出された各相のコイル電流のフィードバックを行うことにより、同一トルクで同一回転数という条件である場合、回転子の磁極位置に対して、電流が作る磁束の位置を一定にするような制御を行う手法であり、基本的にトルク制御を行う固定子コイルの各相の電流波形の時間変化は正弦波となる。

[0036] ところで、希土類であるネオジムを使用した永久磁石では、図 9 のように永久磁石の特性は温度によって変化し、温度が 100°C 上昇すると概ね 10 % の磁束密度低下を起こす。例えば、回転電機 2 0 0 の環境や運転状態における温度変化に応じて、弱め界磁の必要が無い低回転（弱め界磁が行われていない）では永久磁石が発生する磁束は B_0 の範囲で変動し、弱め界磁の必要な高回転では永久磁石が発生する磁束は（弱め界磁が作用して） B_1 の範囲で変動する。なお、永久磁石の動作点はクニック点を越えない範囲の減磁界で使用され、不可逆減磁を防止している。

[0037] 固定子巻線 2 3 8 での誘起電圧は、固定子巻線 2 3 8 に鎖交する磁束の微分値に比例する ($\propto -d\phi/dt$ 、 ϕ はコイル鎖交磁束)。そのため、図 1 0 に示すように、永久磁石 2 5 4 が高温 T_{mH} であれば曲線 L_1 のように誘起電圧は低下し、永久磁石 2 5 4 が低温 T_{mL} であれば曲線 L_2 のように誘起電圧は増加する。なお、曲線 L_0 は、基準温度 T_{m0} （設計温度）における誘起電圧を示したものである。

[0038] 同様にして、図 1 1 に示すように、永久磁石 2 5 4 の磁束と電機子電流の作用で発生する永久磁石トルク τ_m も、磁石温度が高温 T_{mH} であれば低下し、磁石温度が低温 T_{mL} であれば増加する。その結果、リラクタンストルク τ_r と

合せた総トルク τ_t も、永久磁石トルク τ_m の変化に応じて上下する。

[0039] ここで、 τ_t は次式 (1) のように表される。式 (1) において、 P は極対数、 I_d は d 軸電流、 I_q は q 軸電流、 L_d は d 軸インダクタンス、 L_q は q 軸インダクタンスである。また、 ϕ はコイル鎖交磁束であって、永久磁石の磁化方向に垂直な面の面積を S 、永久磁石の磁束密度を B_m とすると、 $\phi \propto B_m \cdot S$ のように表される。

$$\tau_t = p\phi I_q + p(L_d - L_q) I_d \cdot I_q \quad \cdots (1)$$

[0040] d 軸電流 I_d および q 軸電流 I_q を用いて表現した式 (1) を、 $I_d = -I \cdot \sin\beta$ 、 $I_q = I \cdot \cos\beta$ を用いて電流値 (電流振幅) I と位相角 β を用いた表現に変形すると、式 (1)' のようになる。なお、「 $\wedge 2$ 」は 2 乗を表す。式 (1)' において、右辺の第 1 項は永久磁石トルク τ_m であり、第 2 項はリラクタンストルク τ_r である。

$$\begin{aligned} \tau_t &= p\phi I_q + p(L_d - L_q) I_d \cdot I_q \quad \cdots (1) \\ &= p\phi I \cdot \cos\beta + \{ p(L_q - L_d)/2 \} I^2 \cdot \sin\beta \quad \cdots (1)' \end{aligned}$$

[0041] 磁石温度が T_{m0} から高温 T_{mH} に変化すると、コイル鎖交磁束 ϕ は ϕ_0 から ϕ_h に減少する。そのため、トルク指令 τ^* に対して基準温度 T_{m0} の電流マップから電流指令値 I^* (I_d^* 、 I_q^*) を求め、その電流指令値 I^* (I_d^* 、 I_q^*) を用いて得られるモータトルク τ は、次式からもわかるように $\tau < \tau^*$ のように小さくなる。逆に、磁石温度が基準温度 T_{m0} から低温 T_{mL} に変化すると、コイル鎖交磁束 ϕ が大きくなるのでモータトルク τ はトルク指令値 τ^* よりも大きくなる。

$$\begin{aligned} \tau^* &= p\phi_0 \cdot I^* \cdot \cos\beta + \{ p(L_q - L_d)/2 \} I^{*2} \cdot \sin\beta \\ \tau &= p\phi_h \cdot I^* \cdot \cos\beta + \{ p(L_q - L_d)/2 \} I^{*2} \cdot \sin\beta \\ \tau &< \tau^* \end{aligned}$$

[0042] このようなことから、回転電機 200 の出力範囲は、永久磁石 254 の温度に応じて図 12 のように変化する。曲線 L01 は磁石温度が基準温度 T_{m0} であった場合の出力限界を示し、曲線 L11 は磁石温度が高温 T_{mH} であった場合の出力限界を示し、曲線 L21 は磁石温度が低温 T_{mL} であった場合の出

力限界を示す。従来のように永久磁石 254 の温度を考慮せずに電流指令値 I_d^* , I_q^* を求め、それに基づいて回転電機 200 のトルク制御を行った場合、 $T-N$ 動作点が同じであっても、永久磁石 254 の磁束密度の温度依存性により、同一トルク指令に対する回転電機 200 の実際のトルク値が温度によって異なることになる。

[0043] 図 13 は、トルク指令値 τ^* と実際に発生するトルク値 τ との関係を示す図である。従来の制御の場合、トルク指令 τ^* および回転数 N が同一であれば $T-N$ 動作点が同一なので、同一の電流指令値 I_d^* , I_q^* が電流指令演算部 625 (図 8 参照) から出力される。インバータは電流制御であるため、電流指令値通りの電流値を発生するように PWM スイッチング動作が行われる。しかし、上述したように永久磁石 254 は温度が高いほど磁束密度が小さくなるので、温度 T_{m0} , T_{mH} , T_{mL} において実際に発生するトルク値 τ_0 , τ_1 , τ_2 の大小関係は、 $\tau_2 > \tau_0 (= \tau^*) > \tau_1$ のようになる。すなわち、運転者のアクセル操作に基づくトルク指令値通りのトルクを発生するとは限らない。

[0044] このように、従来の制御では、運転者のアクセル操作量に応じたトルク指令値 τ^* から電流指定値を生成した場合、回転電機 200 の永久磁石 254 の温度によって発生トルクが変動してしまうため、車両として好ましくない。

[0045] 例えば、アクセル開度が同じであっても、永久磁石 254 の温度が設計値よりも低い場合、モータトルクはトルク指令値 τ^* よりも大きくなり運転者の意図よりも加速し、また、同じ回転数であればトルクが大きい分、必要以上の電力を消費してしまうことになる。逆に、永久磁石 254 の温度が設計値よりも高い場合、モータトルクはトルク指令値 τ^* よりも小さくなり、運転者の意図よりも加速せず、同じ回転数であればトルクが小さい分、必要な動力を得られていない。さらに、車両減速時の制動力の全てもしくは一部を回生ブレーキで発生している場合は、回生トルクが小さい分、運転者の意図した制動力が得られない。さらに、回生エネルギーも指令値に対して少ないため、走行距離も短くなってしまう。

[0046] また、永久磁石 254 の温度が低い場合には、トルク指令値 τ^* に対して必要以上のトルクを発生してしまうため、発生トルクと回転数で決まる実際の機械出力 P_{out} ($=\omega_m \cdot \tau$) が、指令値から予測される機械出力 P_{out}^* ($=\omega_m \cdot \tau^*$) よりも大きくなってしまうことになる。そのため、バッテリー 180 に蓄えられたエネルギーを必要以上に使ってしまい、航続距離の減少を招いてしまうことになる。

[0047] そこで、本実施の形態では、永久磁石 254 の磁束密度の温度依存性を考慮して、入力されたトルク指令値 τ^* に対して、トルク指令値 τ^* から生成させる電流指令値 I_d^* , I_q^* を回転電位 200 の磁石温度に応じて補正するようにした。それにより、永久磁石 254 の温度に依存せずトルク指令値通りのトルクを発生することが可能となった。以下では、その補正方法について説明する。

[0048] (第 1 の補正方法)

図 14 は、第 1 の補正方法を説明する図である。図 14 は、モータコントローラ 620 の電流指令演算部 625 と電流制御部 624 を示したものである。第 1 の補正方法では、同一トルク指令値 τ^* に対して、永久磁石温度 T_m に応じて参照する電流マップを切り替えて電流指令値 I_d^* , I_q^* を生成するような構成とした。図 14 に示す例では、電流指令演算部 625 は、磁石温度が基準温度 T_{m0} の場合の電流マップ 6252 と、磁石温度が高温 T_{mH} の場合の電流マップ 6253 と、磁石温度が低温 T_{mL} の場合の電流マップ 6254 とを備えている。

[0049] 電流マップ選定部 6251 は、磁石温度 T_m が基準温度 T_{m0} である場合には電流マップ 6252 を選択し、磁石温度 T_m が T_{mH} である場合には電流マップ 6253 を選択し、磁石温度 T_m が T_{mL} である場合には電流マップ 6254 を選択する。そして、電流指令演算部 625 は、トルク指令値 τ^* および角速度 ω_r に基づいて、選択した電流マップから電流指令値を検索することで電流指令値を生成する。磁石温度 T_m が、 T_{m0} と T_{mH} 間、もしくは T_{m0} と T_{mL} 間にあるときは、それぞれの電流マップを補間して電流指令値を生成する。

[0050] 図15は、電流マップの一例を示す図である。横軸は角速度 ω_r （または、回転数）、縦軸はトルク指令値 τ^* である。各動作点は格子状に分割され、それぞれの動作点には、角速度 ω_r でトルク指令値 τ^* を出すために必要なd軸電流指令値 I_d^* 、q軸電流指令値 I_q^* が格納されている。黒丸で示す動作点よりも外側の白丸で示す動作点には、電流指令値 I_d^* 、 I_q^* は格納されていない。すなわち、黒丸で示す範囲が動作範囲である。なお、各動作点間のデータは、線形補間などを活用して算出される。

[0051] 従来の構成では、電流マップとして基準温度の電流マップ6252のみが備えられ、入力されたトルク指令 τ^* および角速度 ω_r に基づいて電流マップ6252を検索することにより、d軸電流指令 I_d^* 、q軸電流指令 I_q^* を生成していた。そのため、上述したように、磁石温度 T_m が基準温度よりも高い場合や、逆に低い場合には、実際のトルクはトルク指令値 τ^* と異なる τ_1 、 τ_2 となってしまう。

[0052] 一方、本実施の形態における電流マップ6252～6254は、いずれも図15に示すような電流マップであるが、同一の動作点（ τ^* 、 ω_r ）に格納されているd軸電流指令 I_d^* 、q軸電流指令 I_q^* がそれぞれ異なっている。

[0053] 図16は、電流マップ6252～6254の同一の動作点（ τ^* 、 ω_r ）に格納される電流指令値を説明する図である。A点は、電流マップ6252の同一動作点（ τ^* 、 ω_r ）における電流指令値を示している。すなわち、磁石温度 T_m が T_{m0} の場合には、電流指令値 τ^* に対して電流指令値Aが出力され、実際のモータトルク τ は指令値通りのトルク $\tau_0 = \tau^*$ となる。B点は、電流マップ6253の同一動作点（ τ^* 、 ω_r ）における電流指令値を示している。電流指令値Bは、磁石温度 T_m が高温 T_{mH} のときに実際のモータトルク τ が τ_0 となる電流指令値である。C点は、電流マップ6254の同一動作点（ τ^* 、 ω_r ）における電流指令値を示している。電流指令値Cは、磁石温度 T_m が低温 T_{mL} のときに実際のモータトルク τ が τ_0 となる電流指令値である。

[0054] 図17は、図16において横軸をトルク指令 τ^* に置き換えたものであり、

図 1 3 に相当する図である。図 1 7 では、電流指令値 A , B , C は全てトルク指令値 τ^* となるので、図 1 6 の 3 つの直線は重なり合って一つの直線になる。また、図 1 6 に示すインバータの電流出力制限の範囲で決まる出力限界に対応するトルク指令値 τ^* は、基準温度 T_m の場合と比較して、高温 T_{mH} の場合には低下し、低温 T_{mL} の場合には増加する。そのため、図 1 7 に示すように、3 つの直線が重なり合った部分（トルク一定制御範囲）と、高温 T_{mH} の場合の出力制限に対応するトルク指令値 τ^* よりも大きな領域（トルク増加範囲）とが生じる。

[0055] トルク指令値 τ^* がトルク一定制御範囲内であれば、 T_{mL} , T_{m0} , T_{mH} のいずれの磁石温度においても、指令通りのモータトルク τ を発生することができる。また、出力制限に対応するトルク指令値 τ^* は、図 1 2 に示した曲線 L_{01} , L_{11} , L_{21} に対応するものである。例えば、磁石低温 T_{mL} の場合には、実際に発生できるモータトルク τ は曲線 L_{21} まで引き上げられる。これを図 1 5 の電流マップで説明すると、基準温度 T_{m0} の電流マップの場合に、黒丸で示す動作点に電流指令値が格納されていると仮定すると、低温 T_{mL} における電流マップの場合には、外側の白丸の動作点にも電流指令値が格納されていることになる。そのため、基準温度 T_{m0} よりも磁石温度が低い場合（ T_{mL} ）には、インバータの電流出力制限範囲内で車両側からのトルク指令値 τ^* の上限を引上げることで、通常よりも大きなトルクを発生することが可能になる。

[0056] このように、同一のトルク指令 τ^* に対して、 $T_m = T_{m0}$ の場合には電流マップ 6 2 5 2 が選択されて電流指令 A が生成され、 $T_m = T_{mH}$ の場合には電流マップ 6 2 5 3 が選択されて電流指令 B が生成され、 $T_m = T_{mL}$ の場合には電流マップ 6 2 5 4 が選択されて電流指令 C が生成される。その結果、磁石温度が T_{m0} , T_{mH} , T_{mL} のいずれの場合においても、同一トルク指令 τ^* に対して同一のモータトルク τ を発生させることができ、回転子 2 5 0 に設けられた永久磁石 2 5 4 の温度変化によって発生するトルク変動を、抑えることができる。なお、各温度間のデータは、線形補間などを活用して算出される。

基準温度の電流マップに対してさらに追加する電流マップの数は、上述した2つに限らず、それ以上であっても良く、磁石温度 T_m と一致する電流マップが無い場合は、磁石温度 T_m に、高温で一番近い電流マップと磁石温度 T_m より低温で一番近い電流マップを補間することで電流指令値を得る。

[0057] (第2の補正方法)

第2の補正方法では、永久磁石254の磁束密度の温度変化に対応するために、回転電機200のトルク式および電圧方程式(1)～(5)に含まれているコイル鎖交磁束 ϕ を温度の関数として扱うようにした。そのような構成とすることで、磁石温度によらず、上位制御装置からのトルク指令値 τ^* 通りのモータトルクを発生させることが可能となる。

[0058] 回転電機200のトルク τ および機械出力 P_{out} は前述した式(1)と次式(2)とで表すことができる。式(1)、(2)において、 P は極対数、 I_d はd軸電流、 I_q はq軸電流、 L_d はd軸インダクタンス、 L_q はq軸インダクタンス、 ω_m :機械角速度である。また、 ϕ はコイル鎖交磁束であって、永久磁石の磁化方向に垂直な面の面積を S 、永久磁石の磁束密度を B_m とすると、 $\phi \propto B_m \cdot S$ のように表される。

$$\tau = p\phi I_q + p(L_d - L_q) I_d \cdot I_q \quad \dots (1)$$

$$P_{out} = \omega_m \cdot \tau \quad \dots (2)$$

[0059] また、モータ端子電圧 V 、d軸電圧 V_d 、q軸電圧 V_q は、次式(3)～(5)で表される。なお、 ω は電気角速度、 R は巻線抵抗である。

$$V = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad \dots (3)$$

$$V_d = R \cdot I_d - \omega \cdot L_q \cdot I_q \quad \dots (4)$$

$$V_q = R \cdot I_q + \omega \cdot L_d \cdot I_d + \omega \cdot \phi \quad \dots (5)$$

[0060] 上述のように、コイル鎖交磁束 ϕ は、永久磁石254の発生する磁束が電機子コイルを通過する量であって、永久磁石254が発生する磁束は永久磁石254の磁化方向に垂直な面の面積 S と磁束密度 B_m の積で決まる。永久磁石物性である磁束密度 B_m は、図9に示したような温度依存性がある。そのため、式(1)の τ にトルク指令値 τ^* を代入し、磁石温度を反映したコイル鎖

交磁束 ϕ を用いる等、トルク式と電圧方程式から電流指令値を作る方法において、トルク式および電圧方程式に含まれているコイル鎖交磁束 ϕ を永久磁石の温度の関数とすることで、永久磁石 254 の温度依存性を考慮した駆動力制御が可能になる。なお、温度 T の関数としてのコイル鎖交磁束 ϕ (Wb) については、実測等により予め求め、電流指令演算部 625 の記憶部（不図示）に格納しておく。

[0061] ここで、磁石温度が基準温度 T_{m0} から高温 T_{mh} または低温 T_{ml} に変化した場合の電流指令値の補正の仕方について、図 22, 23 を用いて説明する。図 22 は、磁石温度が所定温度 T_{m0} から高温 T_{mH} に変化した場合を説明する図である。図 22 において、ライン $L_0(I_a, \phi)$ は磁石温度が T_{m0} のときのトルク τ （総トルク τ_t ）を示す。回転電機 200 が低回転で弱め界磁が行われていない場合には、例えば、ライン $L_0(I_a, \phi)$ の点 E のような状態（最大トルク制御）で駆動される。一方、回転電機 200 が高回転で弱め界磁が行われている場合には、ライン $L_0(I_a, \phi)$ の点 D のように電流位相角がやや大きい状態で駆動される。

[0062] 図 11 において説明したように、磁石温度が T_{m0} から高温 T_{mH} に変化するとコイル鎖交磁束 ϕ は ϕ_0 から ϕ_h に減少するため、基準温度 T_{m0} の電流マップをそのまま用いると、モータトルク τ はトルク指令値 τ^* よりも小さくなってしまう。すなわち、温度変化後は、実際に発生するモータトルクは、モータトルク τ^* の点 D, E からモータトルク τ の点 D1, E1 に移動する。図 22 において、破線で示すライン $L_h(I_a, \phi_h)$, $L_h(I_b, \phi_h)$, $L_h(I_c, \phi_h)$ は上述した式(1)'において、コイル鎖交磁束 ϕ を高温時の ϕ_h で置き換えた場合のトルク τ_t を示したものである。 I_a , I_b , I_c は電流値（電流振幅）であり、 $I_a < I_b < I_c$ の関係になっている。

[0063] 点 E の場合、トルク τ_t がトルク指令値 τ^* と同じになっているのは、ライン $L_h(I_c, \phi_h)$ の点 E2 である。すなわち、高温 T_{mH} における電流マップに切り替えると、回転電機 200 は点 E2 における電流 I_c で駆動されることになる。この場合、電流振幅は $I_a \rightarrow I_c$ と大きくされ、電流位相角は β_3 から β_4

へ変更される。また、点Dの場合、点D 1 から電流振幅を $I_a \rightarrow I_b$ と大きくしてライン $L_h(I_b, \phi_h)$ 上の点D ($\tau_t = \tau^*$) へと移動させても良いし、電流位相角を β_1 から β_2 へと変更することでライン $L_h(I_a, \phi_h)$ 上を点D 2 に移動させても良い。さらに、ライン $L_h(I_a, \phi_h)$ とライン $L_h(I_b, \phi_h)$ の間にもラインは存在するので、電流振幅と電流位相角とを変更して点D 3 へ移動させても良い。いずれの場合にも、トルク指令値通りのモータトルクを発生させることができる。さらに、電流振幅が最小となる電流指令値を選択することで高効率化が図れる。

[0064] 図23は、磁石温度が所定温度 T_{m0} から低温 T_{mL} に変化した場合を説明する図である。磁石温度が低温 T_{mL} に変化した場合に、基準温度 T_{m0} の電流マップをそのまま使用すると $\tau > \tau^*$ となってしまう。そのため、温度変化後は、実際に発生するモータトルクは、モータトルク τ^* の点Fからモータトルク τ の点F 1 に移動する。ここで、低温 T_{mL} における電流マップに切り替えた場合に、点F 1 から電流振幅を $I_a \rightarrow I_f$ と小さくしてライン $L_h(I_f, \phi_h)$ 上の点F ($\tau_t = \tau^*$) へと移動させても良いし、電流位相角を β_5 から β_6 へと変更することでライン $L_h(I_a, \phi_h)$ 上を点F 2 に移動させても良いし、電流振幅を $I_a \rightarrow I_e$ と小さくすると共に、電流位相角を β_5 から β_7 へ変更して点F 3 へ移動させても良い。いずれの場合にも、トルク指令値通りのモータトルク τ^* を発生させることができる。さらに、電流振幅が最小となる電流指令値を選択することで高効率化が図れる。

[0065] 従来は、トルク指令値 T^* に対して必要以上のトルクを発生してしまうため、機械出力 が想定よりも大きくなってバッテリーに蓄えられたエネルギーを必要以上に使ってしまうという問題があったが、本実施の形態ではトルク指令値通りのトルクを発生するのでこのような問題が生じない。

[0066] なお、図22の点Dや図23の点Fは弱め界磁制御が行われる領域である。そのため、高温 T_{mH} および低温 T_{mL} の電流マップを作成する際の、高回転域における動作点の電流指令値の設定においては、回転電機200のトルクをトルク指令値 τ^* と一致させる際に、弱め界磁制御による電圧制限が満足さ

れるように電流振幅と電流位相とを変える。

[0067] 前述したマップ方式では、基準温度の電流マップ6252に対して、高温時の電流マップ6253および低温時の電流マップ6254を作成する場合、上述したような電流指令値の補正の仕方により作成する。またトルク式および電圧方程式を用いて算出する場合にも、上述したような補正の仕方電流指令値の算出を行う。

[0068] 以上の説明では、力行時における回転電機200のモータ動作時に関して説明したが、回生ブレーキ動作時においても同様である。すなわち、回生トルク指令値 τ^* に対して、基準温度 T_{m0} 時、高温 T_{mH} 時、低温 T_{mL} 時のモータ回生トルクは図18に示すようになり、図13に示したものと全く同様の状況となる。そのため、車両コントローラ700から入力される回生トルク指定値 τ^* に対して、磁石温度 T_m が基準温度 T_{m0} より高温である場合($T_m > T_{m0}$)には、実際に得られる回生トルクは回生トルク指定値 τ^* よりも小さくなり、回生ブレーキによって回収できるエネルギーが減ってしまう。また、磁石温度 T_m が基準温度 T_{m0} より低温である場合($T_m < T_{m0}$)には、実際の回生トルクが回生トルク指定値 τ^* よりも大きくなってしまいうため、制動力が大きくなって想定以上にエネルギーを回収してしまい、好ましくない。

[0069] このように、従来は、ロータに取付けられた永久磁石の温度変化によって回生ブレーキ動作時に一定の制動力を発生できず、その結果、回収できるエネルギーも変動してしまう。

[0070] そこで、本実施の形態では、永久磁石254の磁束密度の温度依存性を考慮して、同一の回生トルク指令値 τ^* であっても、回生トルク指令値 τ^* から生成させる電流指令値を磁石温度 T_m に応じて補正する。図19は、補正後の回生トルク指令値 τ^* と実際の回生トルク値 τ との関係を示す図である。図17に示した場合と全く同様の関係となっており、図19のトルク一定制御範囲では、磁石温度 T_m に依らず回生トルク指令値 τ^* 通りの回生トルクを発生することができる。

[0071] 図19からも分かるように、磁石温度 T_m が基準温度 T_{m0} 値よりも低い場合

には、インバータの電流出力制限範囲内で車両側からの回生トルク指令値 τ^* の上限を引上げることで、通常よりも大きな回生トルクを発生することが可能になる。なお、回生時は図 12 に示すようにマイナストルク側で動作するので、トルク指令値 τ^* はマイナスであるが、図 18, 19 では力行動作時の図と比較し易いようにトルクを正の値で示している。

[0072] 図 20 は、回生協調ブレーキ動作時における、回生ブレーキ分と油圧ブレーキ分との間の制動力分配の一例を示したものである。図 20 の上側のグラフは制動力分配を示し、下側のグラフは車速の変化の様子を示したものである。図 20 に示す例では、必要性動力が一定の場合について示した。図 20 に示すように、回生トルク分は磁石温度 T_m の変化幅に応じて、実線で示すライン（基準温度 T_{m0} 時）に対して破線で示すように上下に変化する。回生協調時は、回生ブレーキ分と油圧ブレーキ分との和が必要制動力と等しくなるように制御されるので、回生ブレーキ分の温度変化に応じて油圧ブレーキ分も一点鎖線のように変化することになる。

[0073] そこで、図 19 に示すような磁石温度 T_m に基づく補正を、上述した電流マップを切り替える方法や、トルク式と電圧方程式から電流指令値を作る方法を用いて行うことにより、図 20 の実線で示すような回生ブレーキ力を発生させることが可能となる。その結果、安定した回生協調ブレーキ制御を行うことができる。

[0074] 図 21 は、回生協調ブレーキ動作の手順を示す図である。運転者がブレーキペダルを踏むと、ブレーキコントローラ 701 がブレーキ踏力に基づいて総ブレーキ力を計算し、その計算結果（a）を車両コントローラ 700 に受け渡す。車両コントローラ 700 は、総ブレーキ力を油圧ブレーキ力と回生ブレーキ力とに配分する。車両コントローラ 700 は、ブレーキコントローラ 701 には配分された油圧ブレーキ力の指令を入力し、駆動制御装置 600 のモータコントローラ 620 には回生ブレーキ力に相当する回生トルク指令値 τ^* を入力する。

[0075] まず、最初は、図 20 に示すように、必要制動力に対して油圧ブレーキが

立上り制動力を発生する。その後、徐々に必要制動力の一部を回生ブレーキ力に配分し、車両コントローラ 700 で決定された配分まで回生ブレーキ力を上昇させるとともに、油圧ブレーキ力を減少させる。このようにブレーキ力の配分を調整することにより、スムーズに回生協調動作を行うことができる。

[0076] このとき、バッテリー電圧等の影響により、回生トルク指令値 τ^* が回転電機 200 の N-T カーブの外側であることもあるので、モータコントローラ 620 は、実際に回転電機 200 に流れている電流値を元に実際の回生トルク τ を演算し、車両コントローラ 700 に回答する。車両コントローラ 700 は、再度ブレーキ力配分を調整して回生協調ブレーキの動作を行う。なお、車両コントローラ 700 は、必要制動力から実際の回生トルク τ に基づく回生ブレーキ分を差し引いた油圧ブレーキ分 (b) を、ブレーキコントローラ 701 へ送信する。

[0077] ところで、磁石温度が低温 T_{mL} のときには、図 12, 19 に示すように基準温度 T_{m0} の場合よりも発生できる回生トルクの上限が大きくなる。そのため、要求制動力が回生ブレーキ力よりも大きい場合には、ブレーキ力配分を決定する際に回生ブレーキ力の上限を配分すれば、バッテリー 180 に戻すことができる回生電力を増加させることができる。逆に、磁石温度が高温 T_{mH} の場合には、発生可能な回生ブレーキ力の上限が低下するので、その低下分だけ油圧ブレーキ力の配分を大きくすれば良い。このような、制御が可能とするために、駆動制御装置 600 は、磁石温度に応じた発生可能トルクの上限值 (c) を車両コントローラ 700 へ出力する。

[0078] 以上の説明をまとめると以下ようになる。

(1) 駆動制御装置 600 は、回転子 250 に永久磁石 254 が設けられた回転電機 200 の電流を車両コントローラ 700 からのトルク指令値 τ^* に基づいてベクトル制御し、バッテリー 180 を電源とする回転電機 200 の駆動および回転電機 200 によるバッテリー 180 の回生充電を行う。そして、駆動制御装置 600 は、温度検出部 228 の検出値に基づいて磁石温度 T_m を算

出する温度演算部 627 と、回転電機 200 のトルク τ がトルク指令値 τ^* と一致するように、同一トルク指令値 τ^* に対して磁石温度 T_m に応じた異なる電流指令値 I_d^* , I_q^* を生成する電流指令演算部 625 と、を備える。

[0079] このような制御を行うことにより、磁石温度 T_m の変化によって永久磁石 254 の残留磁束密度が変化した場合であっても、それに応じて電流指令値 I_d^* , I_q^* を生成される。そのため、トルク指令値 τ^* 通りのトルク τ を回転電機 200 により発生させることができ、磁石温度に応じた適切な制御を行うことができる。また、磁石温度 T_m が低い場合であっても、従来のようにトルク指令値よりも大きな必要以上のトルクを発生することがないので、バッテリー 180 に蓄えられたエネルギーを必要以上に使うことがなく、航続距離の減少を防止することができる。この場合、従来よりも電流値が小さくなるので、銅損の低減も図ることができる。

[0080] (2) さらに、電流指令演算部 625 は、回転電機 200 の回転速度が弱め界磁制御を必要としない領域では、所定温度 T_{m0} よりも高温 T_{mH} または低温 T_{mL} の場合には、電流振幅および電流値の少なくとも一方を補正することにより回転電機 200 のトルク τ をトルク指令値 τ^* に一致させ、回転電機 200 の回転数が弱め界磁制御を必要とする領域では、弱め界磁制御による電圧制限が満足されるように電流振幅および電流位相を補正して回転電機 200 のトルク τ をトルク指令値 τ^* に一致させる。

[0081] 永久磁石 254 の温度が所定温度（基準値）よりも高温であるときは誘起電圧は低いため、弱め界磁のための d 軸電流を減らすことが可能となる。この場合、トルクが低下しているため q 軸電流を増やす必要があり、電圧制限とトルクを満足するように電流振幅と電流位相を調整する。また、永久磁石の温度が所定温度よりも低温であるときは誘起電圧が高いため d 軸電流を増やす必要がある。さらに、磁束密度が大きくなってトルクが増加しているため、q 軸電流を減らすことができる。よって、電圧制限とトルクを満足するように d 軸電流を増やすと共に q 軸電流を減らして、電流振幅と電流位相を調整する。

- [0082] このような制御を行うことにより、基準温度の場合に限らず、高温時や低温時においても、弱め界磁制御の有無に応じた適切な制御を行うことができる。
- [0083] (3) また、車両コントローラ 700 は、油圧ブレーキと回生ブレーキとを用いた制動制御を行う回生協調ブレーキ制御装置 (700) を備える電動車両を制御するものであって、電流指令演算部 625 は、回生協調ブレーキ動作時における回転電機 200 のトルク τ がトルク指令値 τ^* と一致するように、同一トルク指令値に対して磁石温度 T_m に応じた異なる電流指令値を生成する。その結果、指令値通りの回生ブレーキ力が得られ、適切な制動動作を行うことができる。
- [0084] (4) さらに、電流指令演算部 625 は、磁石温度 T_m に応じて回転電機 200 が発生可能なトルク限界値を、トルク指令値 τ^* を発生する車両コントローラ 700 へ出力する。その結果、例えば、磁石温度が低温時には、基準温度の場合に比べて出力できるトルクが上昇するので、モータの出力能力を最大限活用することができる。また、高温時に回生ブレーキによって回収できるエネルギーが減ってしまうのを防止することができる。
- [0085] なお、永久磁石 154 の温度変化に合わせて参照する電流マップを変更する方法や、モータの電圧方程式とトルク式に含まれている永久磁石鎖交磁束 ϕ を温度の関数として扱う方法によって、上述した制御を行うことができる。
- [0086] (5) 電流マップを変更する方法では、駆動制御装置 600 は、回転電機 200 の回転速度 ω を算出する位置・速度演算部 621 をさらに備え、電流指令演算部 625 は、複数の磁石温度 T_{m0} , T_{mH} , T_{mL} に対応付けて設けられ、回転電機 200 の回転速度 ω およびトルク τ と電流指令値との相関を示す複数の電流マップ 6252 ~ 6254 と、温度検出部 228 の信号に基づき温度演算部 627 により算出された磁石温度 T_m に基づいて、複数の電流マップ 6252 ~ 6254 から一つを選択する電流マップ選択部 6251 と、有し、電流指令演算部 625 は、前記電流マップ選択部 6251 で選択された

電流マップと、トルク指令値 τ^* と、回転速度演算部621により算出された回転速度 ω とに基づいて、電流指令値を決定する。

[0087] (6) 電圧方程式とトルク式に含まれている永久磁石鎖交磁束 ϕ を温度の関数として扱う方法では、回転電機200の回転速度 ω を算出する回転速度演算部621を備え、電流指令演算部625は、磁石温度 T_m に依存して変化するコイル鎖交磁束 ϕ をパラメータとする電圧方程式およびトルク式と、トルク指令値 τ^* と、回転速度演算部621により算出された回転速度 ω とに基づいて、電流指令値を決定する。

[0088] (7) 電動車両駆動システムは、回転子250に永久磁石254が設けられた回転電機200と、上述した駆動制御装置600と、ブレーキコントローラ701と、油圧ブレーキ力および回生ブレーキ力を用いた回生協調ブレーキ動作時の油圧ブレーキ指令値およびトルク指令値を演算する車両コントローラ700と、を備える。車両コントローラ700は、磁石温度 T_m が所定温度 T_{m0} よりも低い低温時には、トルク限界値を回生協調ブレーキ動作時のトルク指令値 τ^* として電流指令演算部625に出力する。そのため、要求制動力が回生ブレーキ力よりも大きい場合には、ブレーキ力配分を決定する際に回生ブレーキ力の上限を配分すれば、バッテリー180に戻すことが可能な回生電力を増加させることができる。

[0089] なお、以上の説明はあくまでも一例であり、発明を解釈する際、上記実施の形態の記載事項と特許請求の範囲の記載事項の対応関係に何ら限定も拘束もされない。

符号の説明

[0090] 180：バッテリー、200：回転電機、228：温度検出部、230：固定子、250：回転子、254：永久磁石、600：駆動制御装置、621：位置速度演算部、625：電流指令演算部、627：温度演算部、700：車両コントローラ、701：ブレーキコントローラ、710：バッテリー制御部、6251：電流マップ選定部、6252～6254：電流マップ

請求の範囲

[請求項1] 回転子に永久磁石が設けられた回転電機の電流をトルク指令値に基づいてベクトル制御し、バッテリーを電源とする前記回転電機の駆動および前記回転電機による前記バッテリーの回生充電を行う回転電機駆動制御装置において、

前記回転電機に設けられた温度検出部の検出信号に基づいて、前記永久磁石の温度を算出する温度演算部と、

前記回転電機のトルクが前記トルク指令値と一致するように、同一トルク指令値に対して前記磁石温度に応じた異なる電流指令値を生成する電流指令演算部と、を備えることを特徴とする回転電機駆動制御装置。

[請求項2] 請求項1に記載の回転電機駆動制御装置において、

前記電流指令演算部は、

前記回転電機の回転速度が弱め界磁制御を必要としない領域では、所定温度よりも高温または低温の場合には、電流振幅および電流値の少なくとも一方を補正することにより前記回転電機のトルクを前記トルク指令値に一致させ、

前記回転電機の回転速度が弱め界磁制御を必要とする領域では、弱め界磁制御による電圧制限が満足されるように電流振幅および電流位相を補正して前記回転電機のトルクを前記トルク指令値に一致させる、ことを特徴とする回転電機駆動制御装置。

[請求項3] 請求項2に記載の回転電機駆動制御装置において、

前記上位制御装置は、油圧ブレーキと回生ブレーキとを用いた制動制御を行う回生協調ブレーキ制御装置を備える電動車両を制御するものであって、

前記電流指令演算部は、回生協調ブレーキ動作時における前記回転電機のトルクが前記トルク指令値と一致するように、同一トルク指令値に対して前記磁石温度に応じた異なる電流指令値を生成することを

特徴とする回転電機駆動制御装置。

[請求項4]

請求項3に記載の回転電機駆動制御装置において、

前記電流指令演算部は、前記磁石温度に応じて前記回転電機が発生可能なトルク限界値を、前記トルク指令値を発生する上位制御装置へ出力する、ことを特徴とする回転電機駆動制御装置。

[請求項5]

請求項1乃至4のいずれか一項に記載の回転電機駆動制御装置において、

前記回転電機の回転速度を算出する回転速度演算部を備え、

前記電流指令演算部は、

複数の磁石温度に対応付けて設けられ、前記回転電機の回転速度およびトルクと電流指令値との相関を示す複数の電流マップと、

前記温度演算部によって算出された磁石温度に基づいて、前記複数の電流マップから一つを選択する電流マップ選択部と、有し、

前記電流指令演算部は、前記電流マップ選択部で選択された電流マップと、前記トルク指令値と、前記回転速度演算部により算出された前記回転速度とに基づいて、電流指令値を決定することを特徴とする回転電機駆動制御装置。

[請求項6]

請求項1乃至4のいずれか一項に記載の回転電機駆動制御装置において、

前記回転電機の回転速度を算出する回転速度演算部を備え、

前記電流指令演算部は、前記磁石温度に依存して変化するコイル鎖交磁束をパラメータとする電圧方程式およびトルク式と、前記トルク指令値と、前記回転速度演算部により算出された前記回転速度とに基づいて、電流指令値を決定することを特徴とする回転電機駆動制御装置。

[請求項7]

回転子に永久磁石が設けられた回転電機と、

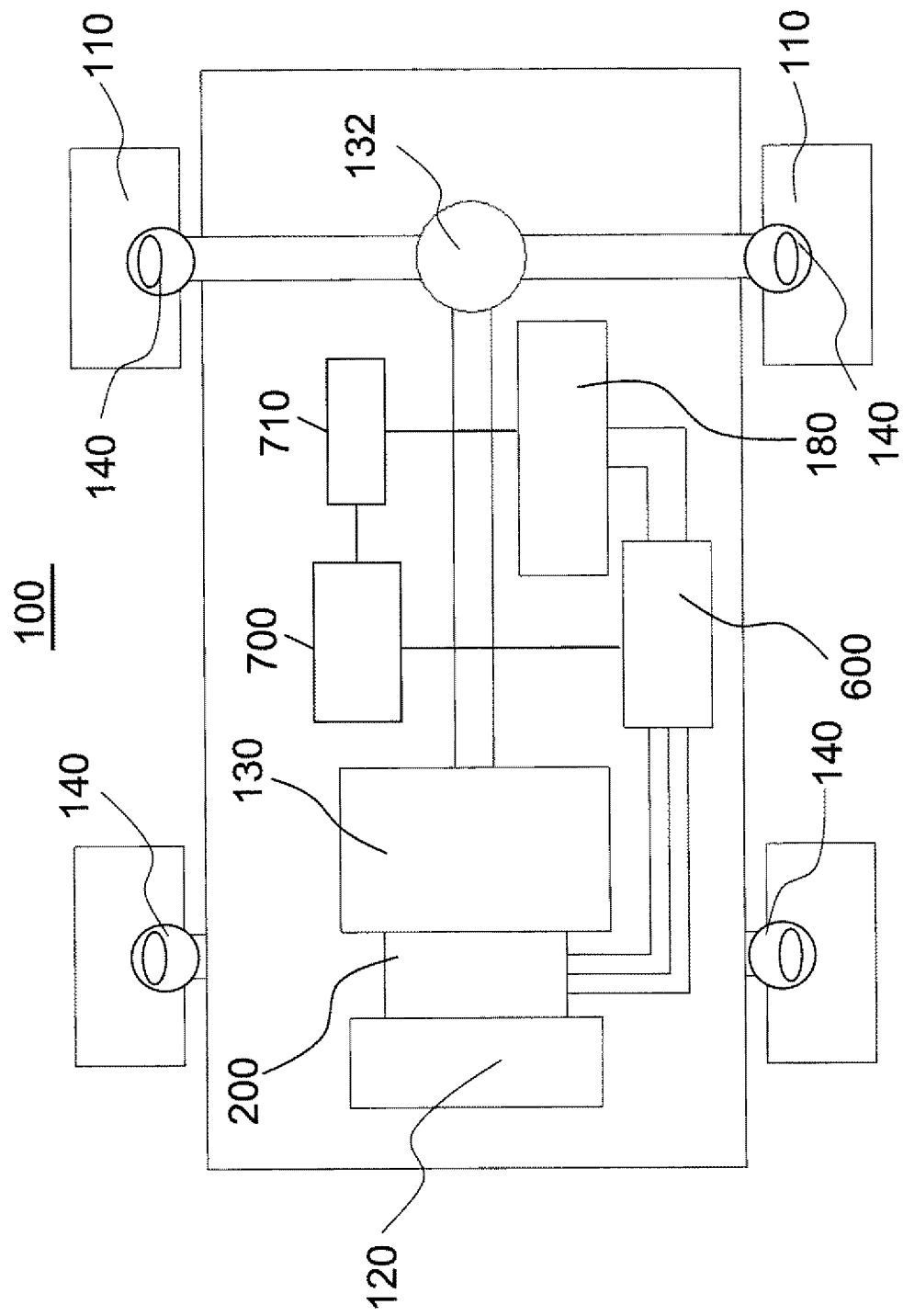
請求項4に記載の回転電機駆動制御装置と、

油圧ブレーキ制御装置と、

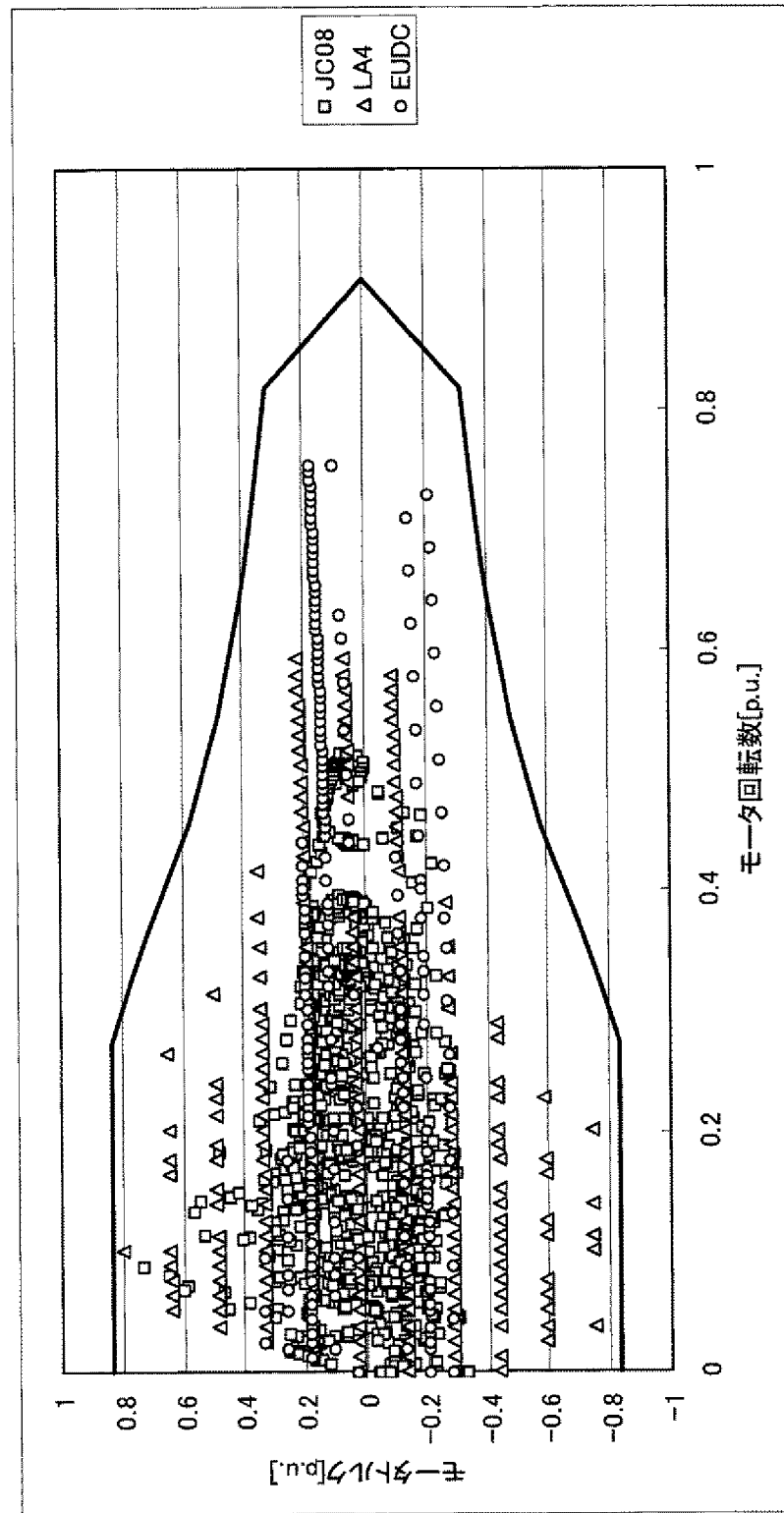
油圧ブレーキ力および回生ブレーキ力を用いた回生協調ブレーキ動作時の油圧ブレーキ指令値および前記トルク指令値を演算する上位制御装置と、を備える電動車両駆動システムにおいて、

前記車両制御部は、前記磁石温度が所定温度よりも低い低温時には、前記トルク限界値を回生協調ブレーキ動作時の前記トルク指令値として前記電流指令演算部に出力することを特徴とする電動車両駆動システム。

【図1】



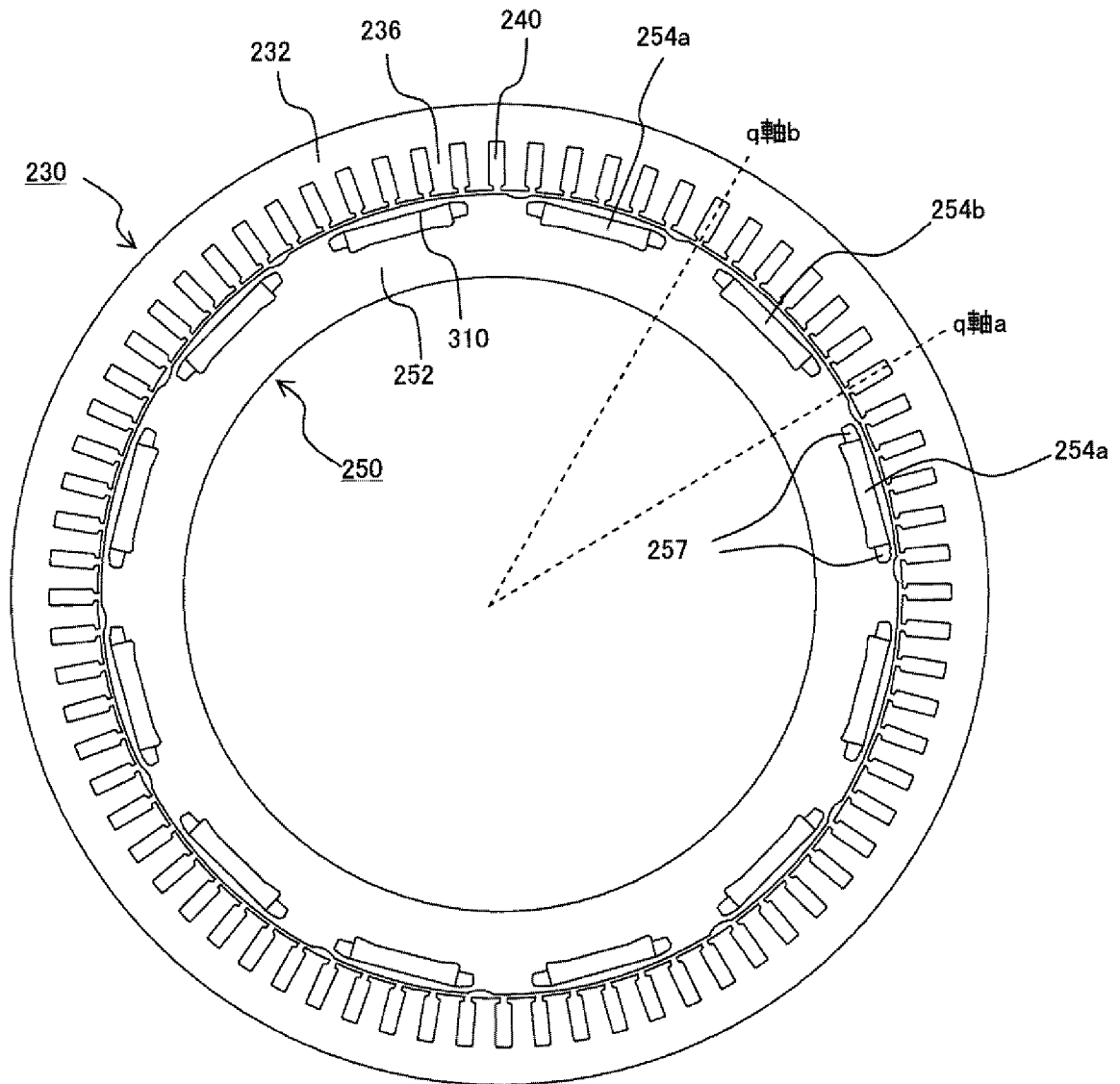
【図2】



【図2】

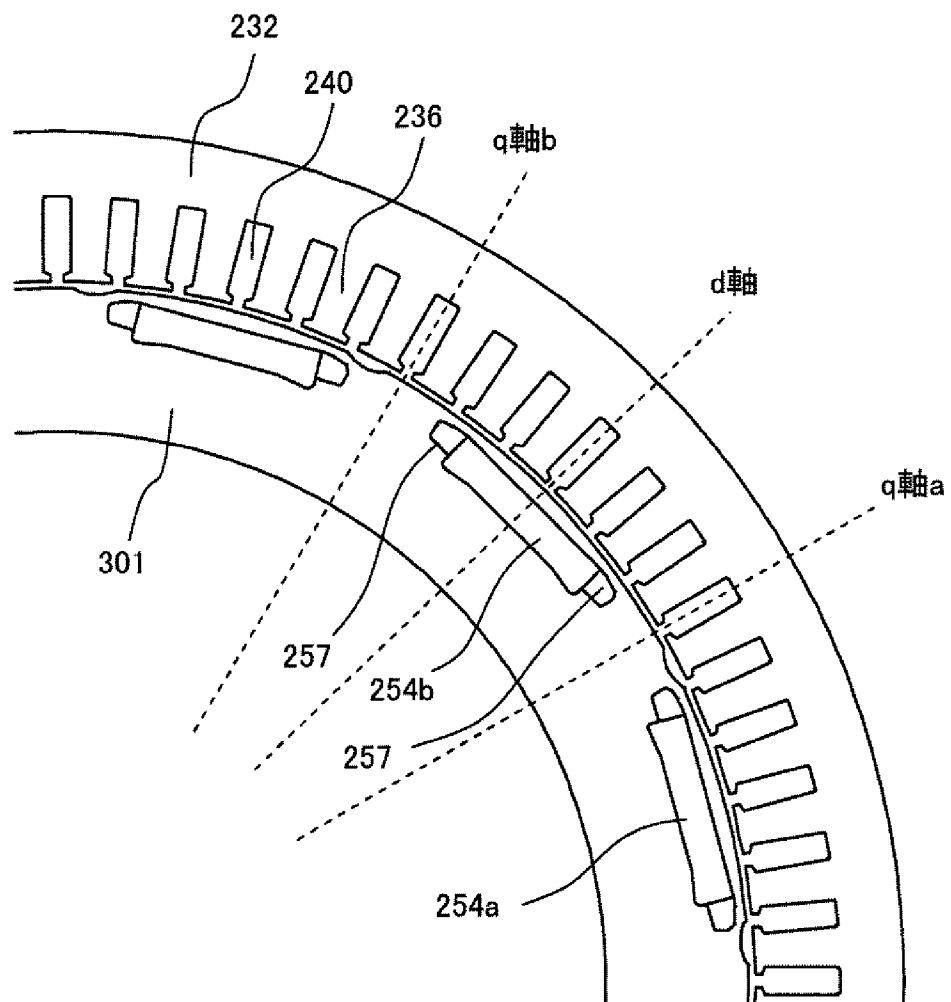
[図4]

【図4】



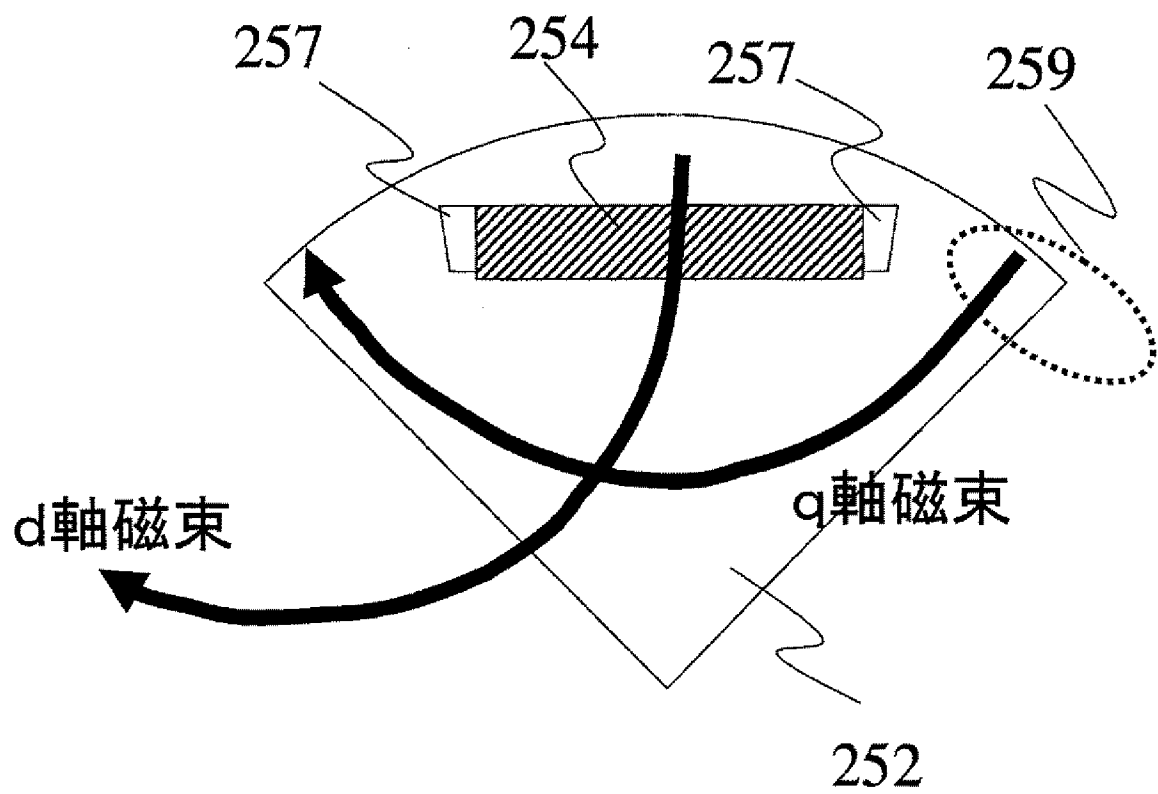
[図5]

【図5】

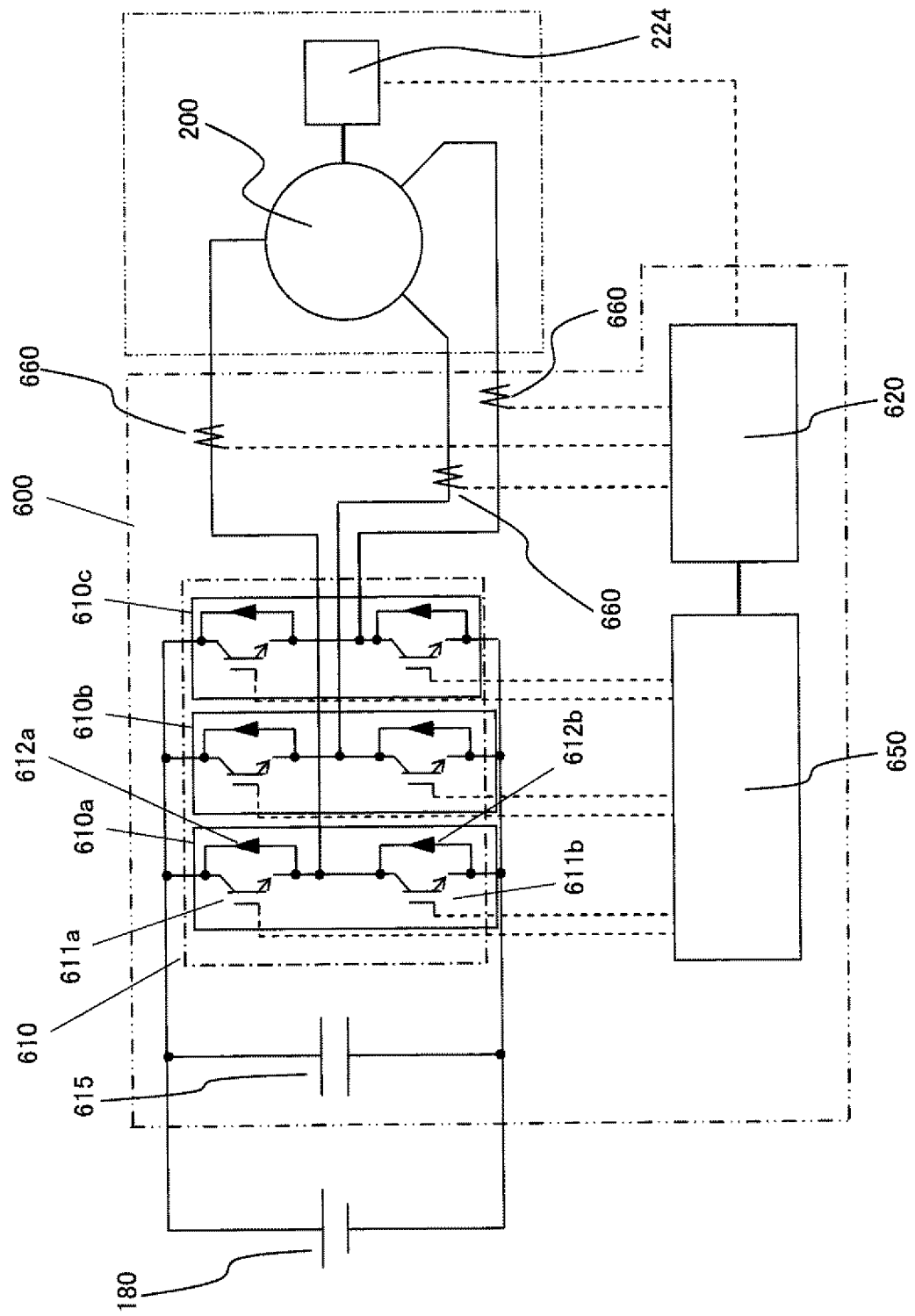


[図6]

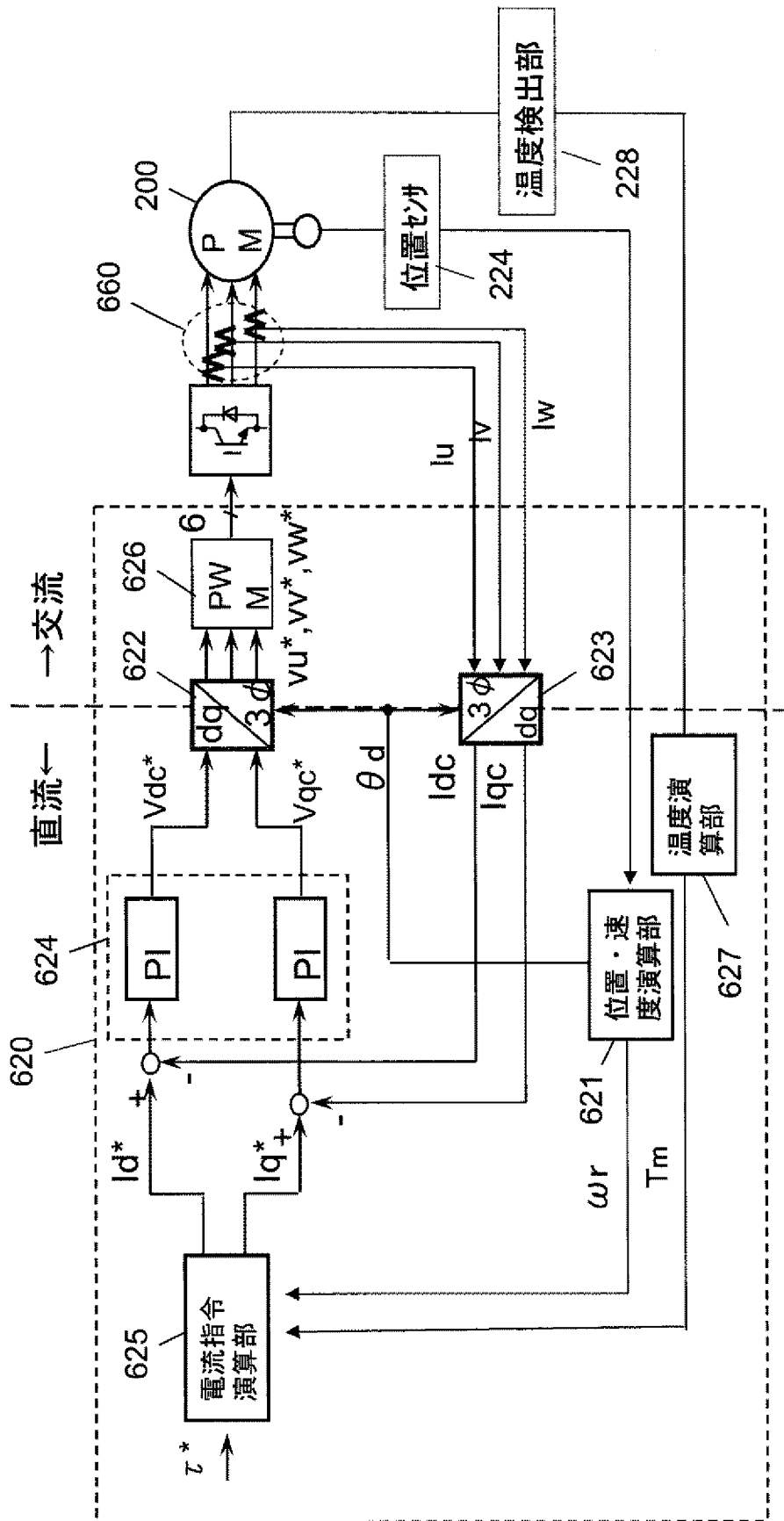
【図6】



【図7】

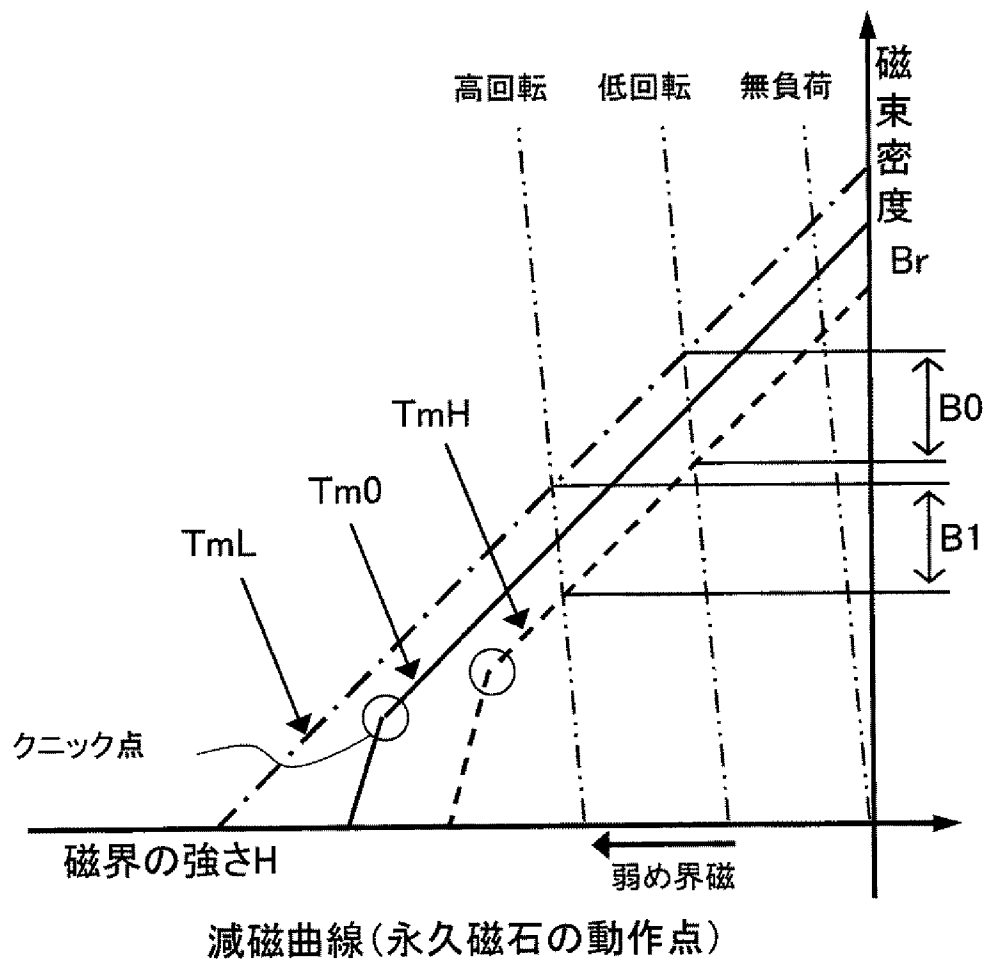


【図8】

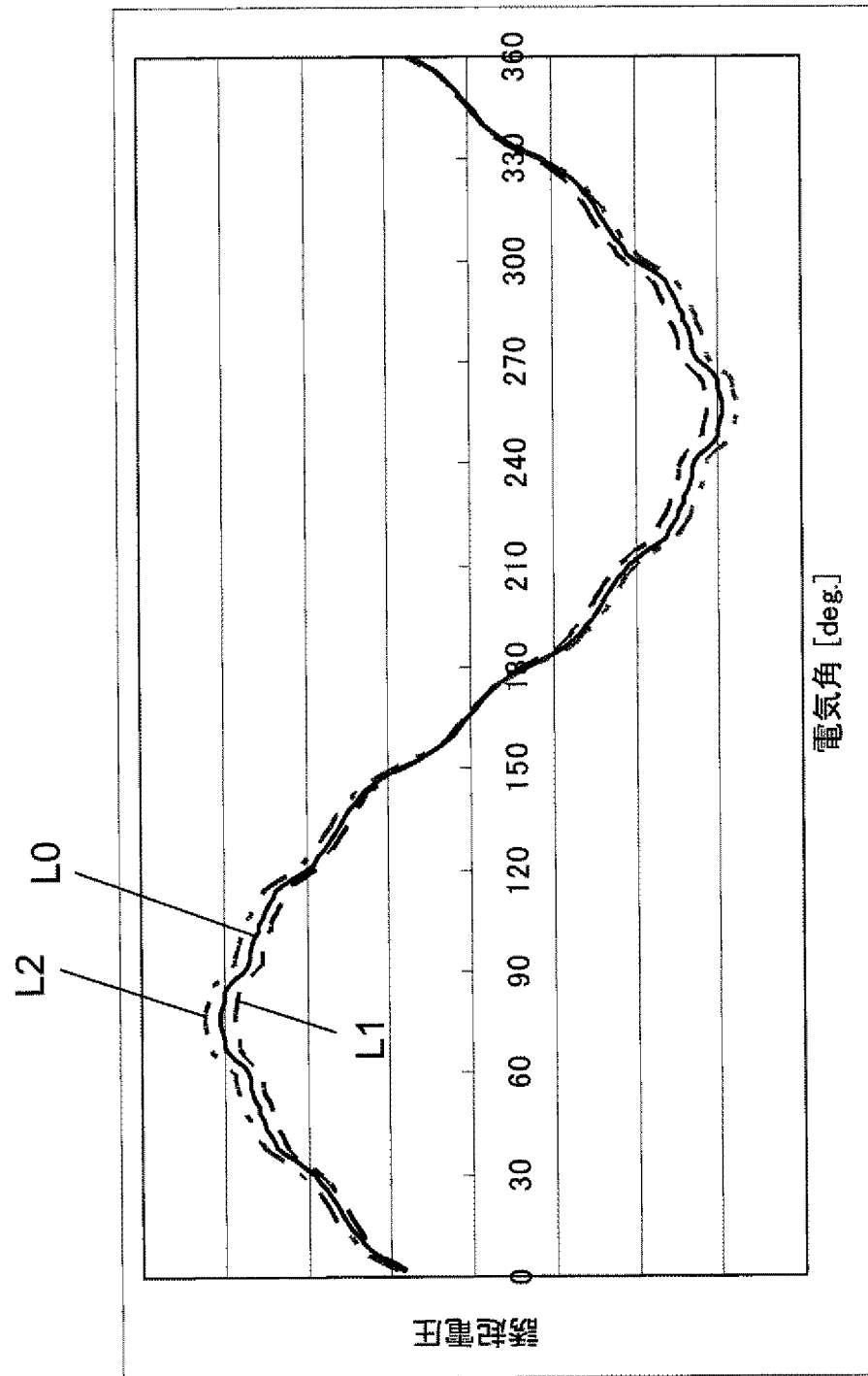


[図9]

【図9】

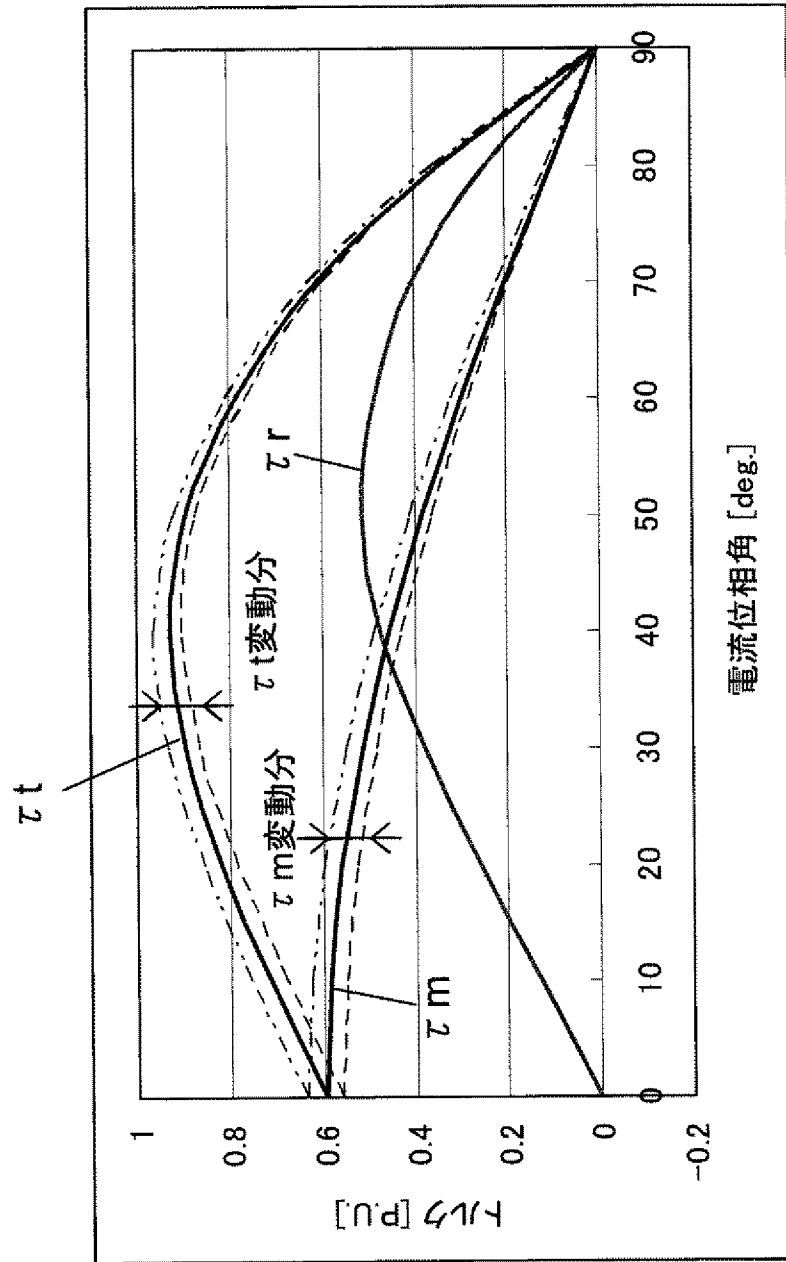


[図10]



【図10】

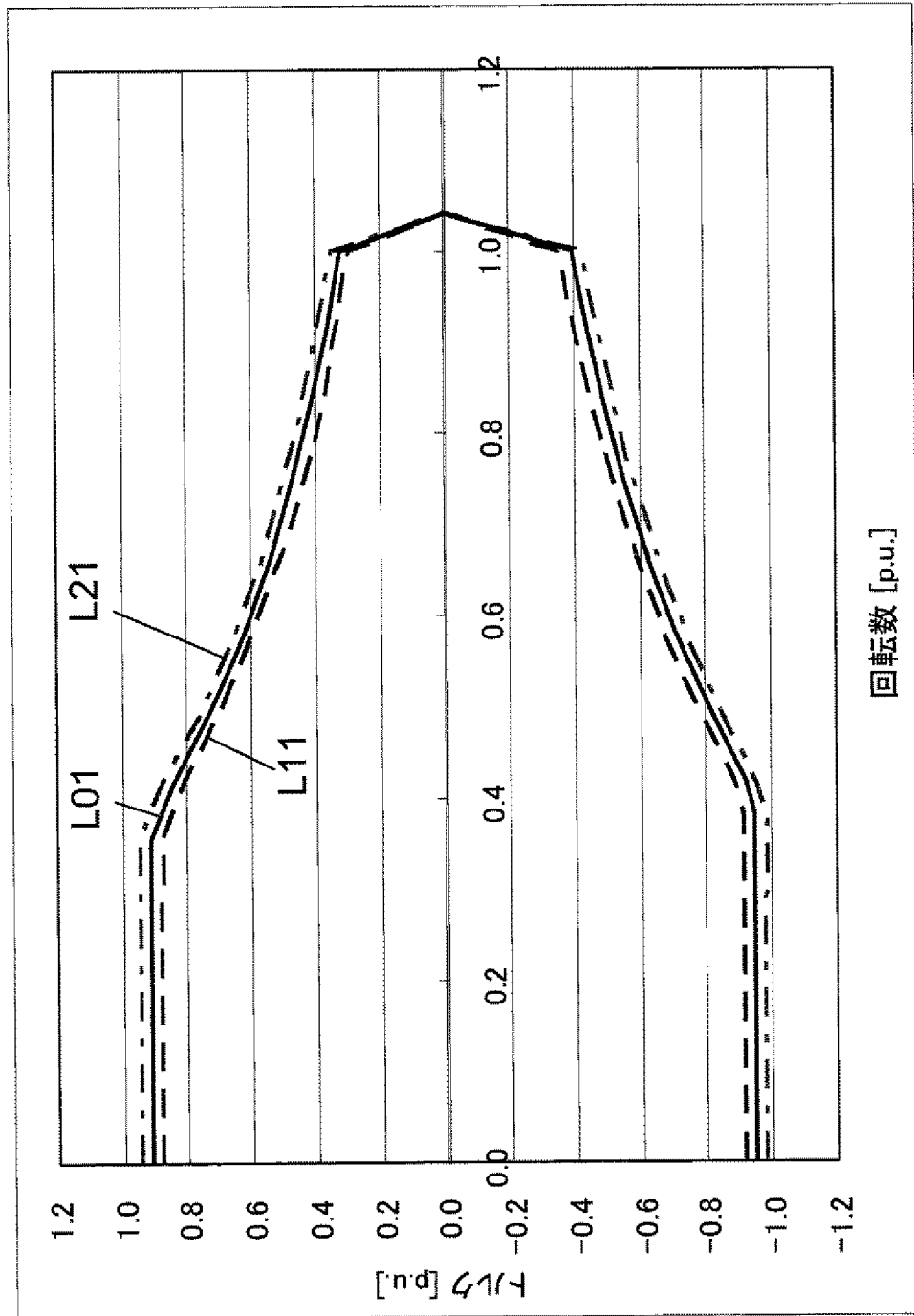
[図11]



【図11】

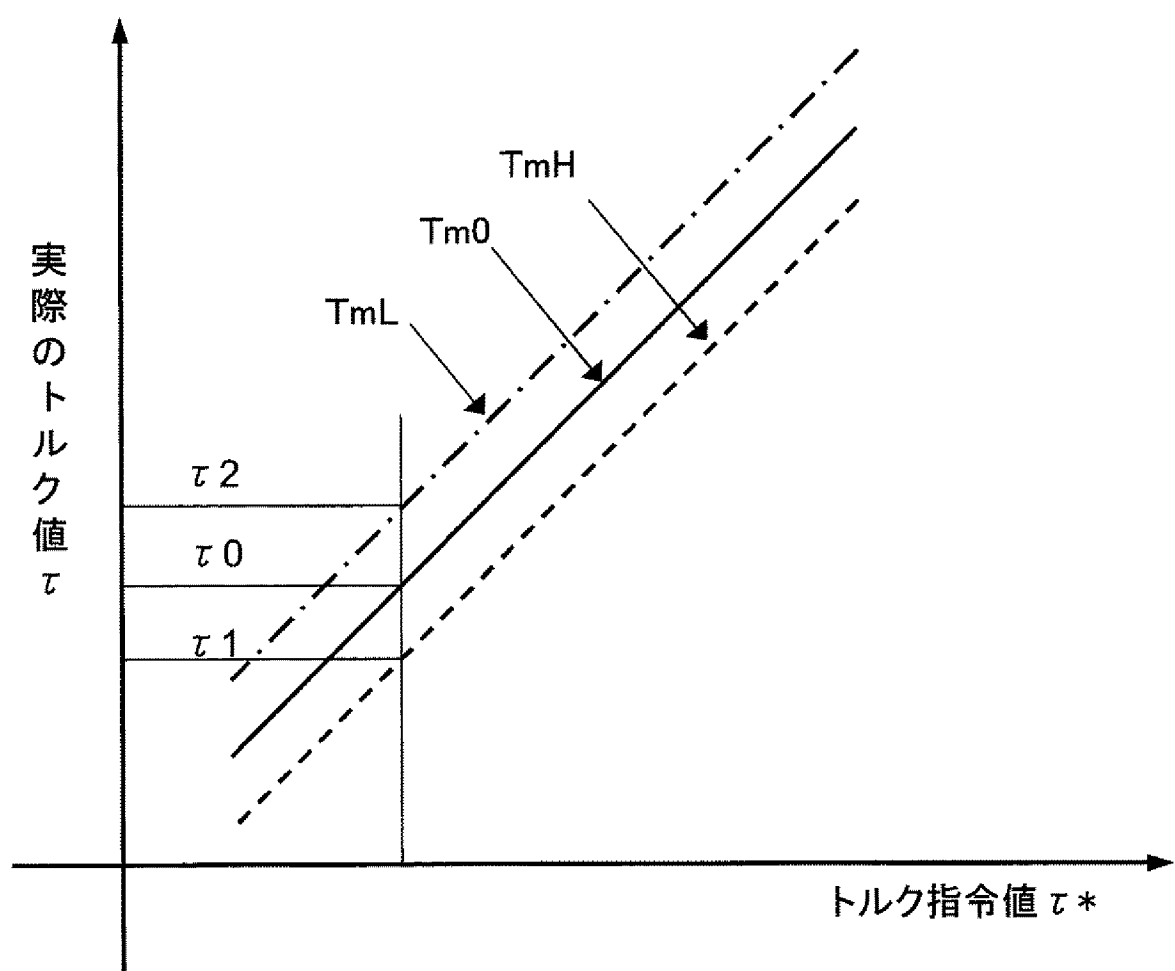
[図12]

【図12】

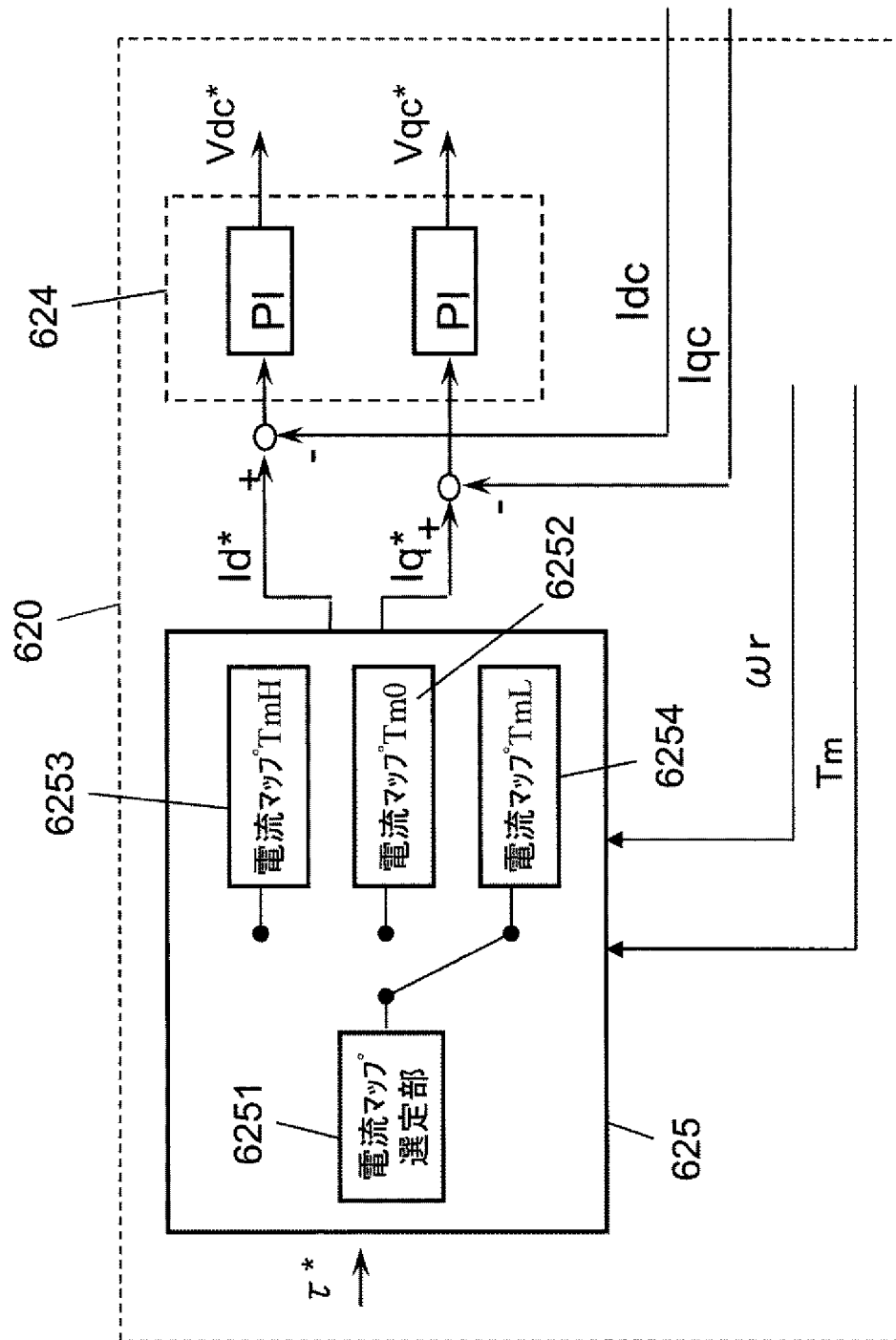


[図13]

【図13】

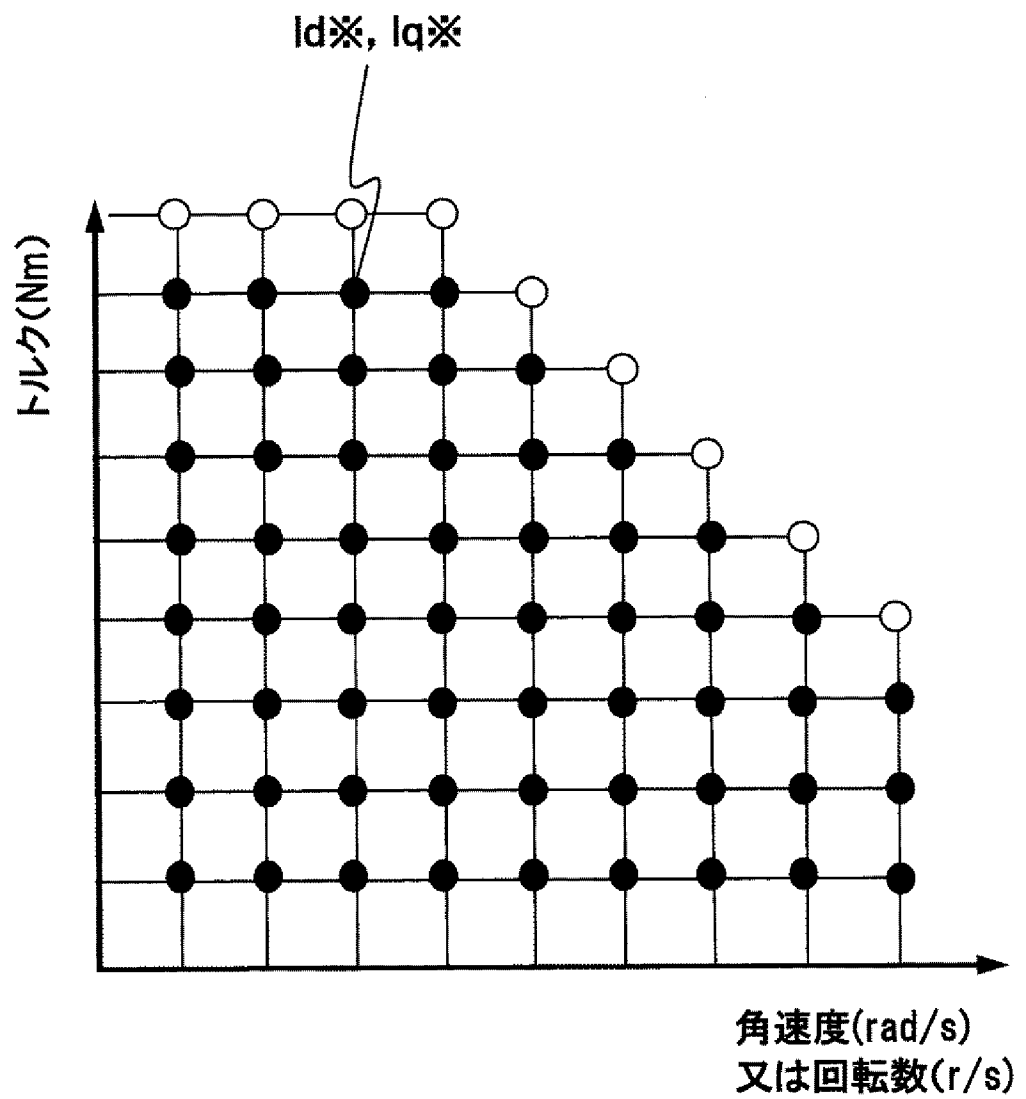


【図14】



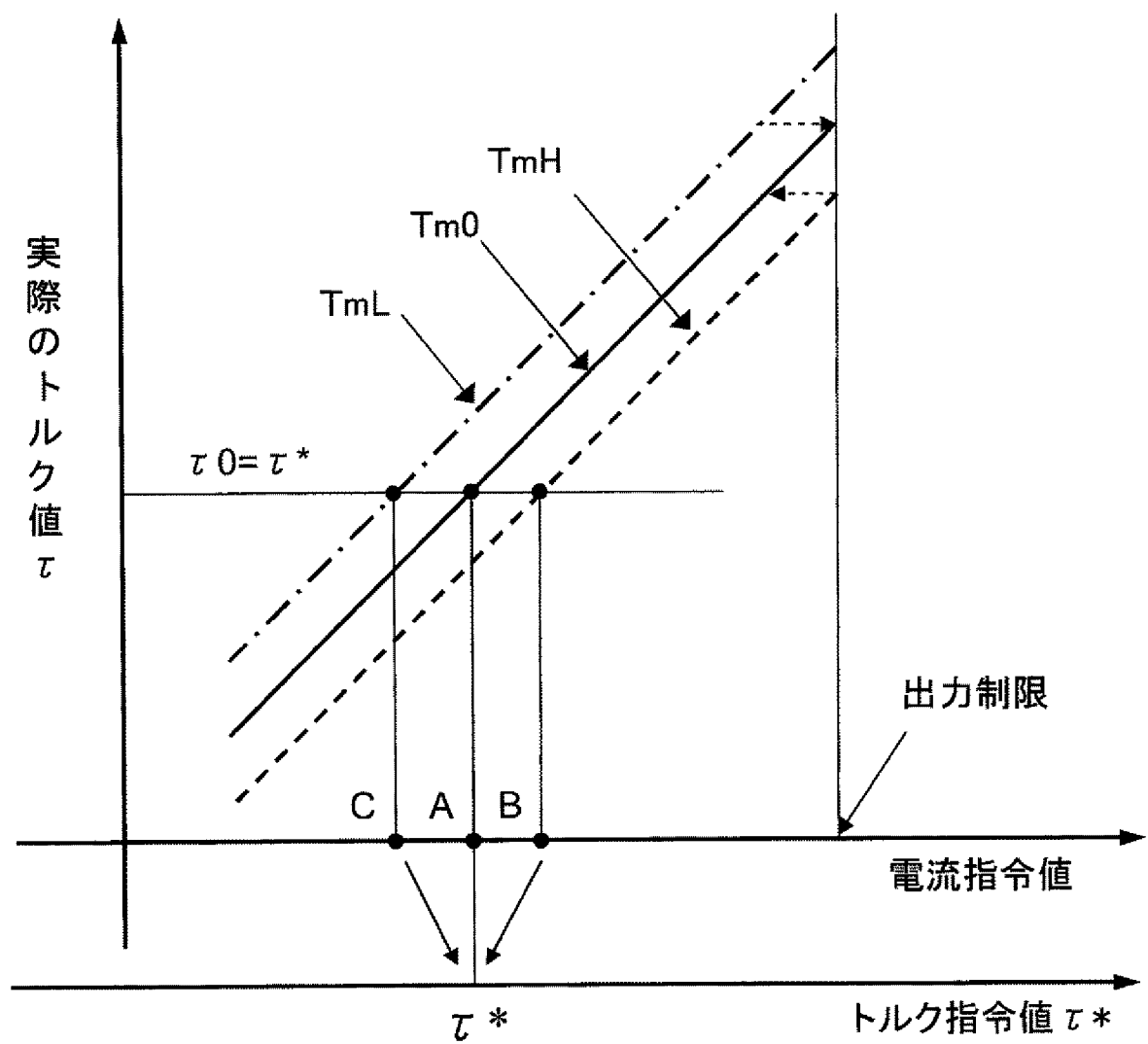
[図15]

【図15】



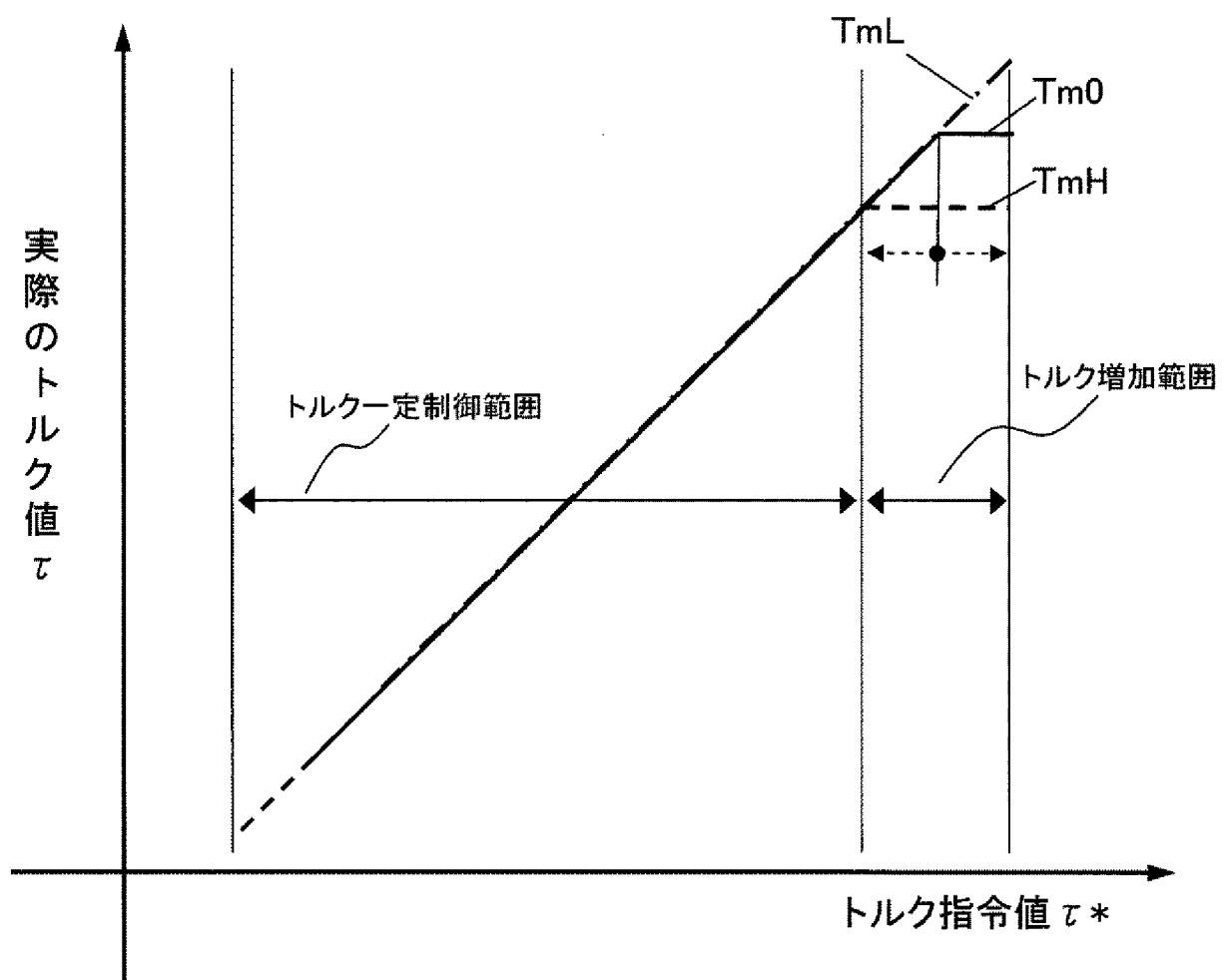
[図16]

【図16】



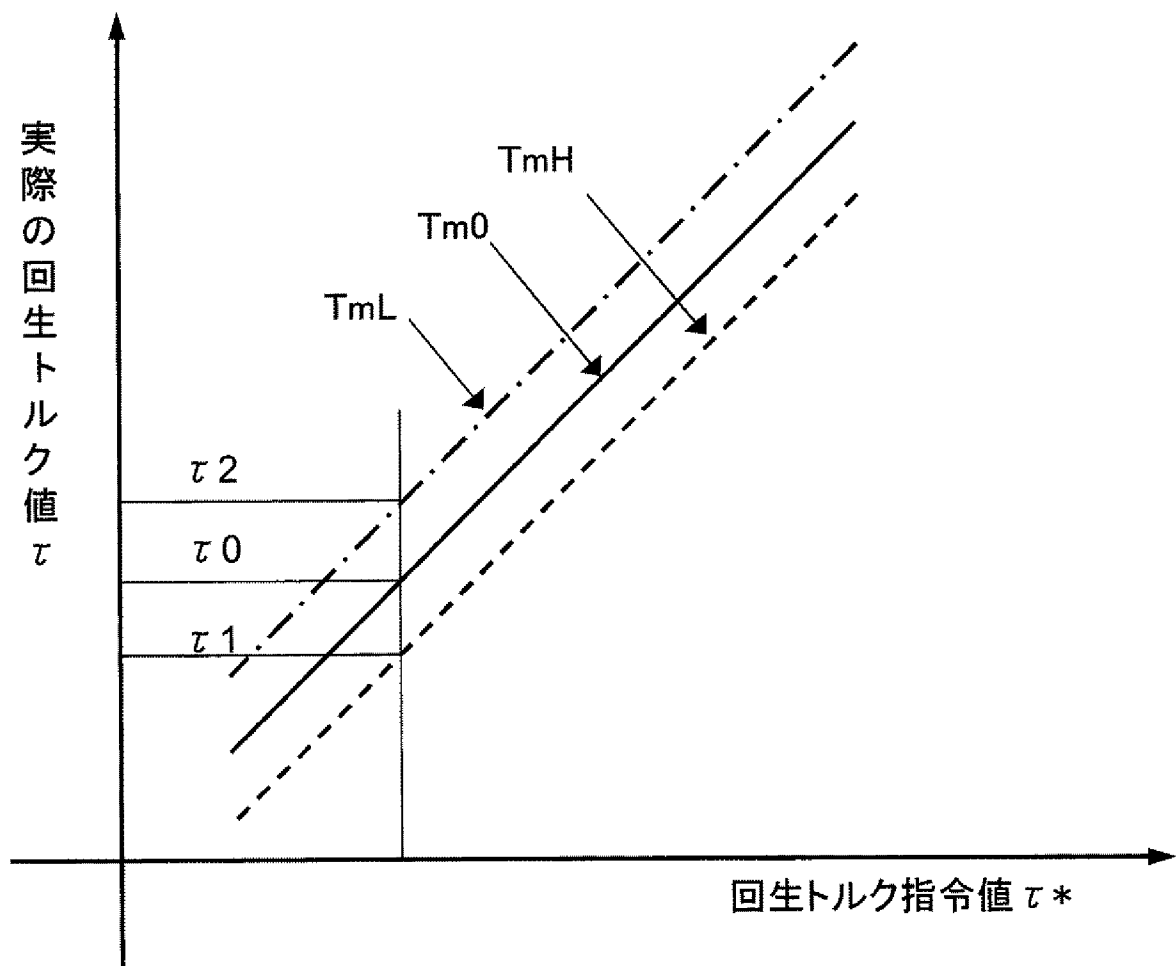
[図17]

【図17】



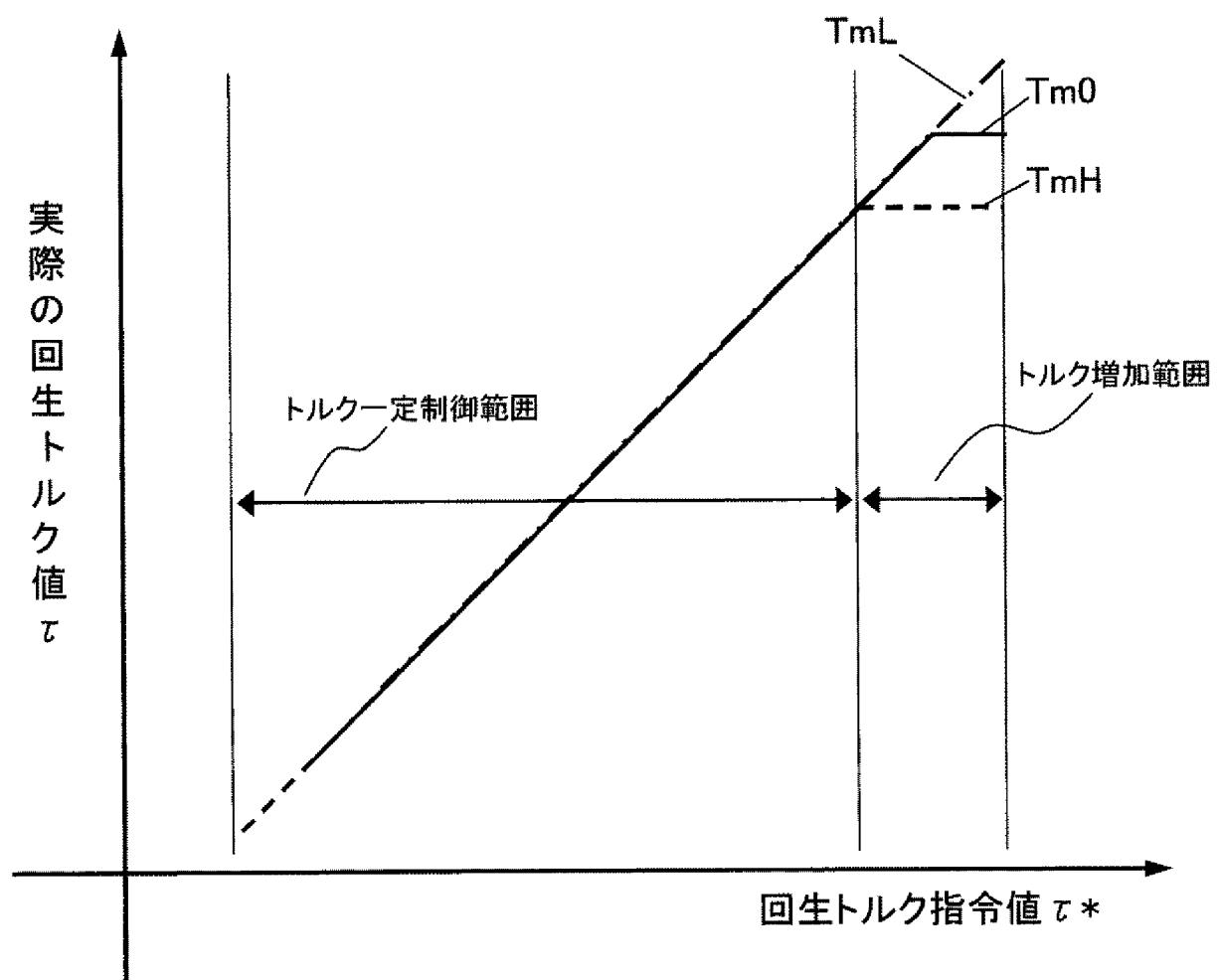
[図18]

【図18】



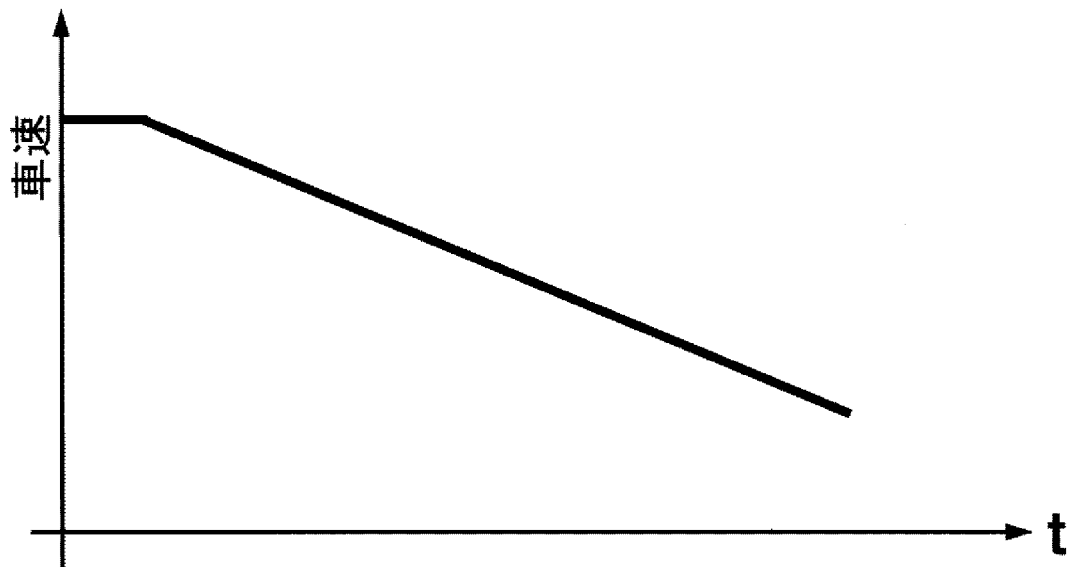
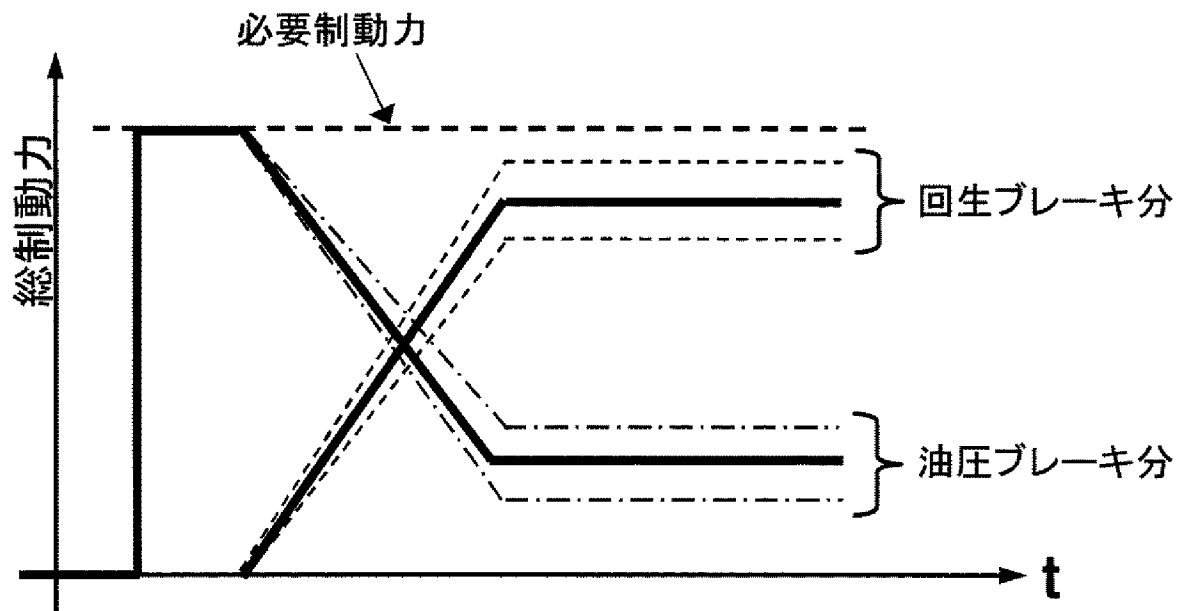
[図19]

【図19】



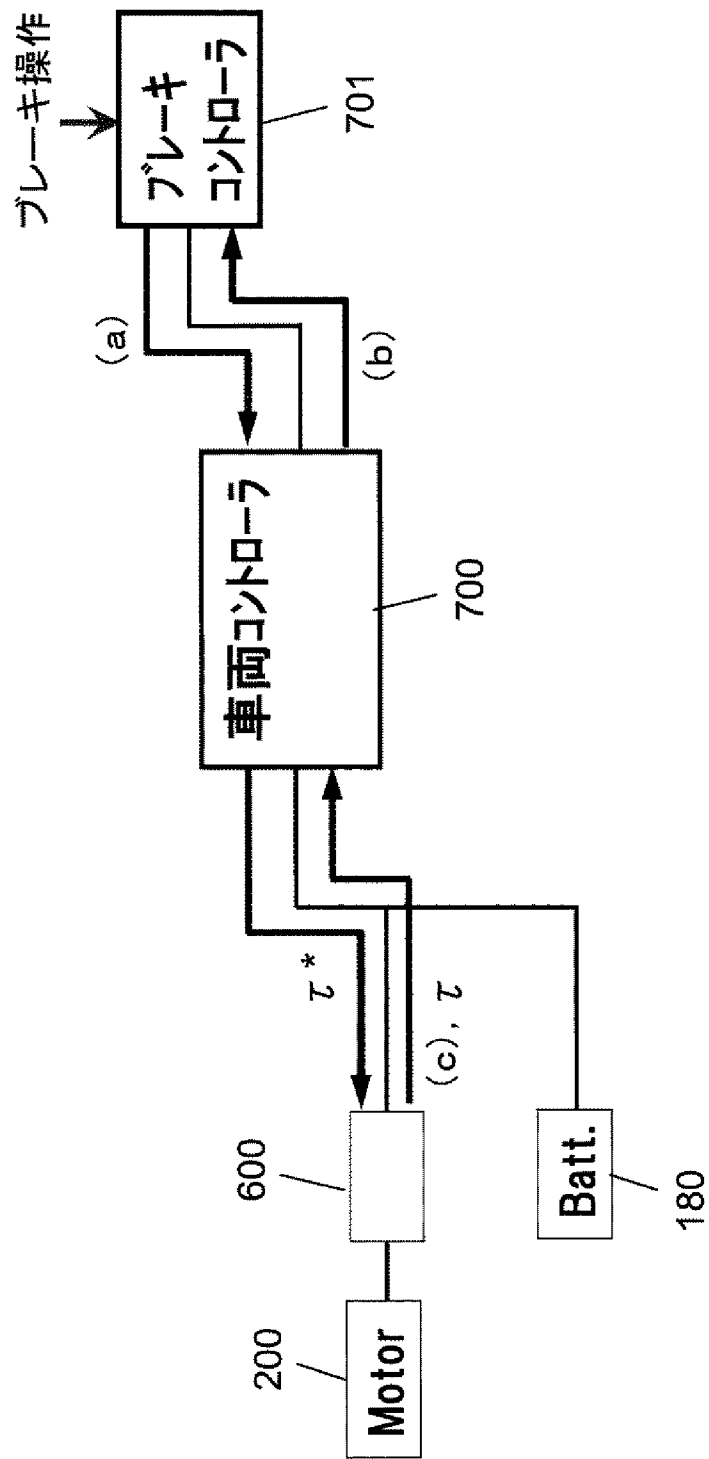
[図20]

【図20】



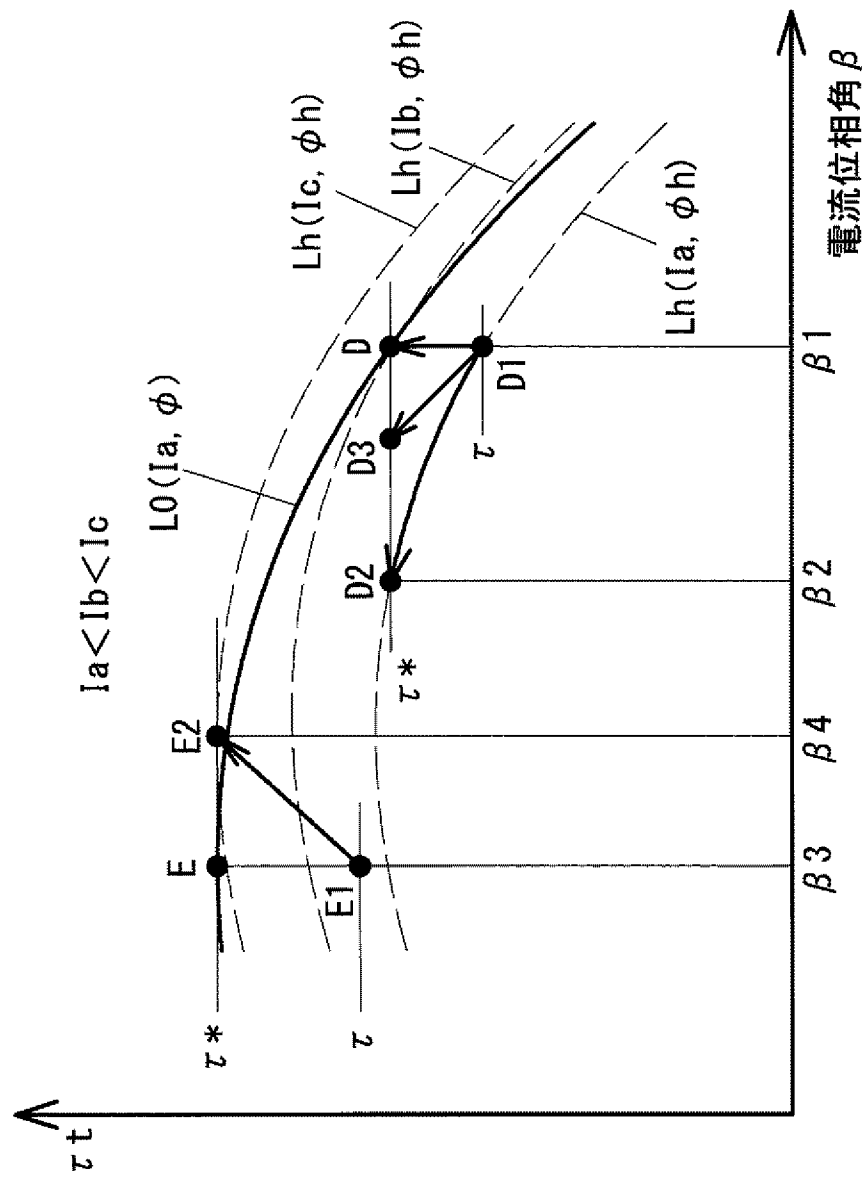
【図21】

【図21】



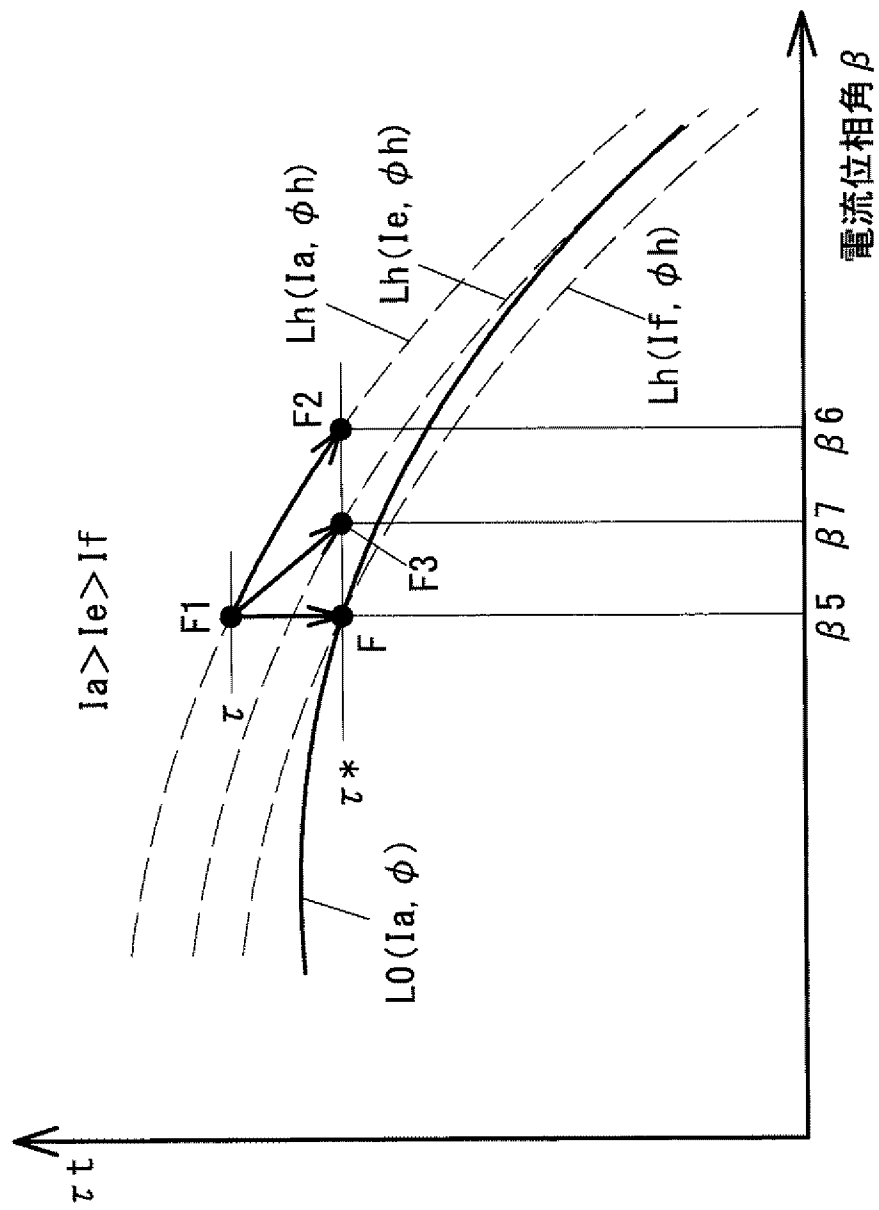
[図22]

【図22】



[図23]

【図23】



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/070271

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	1996-2013
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2013	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2013

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 8-331900 A (Meidensha Corp.), 13 December 1996 (13.12.1996), claims; paragraphs [0015], [0026], [0039] to [0047], [0064] to [0092]; fig. 1 to 15 (Family: none)	1 2-7
X Y A	JP 2003-235286 A (Nissan Motor Co., Ltd.), 22 August 2003 (22.08.2003), claims; paragraphs [0019] to [0032]; fig. 1 to 2 (Family: none)	1 2-4, 7 5-6
X Y A	JP 2003-47300 A (Toyota Motor Corp.), 14 February 2003 (14.02.2003), claims; paragraphs [0007], [0026] to [0036]; fig. 1 to 4 (Family: none)	1, 5-6 2-3 4, 7

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
21 October, 2013 (21.10.13)

Date of mailing of the international search report
29 October, 2013 (29.10.13)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/070271

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	JP 7-212915 A (Fuji Electric Co., Ltd.), 11 August 1995 (11.08.1995), claims; paragraphs [0002], [0013] to [0023]; fig. 1 to 7 (Family: none)	1 2-3 4-7
Y	JP 4-101692 A (Meidensha Corp.), 03 April 1992 (03.04.1992), claims; page 4, upper left column, line 13 to upper right column, line 4; page 5, upper right column, line 8 to page 6, upper left column, line 10; fig. 1 to 2 (Family: none)	2-4, 7
Y	JP 2000-270406 A (Nissan Motor Co., Ltd.), 29 September 2000 (29.09.2000), entire text; all drawings (Family: none)	4, 7

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

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（I P C））

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

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 3 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 3 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 3 年

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

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X A	JP 8-331900 A（株式会社明電舎）1996.12.13, 特許請求の範囲, 段落【0015】、【0026】、【0039】 - 【0047】、【0064】 - 【0092】、第1-15図（ファミリーなし）	1 2-7
X Y A	JP 2003-235286 A（日産自動車株式会社）2003.08.22, 特許請求の範囲, 段落【0019】 - 【0032】、第1-2図（ファミリーなし）	1 2-4, 7 5-6

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

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 1 . 1 0 . 2 0 1 3

国際調査報告の発送日

2 9 . 1 0 . 2 0 1 3

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

田村 耕作

3 V

9 6 1 8

電話番号 03-3581-1101 内線 3358

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
X Y A	JP 2003-47300 A (トヨタ自動車株式会社) 2003.02.14, 特許請求の範囲, 段落【0007】, 【0026】 - 【0036】, 第 1-4 図 (ファミリーなし)	1, 5-6 2-3 4, 7
X Y A	JP 7-212915 A (富士電機株式会社) 1995.08.11, 特許請求の範囲, 段落【0002】, 【0013】 - 【0023】, 第 1-7 図 (ファミリーなし)	1 2-3 4-7
Y	JP 4-101692 A (株式会社明電舎) 1992.04.03, 特許請求の範囲, 第 4 ページ左上欄第 13 行-右上欄第 4 行, 第 5 ページ右上欄第 8 行-第 6 ページ左上欄第 10 行, 第 1-2 図 (ファミリーなし)	2-4, 7
Y	JP 2000-270406 A (日産自動車株式会社) 2000.09.29, 全文, 全図 (ファミリーなし)	4, 7