

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4017383号
(P4017383)

(45) 発行日 平成19年12月5日(2007.12.5)

(24) 登録日 平成19年9月28日(2007.9.28)

(51) Int. Cl. F I
F 1 6 C 32/04 (2006.01) F 1 6 C 32/04 A
H 0 2 K 7/09 (2006.01) H 0 2 K 7/09

請求項の数 2 (全 11 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2001-369694 (P2001-369694) (22) 出願日 平成13年12月4日(2001.12.4) (65) 公開番号 特開2003-172354 (P2003-172354A) (43) 公開日 平成15年6月20日(2003.6.20) 審査請求日 平成16年12月1日(2004.12.1)</p>	<p>(73) 特許権者 598021579 BOCエドワーズ株式会社 東京都千代田区有楽町一丁目9番4号 蚕糸会館 (74) 代理人 100105201 弁理士 椎名 正利 (72) 発明者 川島 敏明 千葉県千葉市美浜区中瀬1丁目8番地 セイコーインスツルメンツ株式会社内 審査官 瀬川 裕</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気軸受制御装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

回転体と、

該回転体の半径方向位置及び/又は軸方向位置を検出する位置検出手段と、
 該位置検出手段で検出された半径方向位置及び/又は軸方向位置を基に該半径方向位置及び/又は軸方向位置を電磁石により制御する磁気軸受手段と、
 前記電磁石と電源との間を断接するスイッチング素子を含む励磁回路と、
 前記電磁石を流れる電流を検出する電磁石電流検出手段と、
 該電磁石電流検出手段で検出された検出電流値と電流指令値との電流誤差を算出する電流誤差算出手段と、
 前記電磁石を流れる電流の大きさに対し前記電磁石のインダクタンスを補正する係数が予め関連付けされた関連付け手段と、
 該関連付け手段を基に前記検出電流値から前記係数を算出する係数算出手段と、
 該係数算出手段で算出した係数を基に前記電流誤差を補正する補正手段と、
 該補正手段による補正された出力値を基に前記スイッチング素子をパルス制御するパルス幅を演算するパルス幅演算手段とを備えたことを特徴とする磁気軸受制御装置。

【請求項2】

回転体と、

該回転体の半径方向位置及び/又は軸方向位置を検出する位置検出手段と、
 該位置検出手段で検出された半径方向位置及び/又は軸方向位置を基に該半径方向位置及

びノ又は軸方向位置を電磁石により制御する磁気軸受手段と、
 前記電磁石と電源との間を断接するスイッチング素子を含む励磁回路と、
 前記電磁石を流れる電流を検出する電磁石電流検出手段と、
 該電磁石電流検出手段で検出された検出電流値と電流指令値との電流誤差を算出する電流誤差算出手段と、
 前記位置検出手段で検出された前記回転体の位置から前記電磁石及び前記回転体間のエアギャップ長を算出するエアギャップ長算出手段と、
 前記エアギャップ長に対し前記電磁石のインダクタンスを補正する係数が予め関連付けされた関連付け手段と、
 該関連付け手段を基に前記エアギャップ長算出手段で算出されたエアギャップ長から前記係数を算出する係数算出手段と、
 該係数算出手段で算出した係数を基に前記電流誤差を補正する補正手段と、
 該補正手段による補正された出力値を基に前記スイッチング素子をパルス制御するパルス幅を演算するパルス幅演算手段とを備えたことを特徴とする磁気軸受制御装置。

10

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は磁気軸受制御装置に係わり、特に電磁石電流の応答性を改善した磁気軸受制御装置に関する。

【0002】

20

【従来の技術】

磁気軸受は半導体製造工程で使用されるターボ分子ポンプ等の回転機器に使用される。ターボ分子ポンプの磁気軸受の構成例に基づき、従来の磁気軸受励磁回路について説明する。

【0003】

磁気軸受の構成例としてターボ分子ポンプの断面図を図4に示す。
 図4において、ターボ分子ポンプは、ガスを排気するためのタービンプレードによる複数の回転翼101a、101b、101c...を多段に備えた回転体103を備える。

【0004】

この回転体103を軸承するために、上側ラジアル方向電磁石105a、下側ラジアル方向電磁石107a及びアキシャル方向電磁石109aを配設することにより磁気軸受が構成されている。また、上側ラジアル方向センサ105b、下側ラジアル方向センサ107b、アキシャル方向センサ109bを備える。

30

【0005】

上側ラジアル方向電磁石105a及び下側ラジアル方向電磁石107aは、それぞれの横断面図を示す図5のように構成された電磁石巻線により4個の電磁石が構成される。これらの4個の電磁石は、2個ずつ対向配置され、X軸方向及びY軸方向の2軸の磁気軸受を構成する。

【0006】

詳細には、隣接する2個のコア凸部にそれぞれ巻回された電磁石巻線111、111を1組として互いに逆極性に配置することにより1つの電磁石が形成される。この電磁石は、回転体103を挟んで対向するコア凸部の電磁石巻線113、113による電磁石と1つの対を構成し、それぞれが回転体103をX軸の正方向又は負方向に吸引する。

40

【0007】

また、X軸と直交するY軸方向においては、2個の電磁石巻線115、115と、これに対向する2個の電磁石巻線117、117についても、上記同様に、Y軸方向について対向する電磁石として1つの対を構成する。

【0008】

アキシャル方向電磁石109a、109aは、その縦断面図を示す図6のように、回転体103のアーマチャ103aを挟む2つの電磁石巻線121、123により、1つの対と

50

して構成される。各電磁石巻線 121、123 による 2 個の電磁石 109a、109a は、それぞれアーマチャ 103a を回転軸線の正方向又は負方向に吸引力を作用する。

【0009】

また、上側ラジアル方向センサ 105b、下側ラジアル方向センサ 107b は、上記電磁石 105a、107a と対応する X Y 2 軸に配置された 4 個のセンシングコイルからなり、回転体 103 の径方向変位を検出する。アキシャル方向センサ 109b は回転体 103 の軸方向変位を検出する。これらセンサは、それぞれの検出信号を図示せぬ磁気軸受制御装置に送るように構成されている。

【0010】

これらのセンサ検出信号に基づき、磁気軸受制御装置が P I D 制御等により上側ラジアル方向電磁石 105a、下側ラジアル方向電磁石 107a 及びアキシャル方向電磁石 109a、109a を構成する計 10 個の電磁石の吸引力を個々に調節することにより、回転体 103 を磁気浮上支持するように構成されている。

【0011】

次に、上述のように構成される磁気軸受の各電磁石を励磁駆動する磁気軸受励磁回路について説明する。電磁石巻線に流れる電流をパルス幅変調方式により制御する磁気軸受励磁回路の例を図 7 に示す。

【0012】

図 7 において、1 個の電磁石を構成する電磁石巻線 111 は、その一端がトランジスタ 131 を介して電源 133 の正極に接続され、他端がトランジスタ 132 を介して電源 133 の負極に接続されている。

【0013】

そして、電流回生用のダイオード 135 のカソードが電磁石巻線 111 の一端に接続され、アノードが電源 133 の負極に接続されている。同様に、ダイオード 136 のカソードが電源 133 の正極に接続され、アノードが電磁石巻線 111 の他端に接続されている。電源 133 の正極と負極間には安定化のため電解コンデンサ 141 が接続されている。

【0014】

また、トランジスタ 132 のソース側には電流検出回路 139 が介設され、この電流検出回路 139 で検出された電流が制御回路 137 に入力されるようになっている。

【0015】

以上のように構成される励磁回路 110 は、電磁石巻線 111 に対応されるものであり、他の電磁石巻線 113、115、117、121、123 に対しても同じ励磁回路 110 が構成される。従って、5 軸制御型磁気軸受の場合には、合計 10 個の励磁回路 110 が電解コンデンサ 141 と並列に接続されている。

【0016】

かかる構成において、トランジスタ 131、132 の両方を on すると電流が増加し、両方を off すると電流が減少する。そして、どちらか 1 個 on するとフライホイール電流が保持される。フライホイール電流を流すことで、ヒステリシス損を減少させ、消費電力を低く抑えることができる。

【0017】

また、高調波等の高周波ノイズを低減できる。そして、このフライホイール電流を電流検出回路 139 で測定することで電磁石巻線 111 を流れる電磁石電流 I_L が検出可能である。制御回路 137 は、電流指令値と電流検出回路 139 による検出値とを比較してパルス幅変調による 1 周期内のパルス幅を決め、トランジスタ 131、132 のゲートに信号送出する。

【0018】

電流指令値が検出値より大きい場合には、図 8 に示すように 1 周期 T_s (例えば $T_s = 100 \mu s$) 中で 1 回だけパルス幅時間 T_{p1} に相当する時間分、トランジスタ 131、132 の両方を on する。このとき電磁石電流 I_L が増加する。

【0019】

10

20

30

40

50

一方、電流指令値が検出値より小さい場合には、図9に示すように1周期 T_s 中で1回だけパルス幅時間 T_p に相当する時間分、トランジスタ131、132の両方をoffする。このとき電磁石電流 I_L が減少する。

【0020】

ここに、パルス幅 T_p は電流指令値 I_R 、電磁石電流 I_L 、電磁石インダクタンス L_m 、電磁石抵抗 R_m 、電源電圧 V_d から求める。キルヒホッフの法則によれば、電磁石巻線111を流れる電磁石電流 I_L と電源電圧 V_d の間には、数1が成立する。

【0021】

【数1】

$$L_m \times \frac{dI_L}{dt} = V_d - I_L \times R_m$$

10

【0022】

従って、 $I_R - I_L$ だけ電流値を変化させるのに必要なパルス幅 T_p は、数2のように求められる。

【0023】

【数2】

$$T_p = \frac{L_m \times (I_R - I_L)}{V_d - I_L \times R_m}$$

20

【0024】

このように、励磁回路110をデジタル制御する場合、電磁石巻線111及びケーブルの抵抗とインダクタンス値を定数として補正演算し、電磁石電流 I_L の電流指令値 I_R に対する応答性を改善することができる(特許第3176584号公報)。

【0025】

【発明が解決しようとする課題】

ところで、磁気軸受は回転体103が目標位置から変位した場合、電磁石巻線111の定常電流が変化して、回転体103を目標位置に引き戻す。その際、定常電流が変化すると電磁石のインダクタンス値は大きく変化する。そのため、デジタル制御で電磁石のインダクタンス値を定数として補正演算しても補正誤差が生じ、電磁石電流の応答性が十分改善されない場合があった。

30

【0026】

本発明はこのような従来の課題に鑑みてなされたもので、電磁石電流の応答性を改善した磁気軸受制御装置を提供することを目的とする。

【0027】

【課題を解決するための手段】

このため本発明は、回転体と、該回転体の半径方向位置及び/又は軸方向位置を検出する位置検出手段と、該位置検出手段で検出された半径方向位置及び/又は軸方向位置を基に該半径方向位置及び/又は軸方向位置を電磁石により制御する磁気軸受手段と、前記電磁石と電源との間を断接するスイッチング素子を含む励磁回路と、前記電磁石を流れる電流を検出する電磁石電流検出手段と、該電磁石電流検出手段で検出された検出電流値と電流指令値との電流誤差を算出する電流誤差算出手段と、前記電磁石を流れる電流の大きさに対し前記電磁石のインダクタンスを補正する係数が予め関連付けされた関連付け手段と、該関連付け手段を基に前記検出電流値から前記係数を算出する係数算出手段と、該係数算出手段で算出した係数を基に前記電流誤差を補正する補正手段と、該補正手段による補正された出力値を基に前記スイッチング素子をパルス制御するパルス幅を演算するパルス幅演算手段とを備えて構成した。

40

【0028】

関連付け手段では、電磁石を流れる電流の大きさに対し電磁石のインダクタンスを補正する係数を予め関連付けする。この関連付けは、特性曲線としてメモリ等に記憶されてもよ

50

いし、折れ線グラフとして近似された形で記憶されてもよい。

【0029】

また、テーブルにより記憶されてもよい。この関連付けから、検出された電磁石電流の大きさを基に電磁石インダクタンスを補正するための係数を算出する。この係数を基に、検出電流値と電流指令値との電流誤差が補正される。そして、この補正結果を基にパルス幅が演算される。

【0030】

以上により、電磁石電流の応答性が改善される。このため、回転体は発振しにくくなり、回転体の制御剛性を高くできる。回転体が外乱で変位した場合の収束が改善される。

【0031】

また、本発明は、回転体と、該回転体の半径方向位置及びノ又は軸方向位置を検出する位置検出手段と、該位置検出手段で検出された半径方向位置及びノ又は軸方向位置を基に該半径方向位置及びノ又は軸方向位置を電磁石により制御する磁気軸受手段と、前記電磁石と電源との間を断接するスイッチング素子を含む励磁回路と、前記電磁石を流れる電流を検出する電磁石電流検出手段と、該電磁石電流検出手段で検出された検出電流値と電流指令値との電流誤差を算出する電流誤差算出手段と、前記位置検出手段で検出された前記回転体の位置から前記電磁石及び前記回転体間のエアギャップ長を算出するエアギャップ長算出手段と、前記エアギャップ長に対し前記電磁石のインダクタンスを補正する係数が予め関連付けされた関連付け手段と、該関連付け手段を基に前記エアギャップ長算出手段で算出されたエアギャップ長から前記係数を算出する係数算出手段と、該係数算出手段で算出した係数を基に前記電流誤差を補正する補正手段と、該補正手段による補正された出力値を基に前記スイッチング素子をパルス制御するパルス幅を演算するパルス幅演算手段とを備えて構成した。

【0032】

位置検出手段で検出された回転体の位置から電磁石及び回転体間のエアギャップ長を算出する。関連付け手段では、エアギャップ長に対し電磁石のインダクタンスを補正する係数を予め関連付けしておく。この関連付けは、特性曲線としてメモリ等に記憶されてもよいし、折れ線グラフとして近似された形で記憶されてもよい。

【0033】

また、テーブルにより記憶されてもよい。係数算出手段では、関連付け手段を基に、エアギャップ長算出手段で算出されたエアギャップ長から係数を算出する。そして、この係数を基に電流誤差を補正する。この補正結果を基にパルス幅が演算される。

【0034】

以上により、電磁石電流の応答性が改善される。なお、本発明を請求項1の構成と組み合わせることにより一層の効果を得ることができる。

【0035】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施形態について説明する。本発明の実施形態の全体構成図は図7と同じである。

まず、電流指令値IRが検出された電磁石電流ILより大きい場合(モード1)について、数1を基に制御回路137のソフトウェアにより展開された演算式は数3のようになる。

【0036】

【数3】

$$\hat{I}L(n+1) = \frac{P(n) \times Vd \times Tp(n)}{Lm} + \frac{(Lm - RmTs)}{Lm} IL(n) \quad (P(n) = 1.0)$$

【0037】

ここに、P(n)は極性であり、IL(記号ハット)(n+1)はタイミングnの次のタイミングにおける電磁石電流の推定値を意味する。同様に、電流指令値IRが検出された

10

20

30

40

50

電磁石電流 I_L より小さい場合 (モード 2) における制御回路 137 のソフトウェアにより展開される演算式は数 4 のようになる。

【0038】

【数 4】

$$\hat{I}_L(n+1) = \frac{P(n) \times V_d \times T_p(n)}{L_m} + \frac{(L_m - R_m T_s)}{L_m} I_L(n) \quad (P(n) = -1.0)$$

【0039】

従って、数 3 と数 4 より数 5 が成立する。

【0040】

【数 5】

$$\hat{I}_L(n+1) = I_L(n) \text{ の場合、 } T_p(n) = \frac{I_L(n) R_m T_s}{V_d}$$

【0041】

これより、タイミング n におけるパルス幅 $T_p(n)$ が小だとモード 1 でも電流が減る。また、数 6 が成立する。

【0042】

【数 6】

$$T_p = 0 \text{ の場合、 } \Delta I = \frac{R_m T_s}{L_m} I_L(n)$$

【0043】

パルス幅 $T_p(n+1)$ をまとめなおすと、数 7 のようになる。

【0044】

【数 7】

$$T_p(n+1) = P(n+1) \frac{K_A \times L_m}{V_d} \left\{ I_R(n+1) - \frac{P(n) \times V_d \times T_p(n)}{L_m} - \frac{L_m - 2R_m T_s}{L_m} I_L(n) \right\}$$

【0045】

但し、 K_A はフィードバックゲイン、電流指令値 $I_R(n+1)$ はタイミング n の次のタイミングにおける電流指令値、 $I_L(n)$ は今回実測された電磁石電流値である。

【0046】

この $P(n+1)$ の極性をパルス幅 $T_p(n+1)$ が正になるようにすればよい。従って、 $P(n+1) > 0$ ならばモード 1 とし、一方 $P(n+1) = 0$ ならばモード 2 とする。

【0047】

電磁石インダクタンス L_m はコイル巻数 N 、ギャップ長 l 、ギャップ面積 S 、透磁率 μ を用いて数 8 のように導出される。

【0048】

【数 8】

$$L_m = N^2 \frac{S}{l} \mu$$

$$\mu = f(i)$$

【0049】

ここに、透磁率 μ はヒステリシス特性により、電磁石電流 I_L により大きく変化するので、パルス幅 $T_p(n+1)$ を別の形に表現すると、数 9 のようになる。

【0050】

【数 9】

10

20

30

40

$$Tp(n+1) = P(n+1) \frac{KA \times Lo}{Vd} \left\{ (IR(n+1) - IL(n)) \times KL - \frac{P(n) \times Vd \times Tp(n)}{Lo} + \frac{2RmTs}{Lo} IL(n) \right\}$$

【0051】

KLはインダクタンス補正ゲインで、検出される電磁石電流ILの大きさにより電磁石インダクタンスの基準値Loを補正するための補正係数である。電磁石電流ILの定常電流値が大きいほど電磁石インダクタンスLmが減少するので、インダクタンス補正ゲインを減少させる必要がある。

【0052】

KLと電磁石電流ILの関係を図1に示す。但し、この関係曲線は、折れ線グラフとして近似的に示されてもよい。又は、この関係をテーブル化してメモリに記憶するようにしてもよい。

10

【0053】

このように、検出される電磁石電流ILの大きさにより電磁石インダクタンスLmを補正してパルス幅Tpを算出することで、電磁石電流ILの応答性が改善される。応答性が改善されるので、回転体103は発振しにくくなり、回転体103の制御剛性を高くできる。回転体103が外乱で変位した場合の収束が改善される。

【0054】

なお、電磁石インダクタンスLmとエアギャップ長lには、数8の通り逆数の関係がある。従って、回転体103の位置に応じてエアギャップ長lが変化することによる電磁石インダクタンスLmの変化を補正した方が好ましい。

20

そのため、数9を更に数10のように拡張する。

【0055】

【数10】

$$Tp(n+1) = P(n+1) \frac{KA \times Lo}{Vd} \left\{ (IR(n+1) - IL(n)) \times KL \times Kg - \frac{P(n) \times Vd \times Tp(n)}{Lo} + \frac{2RmTs}{Lo} IL(n) \right\}$$

【0056】

ここでKgはエアギャップ長lに対するインダクタンス補正ゲインである。Kgとエアギャップ長lの関係を図2に示す。但し、この関係曲線は、折れ線グラフとして近似的に示されてもよい。又は、この関係をテーブル化してメモリに記憶するようにしてもよい。

30

【0057】

また、このエアギャップ長lは、図3のように、回転体103の位置とエアギャップ長lの関係を予めグラフ化しておくことにより、上側ラジアル方向センサ105b、下側ラジアル方向センサ107b、アキシアル方向センサ109bで取得した回転体103の位置から簡単に求めることができる。

【0058】

このように、エアギャップ長lの大きさにより電磁石インダクタンスLmを補正してパルス幅Tpを算出することで、電磁石電流ILの応答性が改善される。更に、数10に示すように、電磁石インダクタンスLmの補正を、先述の電磁石電流ILの大きさによる補正（インダクタンス補正ゲインKL）と共に、エアギャップ長lの大きさによる補正（インダクタンス補正ゲインKg）も同時に行うことで電磁石電流ILの応答性は一層改善される。

40

【0059】

【発明の効果】

以上説明したように本発明によれば、関連付け手段により検出された電磁石電流の大きさを基に電磁石インダクタンスを補正し、この補正結果を基にパルス幅を演算するように構成したので、電磁石電流の応答性が改善される。このため、回転体は発振しにくくなり、回転体の制御剛性を高くできる。回転体が外乱で変位した場合の収束が改善される。

【図面の簡単な説明】

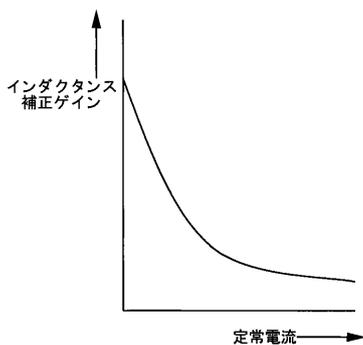
50

- 【図1】 インダクタンス補正ゲイン K_L と電磁石電流の関係を示す図
- 【図2】 インダクタンス補正ゲイン K_g とエアギャップ長 l の関係を示す図
- 【図3】 回転体の位置とエアギャップ長 l の関係を示す図
- 【図4】 ターボ分子ポンプの断面図
- 【図5】 ラジアル方向電磁石の横断面図
- 【図6】 アキシャル方向電磁石の縦断面図
- 【図7】 磁気軸受励磁回路の例
- 【図8】 電流指令値が検出値より大きい場合の制御を示すタイムチャート
- 【図9】 電流指令値が検出値より小さい場合の制御を示すタイムチャート

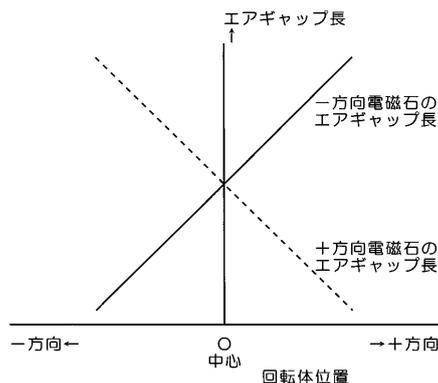
【符号の説明】

- 103 回転体
- 110 励磁回路
- 131、132 トランジスタ
- 105a 上側ラジアル方向電磁石
- 107a 下側ラジアル方向電磁石
- 109a アキシャル方向電磁石
- 111、113、115、117、121、123 電磁石巻線

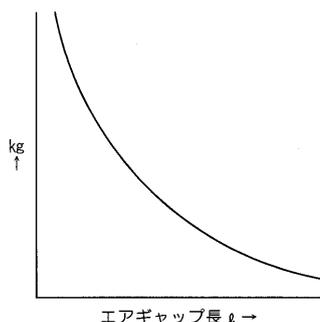
【図1】



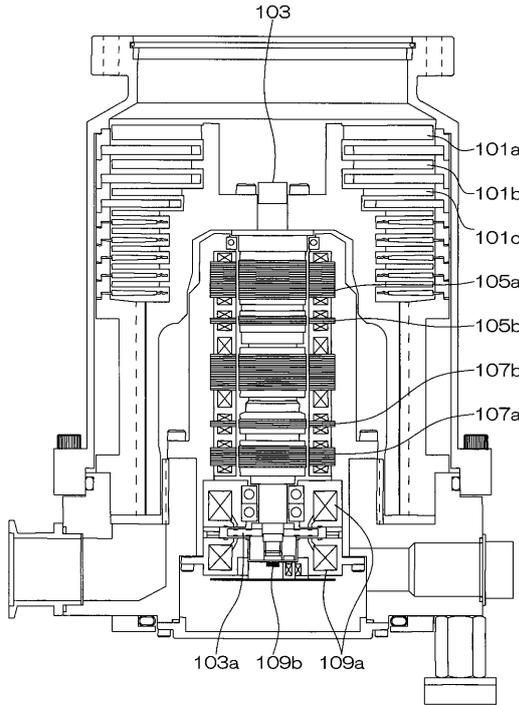
【図3】



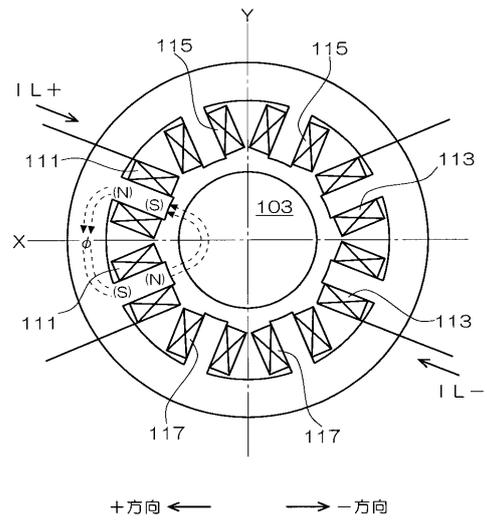
【図2】



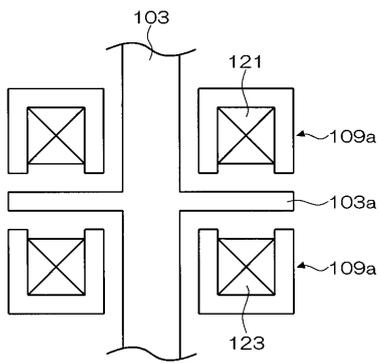
【 図 4 】



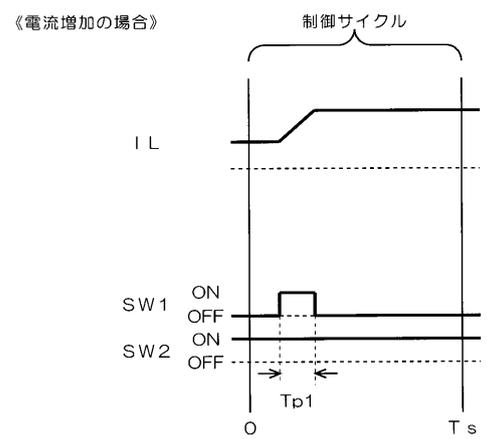
【 図 5 】



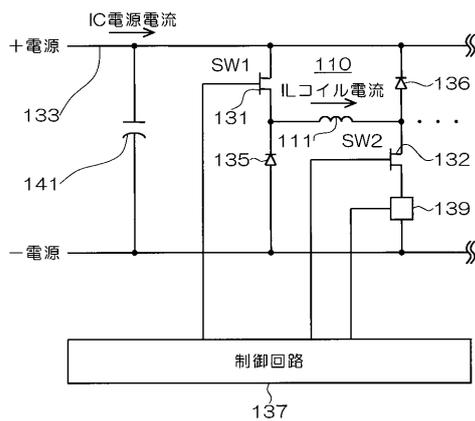
【 図 6 】



【 図 8 】

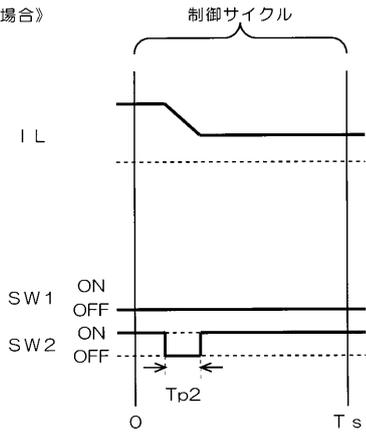


【 図 7 】



【 図 9 】

《 電流減少の場合 》



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2000-152641(JP,A)
特開平11-287832(JP,A)
特開2001-107961(JP,A)
特開平05-118330(JP,A)
特開2001-140881(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F16C 32/04,
H02K 7/00-7/20,
H02M 7/42-7/98