

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6419950号
(P6419950)

(45) 発行日 平成30年11月7日 (2018. 11. 7)

(24) 登録日 平成30年10月19日 (2018. 10. 19)

(51) Int. Cl.	F I
H02K 1/24 (2006.01)	H02K 1/24 Z
H02K 19/10 (2006.01)	H02K 19/10 A
H02K 1/27 (2006.01)	H02K 1/27 501M

請求項の数 13 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2017-513369 (P2017-513369)	(73) 特許権者	507399737
(86) (22) 出願日	平成27年5月22日 (2015. 5. 22)		テクネレック リミテッド
(65) 公表番号	特表2017-517243 (P2017-517243A)		イギリス, エルイー 1 5 6 キューダブリ
(43) 公表日	平成29年6月22日 (2017. 6. 22)		ュー, レスターシャー, オーカム, スター
(86) 国際出願番号	PCT/GB2015/051512		ション アプローチ, エジソン ハウス (
(87) 国際公開番号	W02015/177565		番地なし)
(87) 国際公開日	平成27年11月26日 (2015. 11. 26)	(74) 代理人	100101454
審査請求日	平成30年2月5日 (2018. 2. 5)		弁理士 山田 卓二
(31) 優先権主張番号	1409281.1	(74) 代理人	100081422
(32) 優先日	平成26年5月23日 (2014. 5. 23)		弁理士 田中 光雄
(33) 優先権主張国	英国 (GB)	(74) 代理人	100125874
			弁理士 川端 純市
早期審査対象出願			
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 同期リラクタンス機

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複数の極を有する永久磁石援助を有するか又は有しない同期リラクタンス機であって、
 複数の離間したスロットを有する固定子と、
 複数の磁束障壁を含む回転子とを備え、
 前記各磁束障壁は、前記回転子の円周上の障壁点に向かって延在し、
 前記回転子は、各極に対して1つの直軸及び1つの直交軸を有し、
 初期軸から隣接する仕上げ軸まで磁極ピッチの半分周りを移動するとき、前記回転子の
 円周周りの障壁点間の連続的な角間隔が、等比級数又は等差級数に従って増加し、もしくは
は等比級数又は等差級数に従って減少し、

前記初期軸は直軸又は直交軸のいずれかであり、

前記仕上げ軸は直軸及び直交軸の他方である同期リラクタンス機。

【請求項 2】

前記級数は、初期軸及び / 又は仕上げ軸に追加の障壁点があるように計算可能であり、
 その結果、前記初期軸から第1の障壁点までの角度間隔が前記級数の第1項として扱われ、
 及び / 又は、最後の障壁点から仕上げ軸までの角度間隔が前記級数の最終項として扱わ
 れる請求項1に記載の同期リラクタンス機。

【請求項 3】

前記級数は、1つの半極ピッチの最後の障壁点と次の半極ピッチの隣接する最後の障壁
 点との間の角度間隔が級数の最終項として扱われることを基礎として計算可能である請求

項 1 に記載の同期リラクタンس機。

【請求項 4】

前記級数の第 1 項は、

【数 1】

$$a = k_i \frac{p}{N_s}$$

として選択され、ここで、 a は 1 つの極ピッチの小数部であり、 k_i は定数であり、 p は極の数であり、 N_s は固定子のスロット数である請求項 1 ~ 3 のいずれかに記載の同期リラクタンス機。

10

【請求項 5】

前記初期軸から前記仕上げ軸に移動する連続的な角度間隔は、連続する角度間隔の間におけるサイズの共通の差 d が存在するようにする等差級数である請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の同期リラクタンス機。

【請求項 6】

1 つの極ピッチの割合としての複数の角度間隔の和は次式によって与えられ、

【数 2】

$$\begin{aligned} Pole\ Pitch &= 2 \sum_{k=0}^{n_b} (a + kd) - (1 - E_i)(a) - (1 - E_f)(a + n_b d) \\ &= (n_b + 1)(2a + n_b d) - (1 - E_i)(a) - (1 - E_f)(a + n_b d) \end{aligned}$$

20

ここで、半極当たり n_b 個の障壁があり、障壁配列の初期軸又は仕上げ軸における余分な障壁の有無はそれぞれ、ブール変数 E_i 及び E_f によって表わされる請求項 5 に記載の同期リラクタンス機。

【請求項 7】

前記初期軸から前記仕上げ軸に移動する連続的な角度間隔は、連続する角度間隔の間におけるサイズの共通比 r が存在する等比級数に従う請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の同期リラクタンス機。

30

【請求項 8】

1 つの極ピッチの割合としての複数の角度間隔の和は次式によって与えられ、

【数 3】

$$\begin{aligned} Pole\ Pitch &= 2 \sum_{k=0}^{n_b} (a r^k) - (1 - E_i)(a) - (1 - E_f)(a r^{n_b}) \\ &= \left(2a \frac{1 - r^{(n_b+1)}}{1 - r} \right) - (1 - E_i)(a) - (1 - E_f)(a r^{n_b}) \end{aligned}$$

40

ここで、半極当たり n_b 個の障壁があり、余分な障壁の有無はそれぞれ、障壁配列の初期軸又は仕上げ軸におけるブール変数 E_i 及び E_f によって表される請求項 7 に記載の同期リラクタンス機。

【請求項 9】

前記初期軸は直接軸であり、前記障壁点間の連続的な角度間隔は前記回転子の円周の周りを直交軸に向かって増加する請求項 1 ~ 8 のいずれかに記載の同期リラクタンス機。

【請求項 10】

前記回転子が横方向に積層され、前記各積層に磁束障壁が設けられる請求項 1 ~ 9 のい

50

ずれかに記載の同期リラクタンس機。

【請求項 1 1】

前記磁束障壁は前記回転子のスロットとして形成される請求項 1 ~ 1 0 のいずれかに記載の同期リラクタンス機。

【請求項 1 2】

磁束障壁内に配置された永久磁石をさらに備え、

全ての磁束障壁は同じ極性で配向され、直交軸に向けられる請求項 1 ~ 1 1 のいずれかに記載の同期リラクタンス機。

【請求項 1 3】

複数の極を有する同期リラクタンス機のための回転子であって、

前記回転子は複数の磁束障壁を備え、

前記各磁束障壁は、前記回転子の円周上の障壁点に向かって延在し、

前記回転子は、各極に対して 1 つの直軸及び 1 つの直交軸を有し、

初期軸から隣接する仕上げ軸まで磁極ピッチの半分にわたって、前記回転子の円周周りの障壁点間の連続的な角度間隔が、等比級数又は等差級数に従って増加し、もしくは等比級数又は等差級数に従って減少し、

前記初期軸は直軸又は直交軸のいずれかであり、前記仕上げ軸は直軸及び直交軸の他方である同期リラクタンス機のための回転子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は同期リラクタンス機、及び永久磁石援助を備えた同期リラクタンス機に関し、特に同期リラクタンス機のための回転子に関する。

【背景技術】

【0002】

同期リラクタンス機は、スロット付き固定子に配置された多相固定子巻線を有し、同極数の回転子を備える。固定子巻線は、通常、磁極ピッチの 50 % 以上にまたがる重なりコイルを有する三相分布巻線であり、最も一般的な固定子の例は、12, 18, 24, 36 又は 48 スロットを有する。極ピッチの 50 % 未満の固定子巻線も可能であり、ここで、短絡巻線が望ましいが、通常は、異なる相のコイル間の相互結合が減少するため、パフォーマンスが低下する。

【0003】

同期リラクタンスマータの回転子は、透磁性及び非透磁性の鋼の交互の層と軸方向に積層することができ、これにより直接リラクタン스와直角リラクタンスの比が高くなる。これらの軸方向に積層された構造は、費用効果的に製造することが困難であり、速度の速い回転には適していない。従って、製造を容易にするために、横方向積層構造が好ましい。

【0004】

ホンシンガー (Honsinger) は、特許文献 1 において、横方向の積層を有する回転子を提示した。横方向に積層された回転子は、各積層に打ち抜かれたスロットのパターンを有する。スロット設定パターンは、回転子の空気ギャップ表面の領域を生成し、ここで、回転子は低透磁率 (直接軸又は d 軸としても知られる) 及び回転子の領域を有する。ここで、固定子によって生成された磁束が回転子の表面を貫通することはより困難である。これらの高い透磁率の領域は直交軸又は q 軸として知られている。

【0005】

回転子上のスロット加工と固定子の歯とスロット加工との間の相互作用はトルク変動又はトルクリップルを生じさせる。トルクリップルは、音響ノイズ及び振動の発生のために望ましくない。

【0006】

トルクリップルを低減するための従来技術の方法が存在し、この方法は回転子の表面直下の等価な回転子スロットの数を慎重に選択することによって達成される。特許文献 2 及

10

20

30

40

50

び3では、磁極対当たり等価回転子スロットの数は、極対当たりの固定子のスロット数よりも4倍又は4倍少ないことが推奨され、最適な性能を達成する。また、特許文献2には、磁極対当たりの等価回転子スロットの数は、大きなトルクリップルを回避する必要がある場合、極対当たりの固定子のスロット数と同じでも異なってもいけない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】米国特許第3,652,885号明細書

【特許文献2】米国特許第5,818,140号明細書

【特許文献3】国際出願公開第2010/131233号公報

【特許文献4】米国特許第6,239,526号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

特許文献4には、回転子磁束障壁の一方の端部が固定子の歯に隣接している場合には、他方の端部は固定子スロットに隣接する回転子の表面に到達すべきであることを設定する代替方法を提供する。

【0009】

従来技術に記載された方法はトルクリップルの減少をもたらす一方、必ずしも最高効率のモータ設計を作成するとは限らない。この1つの理由は、固定子のスロット数と比較して4つの等価な回転子スロットを有することを選択することによって、回転子スチールにおいてより高い磁束周波数をもたらすことができることである。固定子の歯を通過する磁束障壁の周波数が増加するにつれて、局所的な磁束の周波数が高いほど、回転子内の鉄損が高くなり、モータの効率を低下させる。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明の一態様によれば、複数の極を有する同期リラクタンス機は、複数の間隔を空けられたスロットを有する固定子と、回転子とを備える。回転子は、各極に対して1つの直接軸と1つの直交軸を有し、複数の磁束障壁を備える。各磁束障壁は、少なくとも1つの障壁点においてその円周に延在する。初期軸から隣接する仕上げ軸まで磁極ピッチの半分周りを移動するとき、回転子周りの障壁点間の連続的な角度間隔が増加し又は減少し、初期軸は直軸又は直交軸のいずれかであり、仕上げ軸は、直軸及び直交軸の他方である。サイズの増加又は減少は、系統的で漸進的な級数によって支配され得る。この文脈において、「同期リラクタンス機」という用語は、永久磁石援助のない同期リラクタンス機と、永久磁石援助を備えた同期リラクタンス機の両方を意図することが理解されるだろう。

【0011】

さらなる態様及び好ましい特徴は請求項2以降に記載されている。

【0012】

本発明の別の態様によれば、複数の極を有する同期リラクタンス機のための回転子が記載されており、回転子は、複数の磁束障壁を備え、各磁束障壁は、少なくとも1つの障壁点においてその円周に延在し、前記回転子は、各磁極に対して1つの直軸及び1つの直交軸を有し、初期軸から隣接する仕上げ軸まで磁極ピッチの半分周りを移動するとき、回転子の円周周りの障壁点間の連続的な角間隔が増加又は減少する。初期軸は直軸又は直交軸のいずれかであり、仕上げ軸は、直軸及び直交軸の他方である。

【発明の効果】

【0013】

従って、本発明は、少なくとも好ましい実施形態において、低トルクリップルと低回転子鉄損を有する、同期リラクタンスモータ及び永久磁石援助の同期リラクタンスモータのための回転子設計技術を提供する。回転子磁束障壁間の配置及び間隔の技術は、任意の数の同等の回転子障壁に適用することができる。本明細書に開示された式で計算された障壁間

10

20

30

40

50

の間隔は、同等の回転子障壁の数を有する回転子のトルクリップルを劇的に低減することができ、このことは、さもなければ不適当とみなされていたであろう。本明細書に記載の技術を適用した結果、アンペア当たりの高いトルク、低いトルクリップル及び低い回転子損失で回転子を設計することが可能である。

【0014】

本発明のいくつかの好ましい実施形態を、添付の図面を参照して、単なる例示として記載する。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】典型的な同期リラクタンس機の固定子及び回転子を示す。

10

【図2】典型的な同期リラクタンス機の回転子を示す。

【図3】同期リラクタンス機における回転子磁束障壁の間隔配置を示す。

【図4】同期リラクタンス機における回転子磁束障壁の代替の間隔配置を示す。

【図5】同期リラクタンス機における回転子磁束障壁の更なる代替の間隔配置を示す。

【図6】異なる回転子設計を用いて構成された同期リラクタンス機のトルク対角度特性を示す。

【図7】異なる回転子設計を用いて構成された同期リラクタンス機のさらなるトルク対角度特性を示す。

【図8】異なる回転子設計を使用して構成された同期リラクタンス機のさらなるトルク対角度特性を示す。

20

【図9】半極当たり3つの回転子障壁がある場合において、共通の差が初期軸の障壁比の範囲にわたってどのように変化するかを示す。

【図10】半極当たり4つの回転子障壁があるとき、共通の差が、初期軸の障壁比の範囲にわたってどのように変化するかを示す。

【図11】半極当たり3つの回転子障壁がある場合において、初期軸の障壁比の範囲にわたって共通比がどのように変化するかを示す。

【図12】半極当たり4つの回転子障壁がある場合において、初期軸の障壁比の範囲にわたって共通比がどのように変化するかを示す。

【図13】永久磁石援助を有する同期リラクタンス回転子の磁束障壁配置の1つの設計の間隔の概略図を示す。

30

【図14】等間隔に配置された回転子スロットを有する設計と比較して、この開示にかかる設計された永久磁石援助同期リラクタンスマータの計算されたトルク対角度の結果を示す。

【図15】本明細書に記載の原理を用いて設計された実用的な回転子の例を示す。

【発明を実施するための形態】

【0016】

図1は、典型的な同期リラクタンス機の固定子及び回転子の積層を示す。固定子1は、通常、複数の相巻線を保持するために所定の固定子長を走行する複数のスロット2を有する積層された積層体である。複数の相巻線は、通常、三相分布巻きを含む。複数の巻線は、固定子内で回転子に向かって内側に向けられた磁極を形成するように配置される。複数の固定子巻線における3相の交流電流を用いて、固定子1と回転子3との間の空隙に回転磁界が発生する。

40

【0017】

図1の回転子3は、その積層構造内に切り込まれたスロット4を有する。これらの複数のスロット4は高透磁率の領域であるので、高いリラクタンスの回転子内に経路を形成する。従って、スロット4は磁束障壁と呼ばれる。

【0018】

図2は、回転子3の1つの積層10のより詳細な図を示す。回転子の複数の積層のこの特定の例は、次数6の回転対称性を有する。このことは、磁束障壁の6極パターンを有することを意味する。各極は、直接軸12と直交軸14とを有する。直接軸12と直交軸1

50

3 との間の角度は 120 度であり、2 つの回転子磁極ピッチを含む。直接軸 12 と直交軸 14 との間の角度は、磁極ピッチの半分である。回転子 3 を取り囲む固定子 1 が、18 個のスロット 2 に配置された 6 極 3 相巻線を担持する場合（1 相当り 1 スロット当たり）、回転子の複数の積層は、直接軸が固定子によって生成された磁極と整列するように配向する。この配向方向で、固定子磁束は、磁束障壁の線に沿って、一方の直接軸から隣接する直接軸に容易にリンクすることができる。これは最低のリラクタンスのパスである。それが高い抵抗性のパスであるので、磁束が直交軸から隣接する直交軸に通過することは困難である。

【0019】

当該技術分野において周知のように、固定子は異なる数のスロットを有することができる。図 1 は、18 個のスロットの 6 極固定子を示す。また、6 極固定子が 36 スロットを有することも一般的である。4 極固定子は、固定子内に 12, 24, 36 又は 48 スロットを有するように構成されているのが一般的である。各固定子の歯の磁束と回転子磁束障壁の周りの磁気抵抗の変化との間の局所的な相互作用は、エアギャップの周りのトルクに変動を生じさせる。回転子が回転するにつれて、エアギャップ内に発生する総トルクは位置によって変化し、このような変動はトルクリップルを引き起こす。滑らかな出力トルクと静かなモータ運転のために、トルクリップルを最小にすることが有利である。磁束障壁の周りの回転子内の局所的な磁束変化はまた、渦電流及びヒステリシス効果による鉄損を引き起こす。同期リラクタンスモータが低い回転子損失で最高の効率を達成する場合は、これらの影響を最小限に抑えることが重要である。

【0020】

図 3 は、本発明による同期リラクタンス回転子の磁束障壁配置の 1 つの設計の間隔の概略図を示す。概略図は、回転子の円周に沿う直線状の障壁の間隔を示す。ここで、図 3 は、回転子の表面が直線に展開されているように図示されている。この例では、回転子の各 d 軸と q 軸を分離する 3 つの回転子障壁が存在する。各障壁間隔 w_{xx} は極ピッチの一部を表し、次式のように選択することができる。

【0021】

【数 1】

$$w_{11} > w_{12} > w_{23} > w_{33} \quad (1)$$

【0022】

図 3 において、直接軸において開始し、直交軸に移動すると、隣接する障壁間隔が漸進的に減少する。そして、2 つの d 軸（又は 2 つの q 軸）の間の角度の弧は 1 つの極ピッチを有する。

【0023】

【数 2】

$$w_{11} + 2w_{12} + 2w_{23} + w_{33} = 1 \quad (2)$$

【0024】

回転子の磁極ピッチ p は次式で与えられる。

【0025】

【数 3】

$$\theta_p = \frac{360}{p} \quad (3)$$

【0026】

ここで、 p は同期リラクタンス機の磁極の数である。

【0027】

図3に示す例は、回転子の q 軸上の障壁の間の最も狭い間隔を有する。従って、これは初期軸と呼ばれる。このことは以後の全ての障壁間隔についての等差級数の開始値を定義するからである。定数 k_i は、初期間隔 a を固定子の歯のピッチに関連付けるために使用される。図3において、 d 軸上の障壁間隔が最も広い。この例では、 d 軸は前記級数の仕上げ軸と呼ばれる。

【0028】

図4は、同期リラクタンス回転子のための障壁の第2の設計の間隔の概略図を示す。概略図は、回転子の円周に沿う直線状の障壁の間隔を示す。この図4は、回転子の表面が直線に展開されるように図示される。この例では、回転子の各 d 軸と q 軸を分離する3つの回転子障壁がある。各障壁間隔 w_{xx} は極ピッチの一部分を表し、本発明にかかるパターンに従う。

10

【0029】

【数4】

$$w_{11} > w_{12} > w_{23} > w_{34} \quad (4)$$

【0030】

20

図3と同様に、 q 軸は最も狭い障壁間隔を有する初期軸として使用され、 d 軸は最も広い障壁間隔を有する仕上げ軸である。しかしながら、図3とは対照的に、この例では、 q 軸に直接追加の障壁配置が含まれている。この余分な障壁は、極の半分から q 軸の反対側の同等の位置には流れない。余分な障壁は、回転子上に存在しない場合もあり、溶接点又は単に q 軸スロットを見つけるために使用されることもあるが、数学的に、直接軸から直交軸への障壁間隔の漸進的变化を完了するために存在する。

【0031】

2つの d 軸（又は2つの q 軸）の間の角弧が極ピッチであり、次式を得る。

【0032】

【数5】

30

$$w_{11} + 2w_{12} + 2w_{23} + 2w_{34} = 1 \quad (5)$$

【0033】

図5は、最も狭い障壁間隔は d 軸の周りであり、隣接する障壁間の角度間隔は漸進的に増加し、直軸から直交軸に移動する一例を示す。

【0034】

トルクリップルを最も効果的に減少させるために、回転子の鉄損を最小限に抑える。連続する回転子障壁の間隔を初期軸から仕上げ軸まで漸進的にかつ系統的に変化することが推奨される。

40

【0035】

トルクリップルを低減するのに特に有効である1つの系統的な方法は、図3の障壁間の間隔が w_{33} から w_{11} に増加する等差級数に従う場合に発生する。

【0036】

【数 6】

$$w_{33} = a \quad (6)$$

$$w_{23} = a + d \quad (7)$$

$$w_{12} = a + 2d \quad (8)$$

10

$$w_{11} = a + 3d \quad (9)$$

【0 0 3 7】

従って、次式を得る。

【0 0 3 8】

【数 7】

$$w_{11} + 2w_{12} + 2w_{23} + w_{33} = 6a + 9d = 1 \text{ pole pitch} \quad (10)$$

20

【0 0 3 9】

a が固定子の歯の間隔の比 k_i となるように選択された場合 (N_s は固定子の歯の数である) において、次式を得る。

【0 0 4 0】

【数 8】

$$a = k_i \frac{p}{N_s} \quad (11)$$

30

【0 0 4 1】

次に、共通の差 d の値は、式 (10) と (11) の同時解から求めることができる。

【0 0 4 2】

【数 9】

$$d = \frac{1}{9} - \left(\frac{2}{3} \frac{k_i p}{N_s} \right) \quad (12)$$

【0 0 4 3】

40

図 4 の障壁間の間隔が w_{34} から w_{11} まで増加する等差級数に従うならば、次式を得る。

【0 0 4 4】

【数 1 0】

$$w_{34} = a \quad (13)$$

$$w_{23} = a + d \quad (14)$$

$$w_{12} = a + 2d \quad (15)$$

$$w_{11} = a + 3d \quad (16)$$

10

【0 0 4 5】

従って、次式を得る。

【0 0 4 6】

【数 1 1】

$$w_{11} + 2w_{12} + 2w_{23} + 2w_{34} = 7a + 9d = 1 \text{ pole pitch} \quad (17)$$

20

【0 0 4 7】

式(11)のように a が固定子の歯の間隔の比 k_i となるように選択すると、図4の共通の差 d の値は式(17)と式(11)の同時解から求めることができる。

【0 0 4 8】

【数 1 2】

$$d = \frac{1}{9} - \left(\frac{7}{9} \frac{k_i p}{N_s} \right) \quad (18)$$

30

【0 0 4 9】

図3のように、図4に示す例は、回転子の q 軸上の障壁の間の最も狭い間隔を有する。これを再び初期軸と呼ぶ。このことは以後の全ての障壁間隔についての等差級数の開始値を定義するからである。定数 k_i は、初期間隔 a を固定子の歯のピッチに関連付けるために使用される。図4において、 d 軸上の障壁間隔が最も広い。この例では、 d 軸はやはり等差級数の仕上げ軸と呼ばれる。

【0 0 5 0】

図5は、最も狭い障壁間隔が d 軸の周りにある例を示す。この場合において、 d 軸は、通常、初期軸と呼ばれ、等差級数の出発点になる。

40

【0 0 5 1】

【数 1 3】

$$w_{11} = a = k_i \frac{p}{N_s} \quad (19)$$

$$w_{11} < w_{12} < w_{23} < w_{33} \quad (20)$$

【0 0 5 2】

50

初期軸又は仕上げ軸のいずれかに余分な障壁がないため、図 3 のために開発された方程式が適用される。共通の差 d は式 (1 2) で与えられる。

【 0 0 5 3 】

半極ピッチ当たりの障壁数に依存する障壁間隔のより一般的な公式は、等差級数の総和から導出することができる。等差級数の和は次式で表される。

【 0 0 5 4 】

【 数 1 4 】

$$\sum_{k=0}^{n-1} (a + kd) = \frac{n}{2} (2a + (n-1)d) \quad (21)$$

10

【 0 0 5 5 】

半極当たり n_b 個の障壁がありかつ障壁配列の初期軸又は仕上げ軸における余分な障壁の有無がそれぞれブール変数 E_i 及び E_f によって表されるとき、障壁間隔の合計は次式のようにになる。

【 0 0 5 6 】

【 数 1 5 】

$$\begin{aligned} Pole\ Pitch = 2 \sum_{k=0}^{n_b} (a + kd) - (1 - E_i)(a) \\ - (1 - E_f)(a + n_b d) \end{aligned}$$

20

$$= (n_b + 1)(2a + n_b d) - (1 - E_i)(a) - (1 - E_f)(a + n_b d) \quad (22)$$

【 0 0 5 7 】

初期軸又は終了軸に特別な障壁がないときに E_i と E_f は 0 の値を有し、もしくはそれぞれの軸に余分な障壁があるときに（もしくは、障壁が存在しない場合でも余分の障壁に割り当てられた間隔）1 の値を有する。

30

【 0 0 5 8 】

n_b 、 E_i 及び E_f の異なる値について式 (2 3) で与えられた式の評価は、表 1 の極ピッチ合計の値を与える。表 1 は、半極ピッチ当たり 2 ~ 5 個の全障壁に対する極ピッチ合計を示すが、この式は、半極ピッチ当たりの任意の数の全長障壁に対して拡張することができる。

【 0 0 5 9 】

【 表 1 】

	E_i	0	0	1	1
n_b	E_f	0	1	0	1
2		$4a+4d$	$5a+6d$	$5a+4d$	$6a+6d$
3		$6a+9d$	$7a+12d$	$7a+9d$	$8a+12d$
4		$8a+16d$	$9a+20d$	$9a+16d$	$10a+20d$
5		$10a+25d$	$11a+30d$	$11a+25d$	$12a+30d$

40

【 0 0 6 0 】

表 1 で計算された極ピッチと k_i の要求値との合計が与えられると、式 (1 1) を用い

50

て a の値を計算することができる。表 1 からの合計値は常に 1 に等しくなる必要があり、 d の値を決定することができる。

【 0 0 6 1 】

a と d は既知であるので、障壁の間隔を回転子の幾何学形状上に配置することができ、等差級数に従って所望の分布を達成する。

【 0 0 6 2 】

等差級数に関連する障壁間隔が規則的でないため、固定子スロット間の位置合わせが回転子障壁は各磁極に幾何学的に分布したパターンを有するために、伝達されるトルクリップルは本発明に記載の障壁間隔の方法は、特に有用である。そうでなければ回転子障壁の間隔が固定子スロット間の間隔に近くなる。初期軸と仕上げ軸の選択は任意であるため、共通の差 d の値は、正又は負であり得る。

10

【 0 0 6 3 】

初期軸と仕上げ軸との間の障壁間隔を系統的にかつ漸進的に変化させる別の方法は、障壁間隔が等比級数に従う場合に達成することができる。図 3 では、間隔が w_{33} から w_{11} に増加するので、等比級数に従うことができる。

【 0 0 6 4 】

【 数 1 6 】

$$w_{33} = a \quad (23)$$

20

$$w_{23} = a r \quad (24)$$

$$w_{12} = a r^2 \quad (25)$$

$$w_{11} = a r^3 \quad (26)$$

【 0 0 6 5 】

従って、次式を得る。

30

【 0 0 6 6 】

【 数 1 7 】

$$w_{11} + 2w_{12} + 2w_{23} + w_{33} = a(1 + 2r + 2r^2 + r^3) \quad (27)$$

$$= 1 \text{ pole pitch}$$

【 0 0 6 7 】

a が式 (1 1) によって与えられる固定子の歯の間隔の比 k_i となるように選択された場合、共通比 r の値は、 r が次式の解により与えられるように式 (2 7) と式 (1 1) の同時解から求めることができる。

40

【 0 0 6 8 】

【 数 1 8 】

$$\left(\frac{k_i p}{N_s} \right) (1 + 2r + 2r^2 + r^3) = 1 \quad (28)$$

【 0 0 6 9 】

図 4 に示す、隣接障壁間隔の間隔の系統的かつ漸進的変化の実施例は等比級数によっても

50

実施することができる。この例では、q 軸に直接追加の障壁配置が含まれている。障壁間の間隔が w_{34} から w_{11} に増加する等比級数に従うとき、次式を得る。

【 0 0 7 0 】

【 数 1 9 】

$$w_{34} = a \quad (29)$$

$$w_{23} = ar \quad (30)$$

$$w_{12} = ar^2 \quad (31)$$

10

$$w_{11} = ar^3 \quad (32)$$

【 0 0 7 1 】

従って、次式を得る。

【 0 0 7 2 】

【 数 2 0 】

$$w_{11} + 2w_{12} + 2w_{23} + 2w_{34} = a(2 + 2r + 2r^2 + r^3) \quad (33)$$

$$= 1 \text{ pole pitch}$$

20

【 0 0 7 3 】

a が式 (1 1) による固定子の歯の間隔の比 k_i となるように選択されたときに、共通差分 d の値は、r が次式の解で与えられるように、式 (3 3) と式 (1 1) の同時解から求めることができる。

【 0 0 7 4 】

【 数 2 1 】

$$\left(\frac{k_i p}{N_s} \right) (1 + 2r + 2r^2 + r^3) = 1 \quad (34)$$

30

【 0 0 7 5 】

図 3 と同様に、図 4 に示す例は、回転子の q 軸上の障壁の間の最も狭い間隔を有する。これを再び初期軸と呼ぶ。このことは、その後のすべての障壁間隔について等比級数の開始値を定義するためである。定数 k_i は、初期間隔 a を固定子の歯のピッチに関連付けるために使用される。図 4 において、d 軸上の障壁間隔が最も広い。この例では、d 軸はやはり等比級数の仕上げ軸と呼ばれる。

【 0 0 7 6 】

図 5 は、最も狭い障壁間隔が d 軸の周りにある例を示す。この場合において、d 軸は初期軸と呼ばれ、等比級数の開始点になる。初期軸又は仕上げ軸のいずれかに余分な障壁がないため、図 3 のために開発された方程式が適用され、共通比 r は式 (2 8) で与えられる。

40

【 0 0 7 7 】

半極ピッチ当たりの障壁数に依存する障壁間隔のより一般的な公式は等比級数の総和から導き出すことができる。等比級数の和は次式で表される。

【 0 0 7 8 】

【数 2 2】

$$\sum_{k=0}^{n-1} (a r^k) = a \frac{1-r^n}{1-r} \quad (35)$$

【0 0 7 9】

その場合において、半極当たりの n_b 個の障壁があり、障壁配列の初期軸及び終了軸に余分な障壁が存在するか否か（存在の有無）はそれぞれブール変数 E_i 及び E_f によって表わされる。障壁間隔の合計は次式で表される。

【0 0 8 0】

【数 2 3】

$$\begin{aligned} Pole\ Pitch &= 2 \sum_{k=0}^{n_b} (a r^k) - (1-E_i)(a) - (1-E_f)(a r^{n_b}) \\ &= \left(2a \frac{1-r^{(n_b+1)}}{1-r} \right) - (1-E_i)(a) - (1-E_f)(a r^{n_b}) \end{aligned} \quad (36)$$

【0 0 8 1】

初期軸又は終了軸に特別な障壁がないときに E_i と E_f は 0 の値を有し、それぞれの軸に余分な障壁があるとき（もしくは障壁が存在しない場合でも、余分の障壁に割り当てられた間隔）1 の値を有する。 n_b 、 E_i 及び E_f の異なる値について式（36）を評価すると、表 2 の極ピッチ合計の値が得られる。表 2 は、半極ピッチ当たり 2 個～5 個の全障壁に対する極ピッチ合計を示すが、この式は、半極ピッチ当たりの任意の数の全長障壁に対して拡張することができる。

【0 0 8 2】

【表 2】

	E_i	0	0	1	1
n_b	E_i	0	1	0	1
2		$a \left(\frac{1+r-r^2-r^3}{1-r} \right)$	$a \left(\frac{1+r-2r^3}{1-r} \right)$	$a \left(\frac{2-r^2-r^3}{1-r} \right)$	$2a \left(\frac{1-r^3}{1-r} \right)$
3		$a \left(\frac{1+r-r^3-r^4}{1-r} \right)$	$a \left(\frac{1+r-2r^4}{1-r} \right)$	$a \left(\frac{2-r^3-r^4}{1-r} \right)$	$2a \left(\frac{1-r^4}{1-r} \right)$
4		$a \left(\frac{1+r-r^4-r^5}{1-r} \right)$	$a \left(\frac{1+r-2r^5}{1-r} \right)$	$a \left(\frac{2-r^4-r^5}{1-r} \right)$	$2a \left(\frac{1-r^5}{1-r} \right)$
5		$a \left(\frac{1+r-r^5-r^6}{1-r} \right)$	$a \left(\frac{1+r-2r^6}{1-r} \right)$	$a \left(\frac{2-r^5-r^6}{1-r} \right)$	$2a \left(\frac{1-r^6}{1-r} \right)$

【0 0 8 3】

表 2 で計算された極ピッチの合計と、必要とされる k_i の値が与えられると、式（11）を用いて a の値を計算することができる。表 2 からの合計値は常に 1 に等しくなければならないので、 r の値を決定することができる。

【0 0 8 4】

a と r はそれから知られているので、障壁の間隔を回転子の幾何学形状上に配置することができ、等比級数に従って所望の分布を達成する。

【0 0 8 5】

等比級数に関連する障壁間隔が規則的ではないので、伝達されるトルクリップルは最小限に抑えることができる。固定子スロットと回転子障壁との間の整列は、各極にわたって

10

20

30

40

50

幾何学的に分布したパターンを有するからである。本発明に記載の障壁間隔の方法は、回転子障壁の間隔が固定子スロット間の間隔に近くなる場合に特に有用である。

【 0 0 8 6 】

表 3 は、36 個の固定子スロットと 24 個の固定子スロットを有する 4 極モータ用の固定子スロットと回転子障壁のいくつかの一般的な組合せを列挙している。この例は、1 つの磁極面から隣接する磁極面まで磁束を案内する障壁の数 n_b が 3 または 4 のすべての場合をカバーする。初期軸又は仕上げ軸のいずれかに余分な障壁配置が存在することは、それぞれ E_i 及び E_f の値によって示される。最後の列は、2 つの磁極ピッチに対する回転子の障壁端部位置の総数を示す。間隔パターンが保持されていれば、すべての終了位置に障壁が存在する必要はない。

【 0 0 8 7 】

【表 3】

Ns	極数	1 極対当たりの 固定子スロ ット数	n_b	E_i	E_f	1 極対当たりの 回転子バリア端位置
36	4	18	3	0	0	12
36	4	18	3	0	1	14
36	4	18	3	1	0	14
36	4	18	3	1	1	16*
36	4	18	4	0	0	16*
36	4	18	4	0	1	18*
36	4	18	4	1	0	18*
36	4	18	4	1	1	20*
24	4	12	3	0	0	12*
24	4	12	3	0	1	14*
24	4	12	3	1	0	14*
24	4	12	3	1	1	16
24	4	12	4	0	0	16
24	4	12	4	0	1	18
24	4	12	4	1	0	18
24	4	12	4	1	1	20

【 0 0 8 8 】

* (アスタリスク) で強調表示されたケースは、磁極対当たりの回転子の障壁端部の位置が、磁極対当たりの固定子スロットの 2 つに等しいか、又は 2 つ以内の場合である。従来技術の刊行物 (Vagatti、特許文献 2) は、高いトルクリップルを有するとして、これらの組み合わせを特に排除している。しかしながら、磁極対当たりの障壁配置の数と極対当たりの固定子のスロット数とが非常に類似しているため、これらはまた、アンペア当たりの高いトルクを提供する設計とすることができる。初期軸から仕上げ軸へと漸進的にかつ系統的に変化する可変障壁間隔の実施例は、トルクリップルを大幅に低減し、これらの組み合わせが高性能同期リラクタンス設計に適していることを可能にする。

【 0 0 8 9 】

図 6 は、回転子との同期を保持するために等角度で移動する固定子磁場を有する回転子

の30度の回転にわたる有限要素解析によって計算されたトルクの例を示す。図6の解析に使用した固定子は36個のスロットを有する。三角形のマーカーを持つ最初の行は、表2の3行目を実装して、極対ごとに14個の同等の障壁終了位置を与える。これは、極対当たりの固定子のスロット数より4だけ少なく、極対当たりの固定子のスロット数はこの場合は18である。特許文献2及び3では、磁極対当たり等価回転子スロットの数は、極対当たりの固定子のスロット数よりも4倍又は4倍少ないことが推奨され、最小トルクリップルを達成する。このような設計に関連するトルクリップルは、複数の三角形のマーカーを有する線により図示され、比較的小さい。四角のマーカーの線は、極対当たり16個の等価障壁配置を有する回転子からのトルク出力である。これは、 $n_b = 4$ 、 $E_i = 0$ 、及び $E_f = 0$ を使用して表2の5行目で作成された。この設計によるトルクリップルは許容できないほど高くなる。これは従来技術によって予測された結果である。しかしながら、一对の極当たり16個の等価スロットをとり、前記のような等差級数を用いて間隔パターンを重ねることで、小さいトルクリップルを有するダイヤモンドマーカーのトルクを供給する。等差級数は小さくなるが、トルクリップルが完全に破壊されるように、各障壁の間隔パターンに非常に大きな変化をもたらす。等差級数を使用して障壁間隔を計算した結果として、1アンペア当たりの最適トルク及び最小限の鉄損の障壁の数を選択することが可能である。トルクリップルを解消するために、等差級数を使用して初期軸から最終軸までの間隔を漸進的に増加させることができる。

【0090】

図7は、等比級数に従って障壁間隔を漸進的かつ系統的に変化させることによって同様の結果が達成できることを示している。図7の結果は図6の結果と非常に似ていることに注意する。このことは、初期軸に同じ間隔が使用され、等差級数又は等比級数の項の数が非常に少ないためで、これらの例では、2つの級数は大きく発散していない。

【0091】

図8は、24個のスロット固定子について本発明にかかる等差級数を実施した結果のさらなる例を示す。ダイヤモンドマーカーを使用した設計は、三角形マーカーの設計よりも高いトルクと低いリップルを備える。三角マーカーは、従来技術にかかる実施される設計であり、等差級数（算術級数）を用いた本発明にかかる設計は優れたトルクと低いトルクリップルを提供する。等比級数でも同様の結果が得られる。

【0092】

図9及び図10は、等差級数（算術級数）による間隔の漸進的及び系統的変化を伴う回転子設計における共通の差 d の変化を示す。プロットは、36個のスロット固定子における共通の差 d の変化を示し、初期軸の障壁比 k_i に応じて変化する。図9は、半極当たり3つの完全な障壁について計算されたものである。表3から、仕上げ軸上の障壁点の有無に依存して、磁極対当たり12個又は14個の回転子障壁の終端位置が存在する。図10は、半極当たり4つの完全な障壁に対して計算される。従って、表3から、磁極対当たり16個又は18個の回転子障壁終端位置が存在する。 d が障壁間の間隔をゼロでないときに、初期軸から最終軸まで漸進的に変化する。共通の差の正の値は、障壁の間隔は、初期軸から仕上げ軸に向かって増加することを意味する。共通の差の負の値も選択できる。このことは、障壁の間隔が初期軸から仕上げ軸まで減少することを意味する。

【0093】

図11及び図12は、等比級数による間隔の漸進的及び系統的変化を伴う回転子設計における共通比 r の変化を示す。プロットは、36個のスロット固定子における共通比 r の変化を示し、初期軸の障壁比 k_i に応じて変化する。図11は、半極当たり3つの完全な障壁について計算されたものである。図12は、半極ごとに4つのフル障壁に対して計算され、初期軸又は仕上げ軸のいずれかに余分な障壁がない。 r が1と等しくない場合、障壁間の間隔は初期軸から仕上げ軸に向かって漸進的に変化する。共通比が1より大きい値は、障壁の間隔が初期軸から仕上げ軸に向かって増加することを意味する。1未満の共通の比の値も選択できる。このことは、障壁間隔が初期軸から仕上げ軸まで減少することを意味する。

【 0 0 9 4 】

図 1 3 は、本発明にかかる永久磁石援助を伴う。同期リラクタンス回転子の磁束障壁配置の 1 つの設計の間隔の概略図を示す。概略図は、回転子の円周に沿う直線状の障壁の間隔を示す。図 1 3 は、回転子の表面が直線に展開されるように図示される。この例では、回転子の各 d 軸と q 軸を分離する 3 個の回転子障壁がある。各障壁間隔 w_{xx} は各々が極ピッチの一部を表し、本発明によるパターンに従って、次式を得る。

【 0 0 9 5 】

【 数 2 4 】

$$w_{11} > w_{12} > w_{23} > w_{33} \quad (37)$$

10

【 0 0 9 6 】

障壁内に配置された磁石は、q 軸に向けられた同じ極性で配向される。従って、隣接する q 軸は逆の磁気極性を有する。磁石の効果は、d 軸と q 軸のリラクタンスの差を大きくすることである。永久磁石援助は、所与の電流レベルでの同期リラクタンスモータのトルク及び効率を増加させる。

【 0 0 9 7 】

本発明のいずれの実施形態による等差級数（算術級数）に従うように配置されたそれらの間隔を有するように障壁に磁石を置くことによって、障壁間隔が d 軸から q 軸に漸進的に変化する。この漸進的な変化は特に効果的であり、磁石磁束が固定子の歯のリラクタンスに固定される傾向を破壊する際に、コギングトルクが低減される。さらに、トルク波形の低次高調波の大きさが減少し、モータの全体的なトルクリップルが低減される。等差級数（算術級数）を用いて永久磁石援助の同期リラクタンスモータの障壁間隔を決定することにより、所定数の障壁を有する回転子を設計することが可能であり、所定数の障壁（表 3 に示されている）は、従来技術によってトルクリップルが高いと認められた。このような回転子の設計は以前は無視されていた。しかし、本発明の設計方法を使用して、優れたパフォーマンスを提供するように設計することができる。

20

【 0 0 9 8 】

図 1 4 は、等間隔の回転子スロットを有する設計と比較して、本発明により設計された永久磁石援助同期リラクタンスモータにおける計算されたトルク対角度の 1 つの結果を示す。固定子は 3 6 個のスロットを有し、4 極巻線で巻かれている。図 1 1 では、極対当たり 1 4 スロットと 1 6 個のスロットの回転子と比較している。全ての回転子設計は、同じ量の永久磁石援助を有する。最低のトルクリップルが、等差級数（算術級数）による回転子障壁間隔の漸進的な変化を伴う回転子設計であって、1 対の極当たり 1 6 個の等価スロットを備えることで供給される。従って、本発明は、永久磁石を用いた同期リラクタンスモータにおいて、障壁の最適な間隔を計算するのに特に適している。

30

【 0 0 9 9 】

等比級数はまた、永久磁石によって援助される同期リラクタンスモータのトルクリップルを低減する方法を提供する。等比級数と等差級数の両方は、障壁の間隔を初期軸の初期値から仕上げ軸のより小さい又は大きい値に漸進的に調整することができる系統的な方法を提供できる。障壁間隔の単調な変化を提供するならば、他の数学的級数も使用することができる。

40

【 0 1 0 0 】

図 1 3 の障壁配置及び磁石の位置は、障壁の先端が回転子表面に最も接近する複数の点の間隔の図示目的のために示される。実用的な回転子設計において、障壁形状は、回転子シャフトと回転子の表面との間の回転子積層領域内に適合しなければならないことによって制約される。障壁のセクションは、湾曲していてもよいし、直角以外の角度で配置されていてもよい。さらに、同期リラクタンスの機械的強度のために、通常は、より大きな回転子では、積層鋼のブリッジセクションを提供して、シャフトからさらに離れている鋼セクションに半径方向の支持を提供することが必要である。

50

【 0 1 0 1 】

図 1 5 は、本発明にかかる設計された実用的な回転子の例を示す。回転子積層 1 1 0 は、4 つの直接軸 1 1 2 と、4 つの直交軸 1 1 4 とを有する 4 極積層である。障壁間隔のために実施される設計は、d 軸 1 1 2 の最も幅の広いものから、直交軸 1 1 4 の最も狭い間隔まで変化する障壁間隔を漸進的に減少させる。この例では、初期軸は直軸であり、仕上げ軸は直交軸である。各半極には 4 つの障壁があり、仕上げ軸上に障壁位置があり、1 対の極当たり合計 1 8 個の回転子障壁点を得られる。残りの鋼はほとんど磁気的効果を有さないから、各直交軸に最も近い第 4 の障壁 1 3 2 は完全に切り取られている。この鋼セクションの第 4 の障壁を越えた除去は、切断部が回転子の円周と交差する位置を画定する等比間隔方式の実施を変更しない。

10

【 0 1 0 2 】

図 1 5 の積層は、永久磁石による同期リラクタンスモータに適しているように設計されている。障壁 1 3 0 を形成する複数のスロットは、磁石が 1 3 0 と印を付けられた 2 4 個のスロットの各々の中に收容されるように全て長方形である。さらに、永久磁石援助のための磁石をスロットに配置することが可能である。回転子積層のエアギャップ面の接線に平行又はほぼ平行である。そのような磁石は、スロット 1 3 1 内に配置することができる。ブリッジ 1 2 0 , 1 2 1 の強化を追加して、半径が大きい場合や回転速度が高い場合において、半径方向応力に対する回転子の外側部分を支持することができる。

【 0 1 0 3 】

図 1 5 の積層は、3 6 個のスロット固定子のために設計されている。初期軸 (d 軸) 上の回転子の障壁点の間の空間は、 $k_i = 1.4$ によって決定される。他のすべての障壁位置は、本発明にかかる式に従って、回転子磁極ピッチの - 0 . 0 1 4 3 に等しい共通の差 d の単一の値を使用して決定される。

20

【 0 1 0 4 】

回転子表面に最も接近するときの障壁の形状は、異なる設計で異なってもよいし、障壁の配置には若干の変動が予想され、その結果、トルクリップル低減の最良の効果が達成されることが理解される。

【図 1】

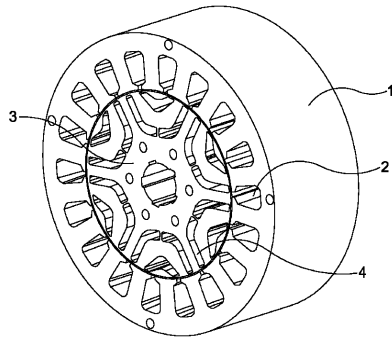


Figure 1

【図 2】

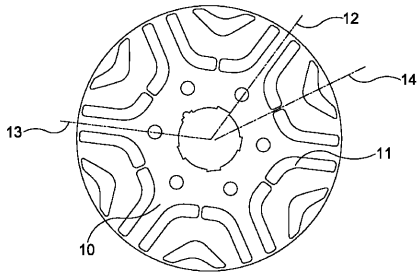
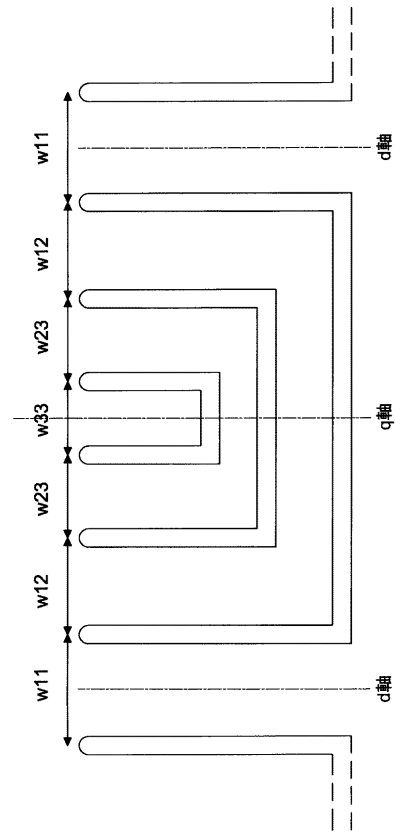
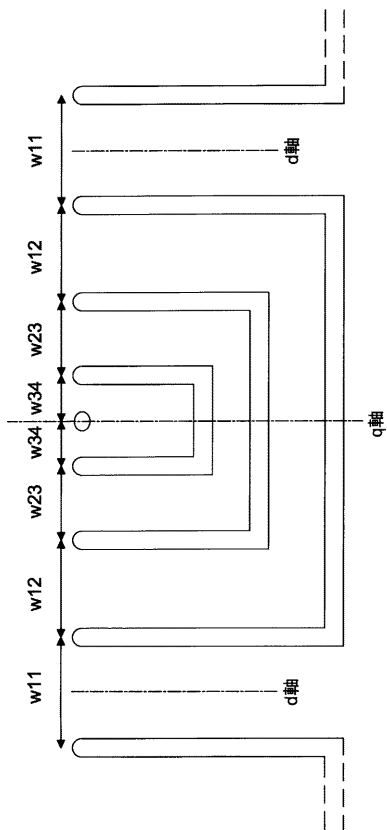


Figure 2

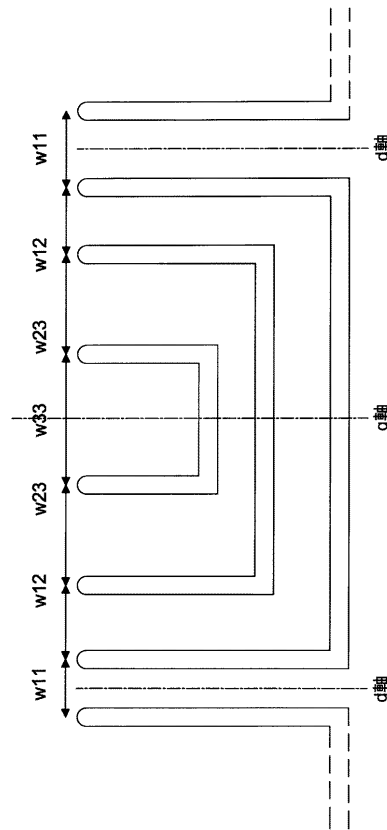
【図 3】



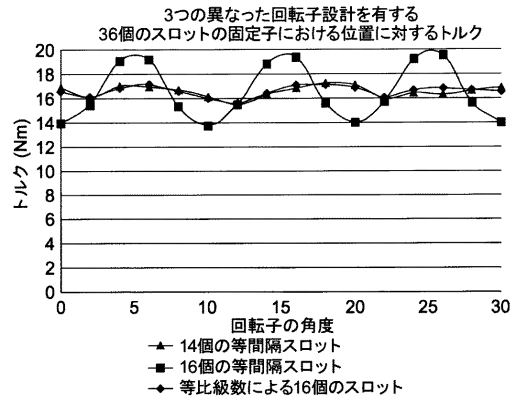
【図 4】



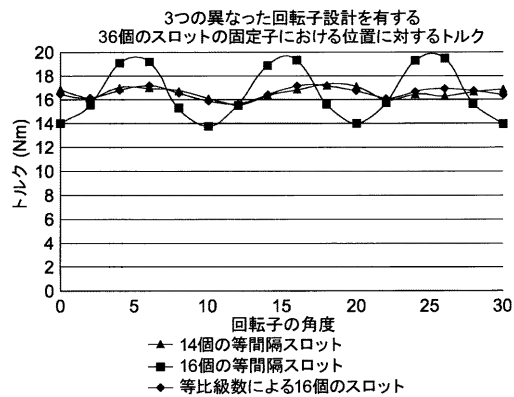
【図 5】



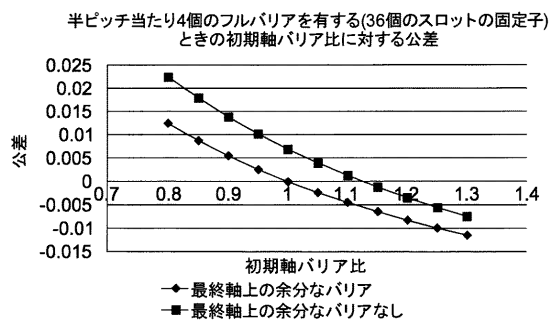
【図 6】



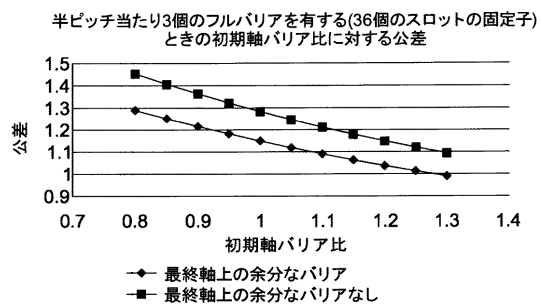
【図 7】



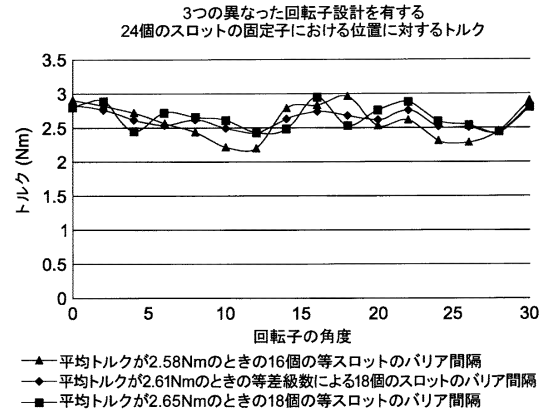
【図 10】



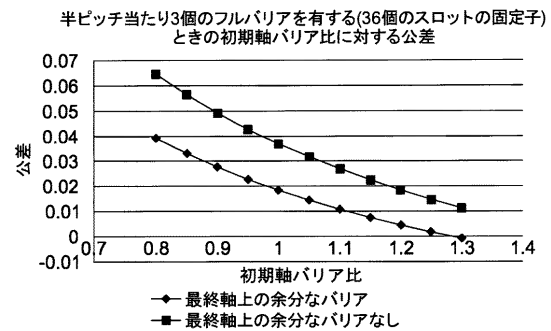
【図 11】



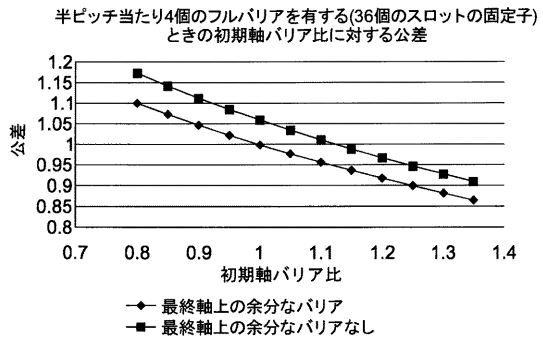
【図 8】



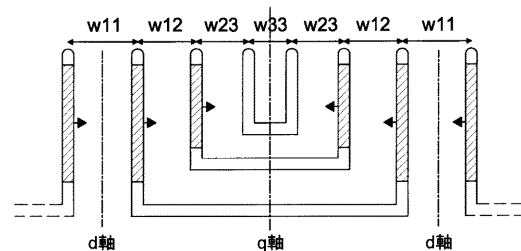
【図 9】



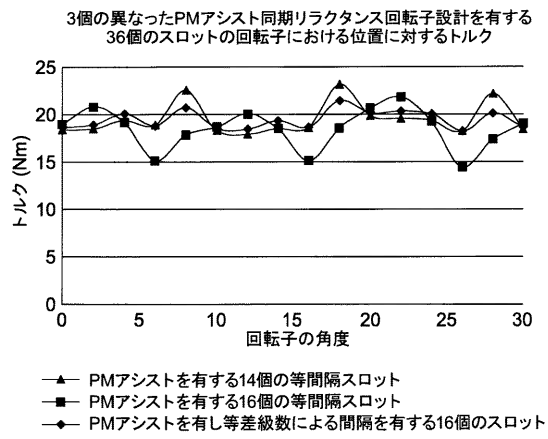
【図 12】



【図 13】



【図 14】



【図 15】

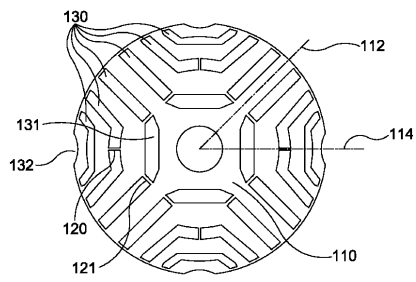


Figure 15

フロントページの続き

(72)発明者 チャールズ・ポロック

英国エルイー１５・６キューダブリュー、レスターシャー、オーカム、ステーション・アプローチ、エジソン・ハウス、テクネレック・リミテッド内

(72)発明者 ヘレン・ポロック

英国エルイー１５・６キューダブリュー、レスターシャー、オーカム、ステーション・アプローチ、エジソン・ハウス、テクネレック・リミテッド内

審査官 三澤 哲也

(56)参考文献 特開２００１－０３７１２７（ＪＰ，Ａ）

特開平１０－０１４１８５（ＪＰ，Ａ）

特開２００２－０７８２５９（ＪＰ，Ａ）

特開２００９－０７７４５８（ＪＰ，Ａ）

SOEK-HEE HAN ET AL, Design tradeoffs between Stator Core Loss and Torque Ripple in IPM Machines, INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING, IAS '08 IEEE, 2008年10月5日, 1-8

(58)調査した分野(Int.Cl., D B名)

H 0 2 K 1 / 2 4

H 0 2 K 1 / 2 7

H 0 2 K 1 9 / 1 0