

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-96909

(P2004-96909A)

(43) 公開日 平成16年3月25日(2004.3.25)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>	F I	テーマコード (参考)
H02K 1/27	H02K 1/27 501M	5H002
H02K 1/22	H02K 1/27 501A	5H619
H02K 19/10	H02K 1/27 501K	5H622
	H02K 1/22 A	
	H02K 19/10 A	
審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 16 頁)		

(21) 出願番号	特願2002-255982 (P2002-255982)	(71) 出願人	000173784 財団法人鉄道総合技術研究所 東京都国分寺市光町2丁目8番地38
(22) 出願日	平成14年8月30日 (2002.8.30)	(74) 代理人	100090033 弁理士 荒船 博司
		(74) 代理人	100093045 弁理士 荒船 良男
		(72) 発明者	近藤 稔 東京都国分寺市光町二丁目8番地38 財 団法人鉄道総合技術研究所内
		Fターム(参考)	5H002 AA05 AA09 AB01 AB07 AE08 5H619 AA01 BB01 BB24 PP02 PP06 PP08 5H622 AA03 CA02 CA07 CB04 CB05 QB02

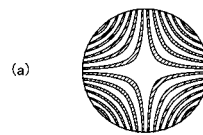
(54) 【発明の名称】 リラクタンスマータ

(57) 【要約】

【課題】より適切な形状の磁気障壁層を備える回転子を具備するリラクタンスマータの実現すること。

【解決手段】回転子のd軸方向の磁気抵抗が小さく、且つ、q軸方向の磁気抵抗が大きくなる磁気障壁層の形状が、回転子の突極性を大きくする。そこで、磁気障壁層の形状を磁力線を表す  $f = (r/r_0)^p \sin(p)$  の等値線に沿った形状とする。また回転子の製作を簡単化するために、磁気障壁層の形状を表す  $f = (r/r_0)^p \sin(p)$  の等値線を直線で近似し、近似した直線の組み合わせに沿って磁気障壁層を形成する。

【選択図】 図4



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

回転軸から半径方向に対して、 $f(r, \theta) = (r/r_0)^p \sin(p\theta)$  ( $r$ : 回転軸からの距離、 $r_0$ : 回転子の半径、 $\theta$ : 偏角、 $p$ : 極対数) の等値線に沿って形成された磁気障壁層が積層されている回転子を具備することを特徴とするリラクタンスモータ。

## 【請求項 2】

$f(r, \theta) = (r/r_0)^p \sin(p\theta)$  の値域が  $\{1/(2nl)\} \times \{(2il - 1) \pm K_a\}$  ( $nl$ : 層数、 $il$ : 軸中心からの層の順位、 $K_a$ : 磁路の厚さと磁気障壁層の厚さの合計に対する磁気障壁層の厚さの比) であることを特徴とする請求項 1 に記載のリラクタンスモータ。

10

## 【請求項 3】

磁気障壁層の一側面の延伸面が、前記回転子の回転軸から  $d$  軸方向に  $r_0 / (\cos(\theta/2p))$  離れた位置にある点を通るように当該磁気障壁層が形成されていることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載のリラクタンスモータ。

## 【請求項 4】

$p$  が 2 であって、前記回転子の回転軸から  $q$  軸方向に  $r_0 (\tan \theta)^{1/p}$  ( $\theta$  は磁気障壁層の前記一側面が  $d$  軸となす角度) 離れた位置で  $q$  軸と直交する面の一部が、磁気障壁層の他側面を形成していることを特徴とする請求項 3 に記載のリラクタンスモータ。

20

## 【請求項 5】

$p$  が 2 であって、 $\tan \theta = \{1/(2nl)\} \times \{(2il - 1) \pm K_a\}$  を満たす請求項 4 に記載のリラクタンスモータ。

## 【請求項 6】

$nl = m + 0.5$  ( $m$  は 0 以上の整数) であり、前記回転子の表面の  $q$  軸方向の部分が凹部状に形成されていることを特徴とする請求項 2 ~ 5 の何れか一項に記載のリラクタンスモータ。

## 【請求項 7】

$K_a$  が  $1/3$  であることを特徴とする請求項 2 ~ 6 の何れか一項に記載のリラクタンスモータ。

30

## 【請求項 8】

磁気障壁層は、回転軸から半径方向に沿って形成されたブリッジ部を備え、回転子の表面部分にはブリッジ部が無いことを特徴とする請求項 1 ~ 7 のいずれか一項に記載のリラクタンスモータ。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

## 【発明の属する技術分野】

本発明はリラクタンスモータに関するものである。

## 【0002】

## 【従来の技術】

40

近年、シンクロナスリラクタンスモータや埋込磁石形永久磁石同期電動機など、リラクタンストルク応用電動機が広く用いられている。リラクタンストルクは、回転子の磁氣的な突極構造によって生じる為、回転子の構造は電動機の特性に大きな影響を及ぼす。大きなリラクタンストルクを生み出すことができる回転子構造として磁気障壁層が複数積み重なった構造があり、その層の厚さ、層数と電動機特性の関係については多くの研究がなされている。

## 【0003】

## 【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上述の研究においては、簡単な磁気障壁層の形状を先天的に与えた上で、その層数や厚みに対する電動機特性の変化を調べているものであった。従って、磁気障壁

50

層の形状そのものについてどのような形状が最も突極性を大きくできるか等は十分研究されていなかった。

【0004】

本発明の目的は、より適切な形状の磁気障壁層を備える回転子を具備するリラクタンスモータの実現である。

【0005】

【課題を解決するための手段】

以上の課題を解決するために、請求項1に記載の発明のリラクタンスモータは、回転軸から半径方向に対して、 $f(r, \theta) = (r/r_0)^p \sin(p\theta)$  ( $r$ : 回転軸からの距離、 $r_0$ : 回転子の半径、 $\theta$ : 偏角、 $p$ : 極対数) の等値線に沿って形成された磁気障壁層が積層されている回転子を具備することを特徴としている。

10

【0006】

この請求項1に記載の発明によれば、磁気障壁層が  $f(r, \theta) = (r/r_0)^p \sin(p\theta)$  の等値線に沿って形成されることとなる。このため、回転子のd軸方向の磁気抵抗が小さくなり、q軸方向の磁気抵抗が大きくなるため、回転子の突極性が高くなり、リラクタンスモータの最大トルク、力率、効率等の基本的な電動機特性を向上させることができる。ここで等値線とは、 $f(r, \theta) = (r/r_0)^p \sin(p\theta)$  がある値となるときの座標  $(r, \theta)$  の点の集合によって構成される線である。また、磁気障壁層の形状を式で表すことによって、回転子の設計等が容易になり、回転子の設計の為の労力や時間等を削減することができる。

20

【0007】

請求項2に記載の発明は、請求項1に記載のリラクタンスモータにおいて、 $f(r, \theta)$  の値域が  $\{1/(2nl)\} \times \{(2il-1) \pm K_a\}$  ( $nl$ : 層数、 $il$ : 軸中心からの層の順位、 $K_a$ : 磁路の厚さと磁気障壁層の厚さの合計に対する磁気障壁層の厚さの比) であることを特徴としている。

【0008】

この請求項2に記載の発明によれば、 $f(r, \theta) = (r/r_0)^p \sin(p\theta)$  が  $\{1/(2nl)\} \times \{(2il-1) \pm K_a\}$  の値となる等値線に沿って磁気障壁層が形成されるために回転子の突極性が高くなり、リラクタンスモータの電動機特性を向上させることができる。また、磁気障壁層の形状を式で表すことによって、回転子の設計等が容易になり、回転子の設計の為の労力や時間等を削減することができる。

30

【0009】

請求項3に記載の発明は請求項1又は2に記載のリラクタンスモータであって、磁気障壁層の延伸面が、前記回転子の回転軸からd軸方向に  $r_0 / (\cos(\theta/2p))$  離れた位置にある点を通るように磁気障壁層の一側面を形成していることを特徴としている。

【0010】

また請求項4に記載の発明は請求項3に記載のリラクタンスモータであって、 $p$  が2であって、前記回転子の回転軸からq軸方向に  $r_0^p \tan(\theta)$  ( $\theta$  は磁気障壁層の前記位置側面がd軸となす角度) 離れた位置でq軸と直交する面の一部が、磁気障壁層の一側面を形成していることを特徴としている。

40

更に請求項5に記載の発明は、請求項4に記載のリラクタンスモータであって、 $p$  が2であって、 $\tan(\theta) = \{1/(2nl)\} \times \{(2il-1) \pm K_a\}$  を満たすことを特徴としている。

【0011】

この請求項3、4及び5に記載の発明によれば、磁気障壁層の形状を簡単な式で表すことによって、回転子の設計等が容易になり、回転子の設計の為の労力や時間等を削減することができる。更に、磁気障壁層を直線近似形状にすることができるため、加工が容易になる。また磁気障壁層内に磁石を挿入する場合は当該磁石の加工も容易になり、加工コストを抑えることができる。

【0012】

50

請求項 6 に記載の発明は、 $n l = m + 0.5$  ( $m$  は 0 以上の整数) であり、前記回転子の表面の  $q$  軸方向の部分が凹部状に形成されていることを特徴とする請求項 2 ~ 4 の何れか一項に記載のリラクタンスマータとしている。

【0013】

この請求項 6 に記載の発明によれば、回転子の表面の凹部状の部分を磁気障壁層とすることにより、回転子の形状が簡素化され、製作が容易となる。

【0014】

請求項 7 に記載の発明は、 $K_a$  が  $1/3$  であることを特徴とする請求項 2 ~ 5 の何れか一項に記載のリラクタンスマータとしている。

【0015】

この請求項 7 に記載の発明によれば、 $K_a = 1/3$  として回転子の磁気障壁層の形状を決定することにより、回転子のリラクタンストルクを増大させることができる。具体的には、リラクタンストルクは、 $T = p (L_d - L_q) i_d i_q$  ( $T$ : リラクタンストルク、 $p$ : 極対数、 $L_d$ :  $d$  軸インダクタンス、 $L_q$ :  $q$  軸インダクタンス、 $i_d$ :  $d$  軸電流、 $i_q$ :  $q$  軸電流) の式で表され、 $K_a = 1/3$  程度のとき ( $L_d - L_q$ ) が最大となる。従って、 $K_a = 1/3$  となる回転子をリラクタンスマータに具備させることにより、リラクタンスマータの電動機特性を向上させることができる。

【0016】

請求項 8 に記載の発明は、磁気障壁層に、回転軸から半径方向に沿って形成されたブリッジ部を備えたことを特徴とする請求項 1 ~ 6 のいずれか一項に記載のリラクタンスマータ

10

20

【0017】

この請求項 8 に記載の発明によれば、ブリッジ部を半径方向に沿って形成することにより、回転子の回転によってブリッジ部には引張力のみが働く為、ブリッジ部の幅を細くすることができる。そしてブリッジ部の幅が細くなると磁気が通り難くなることから、ブリッジ部を通る磁束を減少させることができ、ブリッジ部の存在による突極性の低下を防ぐことができる。

【0018】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態を図示例と共に説明する。

30

【0019】

(I) 回転子の構造

図 1 (a) は、リラクタンスマータの回転子 10 を回転軸に垂直な平面で切断した断面の模式図である。回転子 10 は、鉄心層 101、磁気障壁層 102 及び鉄心 103 からなる。回転子 10 には、外周面 (回転子表面) に対して逆方向に湾曲する磁気障壁層 102 が積層されており、この積層された磁気障壁層 102 を一群として周方向に等間隔に配設されている。

【0020】

回転子 10 において、軸中心である点  $N$  から磁束の通りやすい方向を  $d$  軸、 $d$  軸から半極分回転した磁気障壁層 102 によって磁束が通り難くなっている方向を  $q$  軸とする。具体的には、回転子 10 は極対数  $p = 2$  であるから、回転子 10 の軸中心である点  $N$  を中心に  $90^\circ$  間隔で 4 つの磁気障壁層が配設される。即ち、回転子 10 における  $q$  軸は  $d$  軸に対して点  $N$  を中心として半極分である  $45^\circ$  回転した方向となる。

40

【0021】

リラクタンスマータは、回転子 10 の  $d$  軸方向と  $q$  軸方向の磁気の通り難さ (リラクタンクス) の違いによりトルクが発生する。リラクタンストルクは、以下の式で表される。

$$T = p (L_d - L_q) i_d i_q \cdots (1)$$

ここで、 $T$  はリラクタンストルク、 $p$  は極対数、 $L_d$  は  $d$  軸インダクタンス、 $L_q$  は  $q$  軸インダクタンス、 $i_d$  は  $d$  軸電流、 $i_q$  は  $q$  軸電流である。式 (1) より、リラクタンスマータのトルクを大きくする為には、 $L_d - L_q$  を大きくする必要がある。即ち、 $L_d -$

50

$L_q$  が大きくなるような構造を持つ回転子 10 を設計すればよい。

【0022】

図 1 ( b ) は、図 1 ( a ) の回転子 10 の一部を拡大した図である。図 1 ( b ) のように、磁気障壁層 102 の形状は極座標  $r$  平面上で定義される関数  $f(r, \theta)$  の等値線として表現することができる。ここで  $r$  は点 N からの距離、 $\theta$  は偏角である。また  $df_b$  は磁気障壁層 102 の厚さに対応する値、 $df_s$  は鉄心層 101 の厚さに対応する値であり、一定値である。そして、鉄心層 101 のうち、中心 N に近い鉄心層から、鉄心層 101 a、鉄心層 101 b 及び鉄心層 101 c とする。同様に、磁気障壁層 102 のうち、中心 N に近い磁気障壁層から磁気障壁層 102 a、磁気障壁層 102 b 及び磁気障壁層 102 c とする。

10

【0023】

図 1 ( b ) において、 $f = f_i$  となるときの座標  $(r, \theta)$  の点の集合によって構成された線 (等値線) と、 $f = f_i + df_b$  となるときの等値線とに挟まれた領域が磁気障壁層 102 a である。また、 $f = f_i + df_b$  となるときの等値線と  $f = f_i + df_b + df_s$  となるときの等値線とに挟まれた領域が鉄心層 101 a である。以下、 $f_{i+1} = f_i + df_b + df_s$  として鉄心層 101 b、101 c、磁気障壁層 102 b、102 c も同様に表すことができる。

【0024】

ここで、鉄心層 101 の厚さと磁気障壁層 102 の厚さの合計に対する磁気障壁層 102 の厚さの比  $K_a$  は、

20

$$K_a = df_b / (df_s + df_b) \cdots (2)$$

となる。以下、磁気障壁層 102 の形状及び厚さと回転子 10 の磁気抵抗の関係について述べる。更にリラクタンスモータの特性を考える上で重要な設計変数として磁気障壁層の層数があるが、これについては層数が十分に多い場合、電動機特性は層数に大きく依存しないことが知られている。従って、本実施の形態では簡単化の為、層数が無限大として説明する。

【0025】

また、本実施の形態では、 $d$  軸方向で  $\theta = 0$  となる極座標系を考え、極対数を  $p$ 、 $d$  軸方向の磁気抵抗を求める際の回転子表面の磁位分布を  $\phi_0 \cos(p\theta)$  とする。更に、 $q$  軸方向の磁気抵抗を求める際の回転子表面の磁位分布を  $\phi_0 \sin(p\theta)$  とする。

30

【0026】

(II)  $d$  軸方向の磁気抵抗モデル

$d$  軸方向にのみ磁束が流れている状況を考えた場合、磁気障壁層 102 の透磁率が鉄心層 101 の透磁率に比べて十分小さいとき、磁気障壁層 102 の磁束密度は 0 とみなすことができる。またある鉄心層 101 に流れる磁束は回転子 10 の表面に設定された磁位によって決定される。故に、鉄心層 101 が現れている回転子 10 の表面を通過する磁束密度は、図 2 に示すように、 $K_a = 0$  の場合における同じ位置での磁束密度に等しい。

【0027】

一方、図 2 ( b ) に示すように、磁気障壁層 102 が現れている回転子 10 の表面を通過する磁束密度は常に 0 となる。従って、 $d$  軸方向の磁気抵抗  $R_{rd}$  は、 $K_a = 0$  の場合の磁気抵抗  $R_{dk_a=0}$  を用いて次式で表される。

40

$$R_{rd} = R_{dk_a=0} / (1 - K_a) \cdots (3)$$

【0028】

(III)  $q$  軸方向の磁気抵抗モデル

$q$  軸方向にのみ磁束が流れている状況を考えた場合、鉄心層 101 の磁気抵抗が磁気障壁層 102 の磁気抵抗に比べて十分に小さければ、各鉄心層 101 の磁位が一様であるとみなすことができる。すると、 $K_a = 1$  の時の磁位分布の等値線形状は、磁気障壁層 102 の形状を表す関数  $f(r, \theta)$  の形状と一致する。更に  $K_a = 1$  の時の回転子 10 の表面における磁位分布は、 $\phi_0 \sin(p\theta)$  で与えられる。

【0029】

50

鉄心層 101 の磁位は回転子 10 の表面に与えられる磁位分布により決まる為、鉄心層 101 間の磁位差は  $K_a$  の値によらず一定である。また、磁気障壁層 102 における磁位分布の等値線は、関数  $f(r, \theta)$  の等値線の形状と一致する。従って、図 3 (b) の場合の磁気障壁層 102 内の磁位勾配は、図 3 (a) の  $K_a = 1$  としたときの磁位勾配の  $1/K_a$  倍となる。ここで、図 3 中の一点鎖線は、磁位の等値線を示している。

【0030】

即ち、図 3 (b) において、各磁気障壁層 102 を通過する磁束が  $1/K_a$  倍となるため、磁束密度基本波の大きさも  $1/K_a$  倍となる。そして、 $q$  軸方向の磁気抵抗  $R_{r,q}$  は、 $K_a = 1$  の時の磁気抵抗  $R_{q,K_a=1}$  を用いて以下の式となる。

$$R_{r,q} = R_{q,K_a=1} K_a \cdots (4)$$

10

【0031】

(IV) 磁気障壁層の形状

回転子 10 の突極性を高めるためには、 $R_{r,d}$  を小さく、且つ、 $R_{r,q}$  を大きくすることが必要である。即ち、式 (3) 及び (4) において、 $R_{d,K_a=0}$  を最小にし、且つ、 $R_{q,K_a=1}$  を最大にする磁気障壁層の形状が回転子 10 の突極性を最大にする。以下、具体的に磁気障壁層の形状について説明する。解析的扱いを可能にする為に、本実施の形態では鉄心層の磁気飽和による透磁率の変化を無視し、透磁率が一定値  $\mu_s$  であるとする。

【0032】

まず、 $R_{d,K_a=0}$  が最小となる磁気障壁層の形状について説明する。回転子 10 に磁気障壁層がないとき、 $R_{r,d}$  が最も小さくなる。この時の磁位分布 及び磁気ベクトルポテンシャル  $A$  (2次元問題なのでスカラー量) は、次式の通り解析解として表すことができる。

20

【数1】

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \phi_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^p \cos p\theta \\ A &= \mu_s \phi_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^p \sin p\theta \end{aligned} \right\} (5)$$

30

一般に磁力線はベクトルポテンシャル  $A$  の等値線であるので、この場合の磁力線は  $f(r, \theta) = (r/r_0)^p \sin(p\theta) \cdots (6)$

の等値線として表すことができる。即ち、磁気障壁層の形状を式 (6) の等値線に沿った形状とすれば、回転子 10 中の磁力線は回転子 10 に磁気障壁層がない場合の磁力線と一致する。つまり、式 (6) の等値線で表される磁気障壁層の形状が  $R_{d,K_a=0}$  を最小にする形状である。

【0033】

次に、 $R_{q,K_a=1}$  が最大となる磁気障壁層の形状について説明する。回転子 10 が真空の透磁率を持つ材質で構成される場合、即ち、回転子 10 中に磁路が存在しないとき、 $R_{r,q}$  が最も大きくなる。この時の磁位分布は、回転子 10 に磁気障壁層がない場合の磁位分布を  $1/2p$  回転させたものとなる。

40

$$= \phi_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^p \sin(p\theta) \cdots (7)$$

ここで、磁気障壁層の形状を式 (6) の等値線とすれば、その回転子 10 について  $K_a = 1$  としたときの磁位分布は、回転子 10 が真空の透磁率で構成されている場合の磁位分布 (式 (7)) と一致する。即ち、式 (6) の等値線で表される磁気障壁層の形状が、 $R_{q,K_a=1}$  を最大にする形状である。従って、式 (6) の等値線で表される磁気障壁層の形状は、回転子 10 の  $R_{d,K_a=0}$  を最小にし、且つ、 $R_{q,K_a=1}$  を大きくし、回転子 10 の突極性を最大にする。

【0034】

図 4 (a) は極対数  $p = 2$ 、(b) は  $p = 3$ 、(c) は  $p = 4$  の回転子を示した図である

50

。各回転子は式(6)の等値線で表される磁気障壁層が6層あり、 $K_a = 0.25$ である。

【0035】

また、「マルチフラックスバリア形シンクロナスリラクタンスモータのロータ構造と特性比較(電学論D, 118巻10号, 平成10年, pp1177-1184)」に開示されている様に、回転子のリラクタンストルクを大きくする $K_a$ は約 $1/3$ であることが一般的に知られている。従って、本実施の形態においても、 $K_a = 1/3$ として以下を説明する。

【0036】

以上のように、回転子の突極性を最大にする磁気障壁層の形状は、 $K_a = 0$ の回転子においてd軸方向にのみ磁束が流れるときに発生する磁力線に沿った形状であり、また $K_a = 1$ の回転子においてq軸方向にのみ磁束が流れるときに発生する磁位分布に沿った形状である。そして磁気障壁層の形状は式(6)によって解析的に表すことができる。このように磁気障壁層の形状を数式化することによって、回転子及び磁気障壁層の条件を変化させても、磁気障壁層の設計を容易に行うことができ、回転子の設計の為の労力や時間等を削減できる。

【0037】

(V) 回転子の設計

以上において、回転子10の磁気障壁層102の形状について解析的に求めた。しかし、式(6)で表される磁気障壁層を回転子に正確に加工するためには、高度な技術と労力が必要であり、加工費等もかかる。そこで、回転子の製作を容易なものとするために、式(6)を直線に近似し、その近似線を用いて磁気障壁層の形状を決定する方法を説明する。

【0038】

図5は、回転子中のある磁路の模式図である。図5において、鉄心層50を通るある磁路をn1層(n1は1以上の整数)に均等分割する。本実施の形態では、例えば $n1 = 3$ とする。各層の厚さは $1/(n1)$ である。また、図5の左の層より $i1 = 1$ 、 $i1 = 2$ 、 $i1 = 3$ とする。

【0039】

そして図6に示すように、各層の中心(図中一点鎖線)に厚さが各層の $K_a$ 倍( $0 < K_a < 1$ )となる磁気障壁層60を挿入する。各磁気障壁層60の厚さは $db = K_a / (n1)$ である。

【0040】

次に、図7において、鉄心層50と磁気障壁層60のそれぞれの境界位置 $x1 \sim x6$ を式で表す。横軸をxとし、 $i1 = 1$ の層において、 $i1 = 2$ の層と接していない面とx軸の交点を0とすると、磁気障壁層中心位置 $A = 1/2n1$ 、位置 $B = 3/2n1$ 、位置 $C = 5/2n1$ である。即ち、

$$\text{位置 } x1 = \{ 1 / (2n1) \} - \{ K_a / (2n1) \}$$

$$\text{位置 } x2 = \{ 1 / (2n1) \} + \{ K_a / (2n1) \}$$

$$\text{位置 } x3 = \{ 3 / (2n1) \} - \{ K_a / (2n1) \}$$

$$\text{位置 } x4 = \{ 3 / (2n1) \} + \{ K_a / (2n1) \}$$

$$\text{位置 } x5 = \{ 5 / (2n1) \} - \{ K_a / (2n1) \}$$

$$\text{位置 } x6 = \{ 5 / (2n1) \} + \{ K_a / (2n1) \}$$

と表される。以上の式より、各境界の位置は、

$$\begin{aligned} \text{位置 } x &= \{ (2i1-1) / (2n1) \} \pm \{ K_a / (2n1) \} \\ &= \{ 1 / (2n1) \} \times \{ (2i1-1) \pm K_a \} \end{aligned}$$

・・・(8)

で表すことができる。

【0041】

10

20

30

40

50

次に、図 8 に示すように、磁気障壁層 80 を極座標系において

$$f = (r / r_0)^p \sin(p \theta) \cdots (9)$$

の関数の等値線で表す。ここで、式 (9) の等値線で表される磁気障壁層の形状は、回転子の突極性を最大にすることは前述した (式 (6) 及び式 (7) 参照)。式 (9) が式 (8) の値を取るように等値線を求めたものが、図 8 の線 L2 ~ L5 である。つまり、線 L2 ~ L5 を鉄心層 70 と磁気障壁層 80 の境界線として回転子に形成することによって、リラクタンストルクを大きくすることができる。

【0042】

具体的に線 L5 を例に挙げて説明する。例えば極対数  $p = 2$ 、 $n_1 = 2$ 、 $K_a = 1/3$  の時、線 L5 について、

$$\begin{aligned} & \{1 / (2n_1)\} \times \{(2i_1 - 1) \pm K_a\} \cdots (8) \\ & = \{(2 \times 1 - 1) - (1/3)\} / (2 \times 2) \\ & = 1/6 \end{aligned}$$

つまり、線 L5 は、式 (9) が  $1/6$  の値を取る時の座標  $(r, \theta)$  の点の集まりによって構成される。線 L4 ~ L2 も同様にして、式 (9) が式 (8) の値を取る時の座標  $(r, \theta)$  の点の集まりによって求めることができる。

また、点 Q は  $(r, \theta) = (r_0, \theta / 2p)$  であり式 (9) に代入すると、

$$\begin{aligned} f &= (r_0 / r_0)^2 \sin(2 \theta / 2 \cdot 2) \\ &= \sin(\theta / 2) \\ &= 1 \end{aligned}$$

となる。従って、線 L1 は式 (9) の値が “1” となる等値線によって構成される。

【0043】

次に、図 9 を用いて、線 L5 の曲線の直線近似線の求め方を説明する。まず、原点を通り、 $x$  軸となす角が  $\theta / 2p$  である直線 A を引く。円と直線 A との交点を Q とする。そして点 Q を通り、回転子の表面に対する接線 B を引く。接線 B と  $x$  軸との交点を  $x'$  とする。次に点 Q を通って  $x$  軸に対する垂線 C を引く。垂線 C と線 L5 の交点を  $Q'$  とする。そして点  $x'$  と点  $Q'$  を結ぶ直線 D を引く。直線 D と  $x$  軸のなす角を  $\theta_1$  とする。次に直線 A と線 L5 の交点  $Q''$  を通り、線 L5 に対する接線 E を引く。原点から接線 E までの直線 A に沿った長さを  $a$  とする。

【0044】

線 L5 について、 $p = 2$  の時の角  $\theta_1$  と長さ  $a$  を求める。点  $Q'$  を座標  $(r_1, \theta_1)$  とする。すると、以下の式が成り立つ。

$$r_0 \cos(\theta / 2p) = r_1 \cos \theta_1 \cdots (10)$$

【0045】

また、式 (10) を変形すると、

$$r_1 / r_0 = \{\cos(\theta / 2p)\} / (\cos \theta_1)$$

上式を式 (9) に代入すると、

【数 2】

$$\begin{aligned} f &= \left( \frac{\cos \frac{\pi}{2p}}{\cos \theta_1} \right)^p \sin p \theta_1 \\ \frac{f}{\left( \cos \frac{\pi}{2p} \right)^p} &= \frac{\sin p \theta_1}{\left( \cos \theta_1 \right)^p} \cdots (11) \end{aligned}$$

式 (11) に  $p = 2$  を代入すると、

【数 3】

10

20

30

40



$$\frac{f}{\left(\cos \frac{\pi}{4}\right)^2} = \frac{\sin 2\theta_1}{\left(\cos \theta_1\right)^2}$$

$$\frac{f}{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2} = \frac{2\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_1}{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_1}$$

$$f = \frac{2\sin\theta_1}{\cos\theta_1} \div 2$$

$$= \tan\theta_1 \quad \dots (12)$$

10

$\theta_1 =$  であるから、

$$f = \left(r / r_0\right)^p \sin(p \theta_1) = \tan \theta_1 \quad \dots (13)$$

となる。ここで、線 L1 ~ L5 は  $\left(r / r_0\right)^p \sin(p \theta_1)$  が  $\{1 / (2nl)\} \times \{(2il - 1) \pm K_a\}$  の値となる時の等値線であるから、

$$\tan \theta_1 = \{1 / (2nl)\} \times \{(2il - 1) \pm K_a\} \quad \dots (14)$$

で表すことができる。即ち、 $\tan \theta_1 = \{1 / (2nl)\} \times \{(2il - 1) \pm K_a\}$  となる  $\theta_1$  によって、近似線 D を作図できる。

【0046】

20

次に長さ a を求める。点 Q' を座標  $(r_2, \theta_2)$  として式 (9) に代入すると、

$$f = \left(r_2 / r_0\right)^p \sin(p \theta_2) \quad \dots (15)$$

式 (15) と  $\theta_2 = \theta_1 / 2$  を連立させて解くと、

$$f = \left(r_2 / r_0\right)^p \sin(\theta_1 / 2)$$

$$r_2 = r_0 \cdot f^{1/p} \quad \dots (16)$$

従って、式 (14) 及び (16) より、 $p = 2$  の時の角  $\theta_1$  と長さ a は、

$$\tan \theta_1 = \{1 / (2nl)\} \times \{(2il - 1) \pm K_a\} \quad \dots (14)$$

$$a = r_2 - f = r_0 \cdot f^{1/p} - f \quad \dots (17)$$

と表すことができる。

【0047】

30

次に、式 (14) 及び (17) を用いた時の回転子の磁気障壁層を示す。まず、図 10 (a) は回転子及び磁気障壁層の条件の一例を示した図である。極対数  $p = 2$ 、層数  $nl = 2$ 、 $K_a = 0.3333$ 、回転子の直径  $d = 312.4$  [mm]、回転子の半径  $r = 156.2$  [mm] とする。

【0048】

図 10 (b) は、図 10 (a) の条件を式 (14) 及び (17) に代入して求めた角  $\theta_1$  及び長さ a の値を示した図である。図 10 (b) に示した数値に従って、半径  $156.2$  [mm] の回転子 11 に磁気障壁層を配置したときの一例の一部の図を図 11 に示す。

【0049】

まず、 $il = 1$  の磁気障壁層を求める。図 11 において、点 x は、点 Q' を通る回転子 11 の表面に対する接線と、線分 OQ' に対して  $\theta_1 / 4$  (一般的には  $\theta_1 / (2p)$ ) 傾いた直線との交点である。そして直線 L1' は点 X を通り、線分 OX とのなす角が  $\theta_1 = 9.46^\circ$  となる直線である。直線 E1' は、中心 O から  $a = 63.8$  [mm] 離れた線分 OQ' 上の点 Q1' を通り、線分 OQ' に対して垂直な線である。そして直線 L1' と直線 E1' とがなす角は、直線 L1' と直線 E1' に接した半径  $30$  [mm] の円弧状とする。

【0050】

続いて、直線 L2' は点 X を通り、線分 OX とのなす角が  $\theta_1 = 18.43^\circ$  となる直線である。直線 E2' は、中心 O から  $a = 90.2$  [mm] 離れた線分 OQ' 上の点 Q2' を通り、線分 OQ' に対して垂直な線である。そして直線 L2' と直線 E2' とがなす角は、直線 L2' と直線 E2' に接した半径  $30$  [mm] の円弧状とする。

50

## 【0051】

直線  $L1'$ 、 $L2'$ 、 $E1'$ 、 $E2'$  と、線分  $OQ'$  と平行で線分  $OQ'$  から点  $X$  方向に距離  $e$  離れた線分と、直線  $L1'$  と直線  $L2'$  とを回転子 11 内で結ぶ円弧と、に囲まれた図中塗り潰しで示した領域が  $i1 = 1$  の磁気障壁層 11a-1 となる。

## 【0052】

次に  $i1 = 2$  の磁気障壁層を求める。直線  $L3'$  は点  $X$  を通り、線分  $OX$  とのなす角が  $= 33.69^\circ$  となる直線である。直線  $E3'$  は、中心  $O$  から  $a = 127.5$  [mm] 離れた線分  $OQ'$  上の点  $Q3'$  を通り、線分  $OQ'$  に対して垂直な線である。そして直線  $L3'$  と直線  $E3'$  とがなす角は、直線  $L3'$  と直線  $E3'$  に接した半径 30 [mm] の円弧状とする。

10

## 【0053】

続いて、直線  $L4'$  は点  $X$  を通り、線分  $OX$  とのなす角が  $= 39.81^\circ$  となる直線である。直線  $E4'$  は、中心  $O$  から  $a = 142.6$  [mm] 離れた線分  $OQ'$  上の点  $Q4'$  を通り、線分  $OQ'$  に対して垂直な線である。そして直線  $L4'$  と直線  $E4'$  とがなす角は、直線  $L4'$  と直線  $E4'$  に接した半径 10 [mm] の円弧状とする。

## 【0054】

直線  $L3'$ 、 $L4'$ 、 $E3'$ 、 $E4'$  と、線分  $OQ'$  と、直線  $L3'$  と直線  $L4'$  とを回転子 11 内で結ぶ円弧と、に囲まれた図中塗り潰しで示した領域が  $i1 = 2$  の磁気障壁層 11b-1 となる。

## 【0055】

図 12 は、図 10 及び 11 を用いて説明した回転子 11 における磁気障壁層の形状及び配置位置に基づいて、回転子 11 全体に磁気障壁層を配置した図である。磁気障壁層 11a-2 及び 11b-2 は、線分  $OQ'$  に対して磁気障壁層 11a-1 及び 11b-1 と線対称の位置に配置される。尚、磁気障壁層 11b-1 と 11b-2 は、便宜上異なる符号を付しているがそれぞれ境界は存在せず、1つの磁気障壁層を形成している。そして磁気障壁層 11a-1、11b-1、11a-2 及び 11b-2 と同じ形状の他の磁気障壁層が、点  $O$  を中心として  $90^\circ$  の間隔で 3ヶ所に配置される。

20

## 【0056】

磁気障壁層 11a-1 の内部には、磁石 121 が埋め込まれる。磁石 121 は断面が台形の形状をなし、希土類磁石等によって実現される。また、 $i1 = 1$  の他の磁気障壁層においても同様に磁石が埋め込まれる。磁気障壁層に磁石を埋め込むことにより、モータの出力トルクを増加させることができる。

30

## 【0057】

以上のように、式 (6) を直線の式で近似した式 (14) 及び (17) に基づいて、回転子 11 における磁気障壁層の形状及び配置位置を決定することによって、磁気障壁層をほぼ直線の組み合わせで形成できる為、回転子 11 の設計及び製作等を容易にできる。従って、回転子 11 の製作に係る製作時間及び労力を削減できる。更に、磁気障壁層に埋め込む磁石 12 の形状の加工も容易になるため、加工費等も削減できる。

## 【0058】

図 13 は、図 12 に示した回転子 11 の磁気障壁層の形状を変形させた一例を示した図である。13a、13a' 及び 13a'' は回転子 11 の磁気障壁層 11a-1 及び 11a-2 を変形させた  $i1 = 1$  の磁気障壁層であり、13b、13b' 及び 13b'' は回転子 11 の磁気障壁層 11b-1 及び 11b-2 を変形させた  $i1 = 2$  の磁気障壁層である。また、磁気障壁層 13a には磁石 135 が、磁気障壁層 13a'' には磁石 136 がそれぞれ埋め込まれている。

40

## 【0059】

ここで、鉄心と鉄心層又は鉄心層間を接続する部分をブリッジ部という。図 12 の回転子 11 において、例えば磁気障壁層 11a-1 の回転子 11 の表面に近い部分には鉄心と鉄心層を接続するブリッジ部 123 がある。同様に磁気障壁層 11b-1 にはブリッジ部 125、磁気障壁層 11a-2 にはブリッジ部 124、磁気障壁層 11b-2 にはブリッジ

50

部 1 2 6 がある。回転子 1 1 が回転している際、その回転の遠心力によってこれらのブリッジ部は回転子 1 1 の軸中心に向かって凸状に変形する。

【 0 0 6 0 】

この変形を防ぐ為に、磁気障壁層 1 3 a 及び 1 3 a " の形状を表面まで延長し、表面に隣接する各ブリッジ部を取り除く。そして、磁気障壁層 1 3 a と 1 3 a ' の間にブリッジ部 1 3 1 を設け、磁気障壁層 1 3 a ' と 1 3 a " の間にブリッジ部 1 3 2 を設ける。このブリッジ部 1 3 1 及び 1 3 2 は回転子 1 3 の半径方向に沿って形成され、回転子 1 3 の回転時には引張力のみが働く。従って、ブリッジ部 1 3 1 及び 1 3 2 の幅を細くすることができ、ブリッジ部 1 3 1 及び 1 3 2 を通る磁力線の数を抑えることができる。

【 0 0 6 1 】

同様に、磁気障壁層 1 3 b 及び 1 3 b " の形状も回転子 1 3 の表面まで延長する。そして磁気障壁層 1 3 b と 1 3 b ' の間にブリッジ部 1 3 3 を設け、磁気障壁層 1 3 b ' と 1 3 b " の間にブリッジ部 1 3 4 を設ける。ブリッジ部 1 3 3 及び 1 3 4 は回転子 1 3 の半径方向に沿って形成される。

【 0 0 6 2 】

そして、磁気障壁層 1 3 a 、 1 3 a ' 、 1 3 a " と磁気障壁層 1 3 b 、 1 3 b ' 、 1 3 b " と同じ形状の他の磁気障壁層が、点 O 1 を中心として 9 0 ° の間隔で 3 ヶ所に配置される。

【 0 0 6 3 】

以上のように磁気障壁層とブリッジ部を回転子 1 3 に配置することにより、鉄心層が回転子 1 3 の回転による遠心力によって破壊されることを防ぐことができる。これにより、回転子 1 3 の信頼性を高めることができる。また、ブリッジ部 1 3 1 ~ 1 3 4 を回転子 1 3 の半径方向に沿って形成すると回転子 1 3 の回転によってブリッジ部 1 3 1 ~ 1 3 4 には引張力のみが働く為、ブリッジ部 1 3 1 ~ 1 3 4 の幅を細くすることができる。即ち、ブリッジ部 1 3 1 ~ 1 3 4 の幅が細いと各ブリッジ部を通る漏れ磁束が小さくなる為、漏れ磁束による突極性の低下を抑えることができる。

【 0 0 6 4 】

図 1 4 は、 $n 1 = 1 . 5$  として磁気障壁層を設計したときの一例を示す図である。1 4 a 及び 1 4 a ' は、 $i 1 = 1$  の磁気障壁層である。1 4 b は、 $i 1 = 2$  の磁気障壁層の半分に相当し、回転子の表面側において鉄心層が存在せず、q 軸上の中心 O 2 に向かって凹部状の切欠部となっている。磁気障壁層 1 4 a 及び 1 4 a ' の間にブリッジ部 1 4 1 を設けることにより、磁気障壁層 1 4 a 及び 1 4 a ' より表面にある鉄心層と鉄心とを接続している。また、磁気障壁層 1 4 a には磁石 1 4 2 が、磁気障壁層 1 4 a ' には磁石 1 4 3 がそれぞれ埋め込まれている。そして、磁気障壁層 1 4 a 、 1 4 a ' 、 1 4 b と同じ形状の他の磁気障壁層が、点 O 2 を中心として 9 0 ° の間隔で 3 ヶ所に配置される。

【 0 0 6 5 】

また、回転子 1 4 の鉄心層と固定子との対向面積を大きくする為に、磁気障壁層 1 4 a の表面に突出部 1 4 4 及び 1 4 5 を設けてもよい。突出部 1 4 4 及び 1 4 5 は回転子 1 4 の表面に沿って磁気障壁層 1 4 a を覆うように形成され、2 つの突出部の先端は所定の間隔離れている。この突出部 1 4 4 及び 1 4 5 を結合させる、即ち、磁気障壁層 1 4 a を鉄心層で完全に覆ってしまうと、回転子 1 4 の回転によって発生する遠心力によって応力がかかり、破壊する恐れがある。このため、突出部 1 4 4 及び 1 4 5 の先端部は所定の間隔離して形成される。

【 0 0 6 6 】

以上のように、 $n 1 = 1 . 5$  として回転子 1 4 に磁気障壁層を配置することにより、磁気障壁層の形状を簡単化することができる。これにより、回転子の製作にかかる時間やコストを削減することができる。また、更により堅牢な回転子を実現することができる。

【 0 0 6 7 】

尚、本発明のリラクタンスモータは、上述の図示例にのみ限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内において種々変更を加え得ることは勿論である。

10

20

30

40

50

## 【0068】

## 【発明の効果】

請求項1に記載の発明によれば、磁気障壁層が  $f(r, \theta) = (r/r_0)^p \sin(p\theta)$  の等値線に沿って形成されることとなる。このため、回転子のd軸方向の磁気抵抗が小さくなり、q軸方向の磁気抵抗が大きくなるため、回転子の突極性が高くなり、リラクタンスモータの最大トルク、力率、効率等の基本的な電動機特性を向上させることができる。ここで等値線とは、 $f(r, \theta) = (r/r_0)^p \sin(p\theta)$  がある値となるときの座標  $(r, \theta)$  の点の集合によって構成される線である。また、磁気障壁層の形状を式で表すことによって、回転子の設計等が容易になり、回転子の設計の為の労力や時間等を削減することができる。

10

## 【0069】

請求項2に記載の発明によれば、 $f(r, \theta) = (r/r_0)^p \sin(p\theta)$  が  $\{1/(2n+1)\} \times \{(2i+1) \pm K_a\}$  の値となる等値線に沿って磁気障壁層が形成されたために回転子の突極性が高くなり、リラクタンスモータの電動機特性を向上させることができる。また、磁気障壁層の形状を式で表すことによって、回転子の設計等が容易になり、回転子の設計の為の労力や時間等を削減することができる。

## 【0070】

請求項3、4及び5に記載の発明によれば、磁気障壁層の形状を簡単な式で表すことによって、回転子の設計等が容易になり、回転子の設計の為の労力や時間等を削減することができる。更に、磁気障壁層を直線近似形状にすることができるため、加工が容易になる。また磁気障壁層内に磁石を挿入する場合は当該磁石の加工も容易になり、加工コストを抑えることができる。

20

## 【0071】

請求項6に記載の発明によれば、回転子の表面の凹部状の部分を磁気障壁層とすることにより、回転子の形状が簡素化され、製作が容易となる。

## 【0072】

請求項7に記載の発明によれば、 $K_a = 1/3$  として回転子の磁気障壁層の形状を決定することにより、回転子のリラクタンストルクを増大させることができる。具体的には、リラクタンストルクは、 $T = p(L_d - L_q) i_d i_q$  ( $T$ :リラクタンストルク、 $p$ :極対数、 $L_d$ :d軸インダクタンス、 $L_q$ :q軸インダクタンス、 $i_d$ :d軸電流、 $i_q$ :q軸電流)の式で表され、 $K_a = 1/3$  程度のとき  $(L_d - L_q)$  が最大となる。従って、 $K_a = 1/3$  となる回転子をリラクタンスモータに具備させることにより、リラクタンスモータの電動機特性を向上させることができる。

30

## 【0073】

請求項8に記載の発明によれば、ブリッジ部を半径方向に沿って形成することにより、回転子の回転によってブリッジ部には引張力のみが働く為、ブリッジ部の幅を細くすることができる。そしてブリッジ部の幅が細くなると磁気が通り難くなることから、ブリッジ部を通る磁束を減少させることができ、ブリッジ部の存在による突極性の低下を防ぐことができる。

## 【図面の簡単な説明】

40

【図1】リラクタンスモータの回転子を回転軸方向から見た概略図と、回転子の一部を拡大して示した図。

【図2】d軸方向の磁束密度について示した図。

【図3】q軸方向の磁位の等値線について示した図。

【図4】4極、6極、8極の磁気障壁層について示した図。

【図5】磁気障壁層の形状及び配置位置の数式化を説明する為の図。

【図6】磁気障壁層の形状及び配置位置の数式化を説明する為の図。

【図7】磁気障壁層の形状及び配置位置の数式化を説明する為の図。

【図8】磁気障壁層の形状及び配置位置の数式化を説明する為の図。

【図9】磁気障壁層の形状及び配置位置の数式化を説明する為の図。

50

【図10】回転子の条件の一例を示した表と、磁気障壁層の形状及び配置位置を示した表。

【図11】図10に示す数値に従って、回転子に一部の磁気障壁層を配置したときの図。

【図12】図10に示す数値に従って、回転子に全磁気障壁層を配置したときの図。

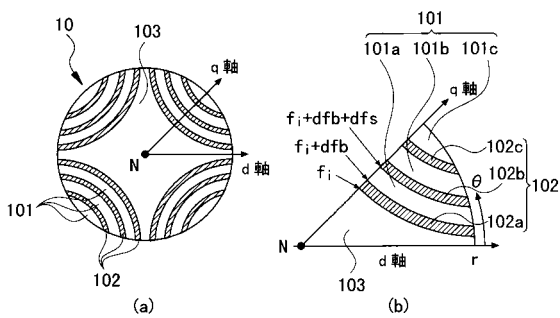
【図13】図12に示した磁気障壁層を変形させたときの図。

【図14】 $n_l = 1.5$ の時の磁気障壁層を示した図。

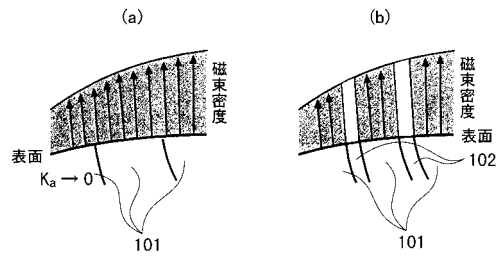
【符号の説明】

- 10、11、13、14 回転子
- 101、50、70 鉄心層
- 102、60、80 磁気障壁層
- 11a-1、11b-1、13a、13a'、13a'' 磁気障壁層
- 13b、13b'、13b''、14a、14a'、14b 磁気障壁層
- 121、122、135、136、142、143 磁石
- 103 鉄心

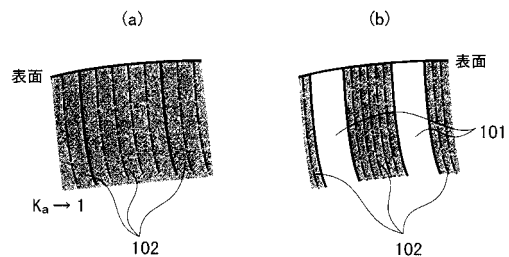
【図1】



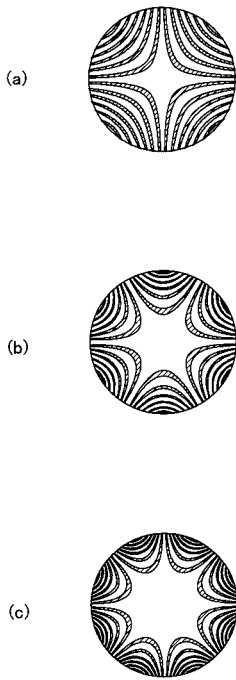
【図2】



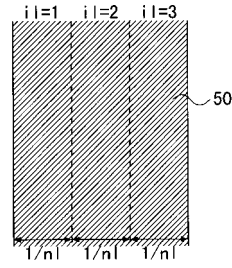
【図3】



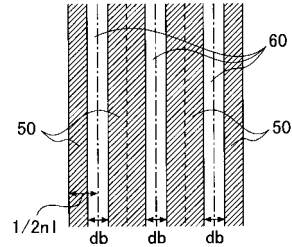
【 図 4 】



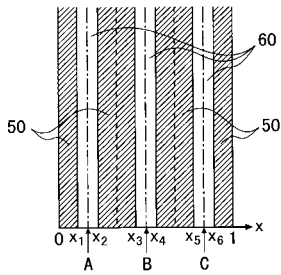
【 図 5 】



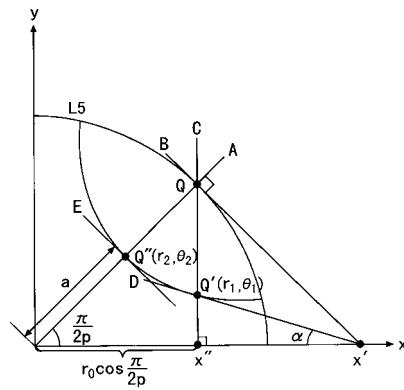
【 図 6 】



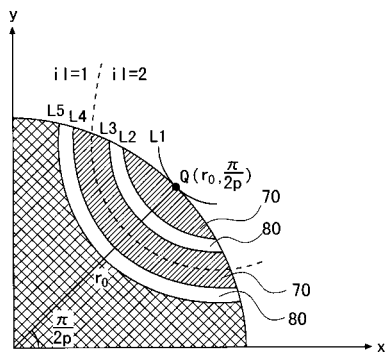
【 図 7 】



【 図 9 】



【 図 8 】



【 図 1 0 】

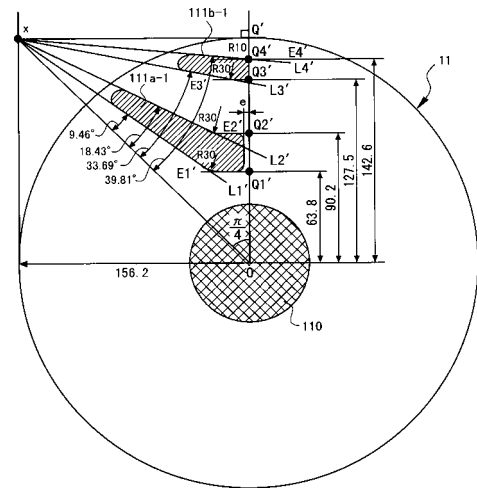
(a)

極対数	p	2
層数	nl	2
Ka		0.3333
回転子直径	d	312.4
回転半径	r	156.2

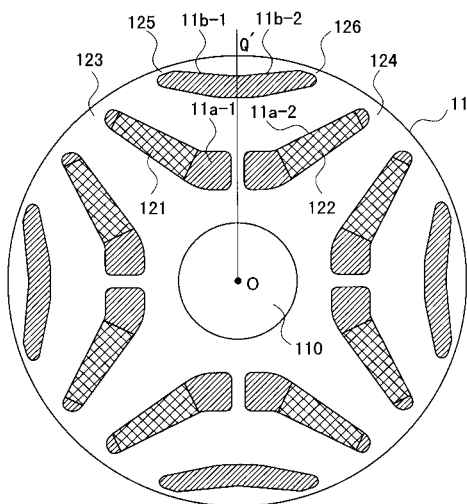
(b)

il	tan α	α (rad)	α (deg)	a
1	0.167	0.165	9.46	63.8
1	0.333	0.322	18.43	90.2
2	0.667	0.588	33.69	127.5
2	0.833	0.695	39.81	142.6

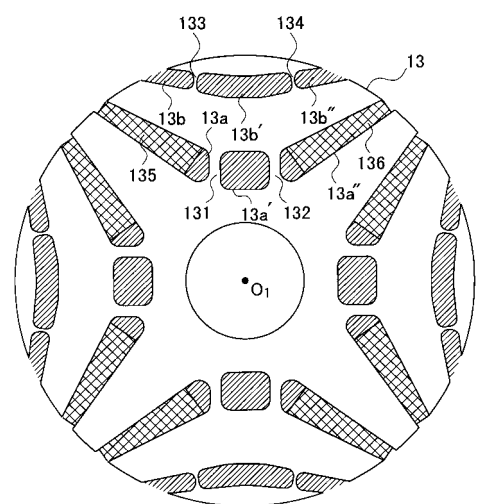
【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



【 図 1 4 】

