

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5078867号
(P5078867)

(45) 発行日 平成24年11月21日(2012.11.21)

(24) 登録日 平成24年9月7日(2012.9.7)

(51) Int. Cl.		F I			
H02K	1/27	(2006.01)	H02K	1/27	501A
H02K	21/16	(2006.01)	H02K	1/27	501M
B62D	5/04	(2006.01)	H02K	21/16	M
			B62D	5/04	

請求項の数 7 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2008-330455 (P2008-330455)	(73) 特許権者	000006013
(22) 出願日	平成20年12月25日(2008.12.25)		三菱電機株式会社
(65) 公開番号	特開2010-154672 (P2010-154672A)		東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(43) 公開日	平成22年7月8日(2010.7.8)	(74) 代理人	100110423
審査請求日	平成22年10月21日(2010.10.21)		弁理士 曾我 道治
		(74) 代理人	100084010
			弁理士 古川 秀利
		(74) 代理人	100094695
			弁理士 鈴木 憲七
		(74) 代理人	100111648
			弁理士 梶並 順
		(74) 代理人	100122437
			弁理士 大宅 一宏
		(74) 代理人	100147566
			弁理士 上田 俊一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 永久磁石型回転電機およびそれを用いた電動パワーステアリング装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

複数相の電機子巻線を有する固定子と、前記固定子に対向するリング形状の永久磁石を有する回転子とを備え、前記永久磁石は、前記永久磁石の回転軸方向両端部における磁極境界のスキュー角が、回転軸中央部における磁極境界のスキュー角よりも大きい角度とされた永久磁石型回転電機において、

前記永久磁石の軸方向の端部から軸方向の長さ L_1 の領域と回転軸方向の中心位置から軸方向に長さ L_2 の領域にスキューが施され、 L_1 の長さの領域のスキュー角を θ_1 (電気角) とし、 L_2 の長さの領域のスキュー角を θ_2 (電気角) としたときに、 L_1 と L_2 と θ_1 と θ_2 で定義される n 次高調波に対するスキュー係数 $K(n)$

【数1】

$$K(n) = \frac{L_2 \frac{\sin n\theta_2}{n\theta_2} + L_1 \frac{\sin(n\theta_1 + n\theta_2)}{n\theta_1} - L_1 \frac{\sin n\theta_1}{n\theta_1}}{L_1 + L_2}$$

ただし、 n は自然数、について、

$K(5) = K(7)$ を満たす L_1 と L_2 と θ_1 と θ_2 を選定としたことを特徴とする永久磁石型回転電機。

【請求項2】

複数相の電機子巻線を有する固定子と、前記固定子に対向するリング形状の永久磁石を

有する回転子とを備え、前記永久磁石は、前記永久磁石の回転軸方向両端部における磁極境界のスキュー角が、回転軸中央部における磁極境界のスキュー角よりも大きい角度とされた永久磁石型回転電機において、

前記永久磁石の軸方向の端部から軸方向の長さ L_1 の領域と回転軸方向の中心位置から軸方向に長さ L_2 の領域にスキューが施され、 L_1 の長さの領域のスキュー角を θ_1 (電気角) とし、 L_2 の長さの領域のスキュー角を θ_2 (電気角) としたときに、 L_1 と L_2 と θ_1 と θ_2 で定義される n 次高調波に対するスキュー係数 $K(n)$

【数 2】

$$K(n) = \frac{L_2 \frac{\sin n\theta_2}{n\theta_2} + L_1 \frac{\sin(n\theta_1 + n\theta_2)}{n\theta_1} - L_1 \frac{\sin n\theta_2}{n\theta_1}}{L_1 + L_2} \quad 10$$

ただし、 n は自然数、について、

$(7/5) \times K(5) = K(7)$ を満たす L_1 と L_2 と θ_1 と θ_2 を選定としたことを特徴とする永久磁石型回転電機。

【請求項 3】

複数相の電機子巻線を有する固定子と、前記固定子に対向するリング形状の永久磁石を有する回転子とを備え、前記永久磁石は、前記永久磁石の回転軸方向両端部における磁極境界のスキュー角が、回転軸中央部における磁極境界のスキュー角よりも大きい角度とされた永久磁石型回転電機において、

前記永久磁石の軸方向の端部から軸方向の長さ L_1 の領域と回転軸方向の中心位置から軸方向に長さ L_2 の領域にスキューが施され、 L_1 の長さの領域のスキュー角を θ_1 (電気角) とし、 L_2 の長さの領域のスキュー角を θ_2 (電気角) としたときに、 L_1 と L_2 と θ_1 と θ_2 で定義される n 次高調波に対するスキュー係数 $K(n)$

【数 3】

$$K(n) = \frac{L_2 \frac{\sin n\theta_2}{n\theta_2} + L_1 \frac{\sin(n\theta_1 + n\theta_2)}{n\theta_1} - L_1 \frac{\sin n\theta_2}{n\theta_1}}{L_1 + L_2} \quad 20$$

ただし、 n は自然数、について、

$K(5)$ と $K(7)$ の 2 乗和が最小となるように L_1 と L_2 と θ_1 と θ_2 を選定したことを特徴とする永久磁石型回転電機。

【請求項 4】

請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載の永久磁石型回転電機であって、前記永久磁石の軸方向の端部から軸方向の長さ L_1 の領域と回転軸方向の中心位置から軸方向に長さ L_2 の領域にスキューが施され、

回転軸方向両端部の長さ L_1 の領域におけるスキュー角度を、回転軸中央部の長さ L_2 領域におけるスキュー角度よりも大きい角度とし

磁極の切り替わり部に曲線状の領域を設けたことを特徴とする永久磁石型回転電機。

【請求項 5】

請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載の永久磁石型回転電機であって

$0.3 \leq L_1 / (L_1 + L_2) \leq 0.7$

としたことを特徴とする永久磁石型回転電機。

【請求項 6】

請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載の永久磁石型回転電機であって、極数とスロット数の比が極数 : スロット数 = $2m : 3m$ (m は自然数) であり、永久磁石はラジアル異方性のリング形状の永久磁石であり、磁極ピッチに対するティース幅の割合が 0.4 以上であることを特徴とする永久磁石型回転電機。

【請求項 7】

請求項 1 ないし 6 のいずれか 1 項に記載の永久磁石型回転電機を備えたことを特徴とす

10

20

30

40

50

る電動パワーステアリング装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は永久磁石型回転電機に関するものであり、特に例えば自動車の電動パワーステアリング装置などに用いるのに適した永久磁石型回転電機に関するものである。

【背景技術】

【0002】

永久磁石型回転電機には一般にトルク脈動が発生する。トルク脈動の原因として、電機子巻線の起磁力高調波や回転子の永久磁石が発生する磁束の高調波成分が考えられる。

10

【0003】

永久磁石モータのトルク脈動を低減する技術の一つとして、従来からスキュー（異なる極性の磁極部分間の境界の方向を軸方向に対して斜めにすること）によって高調波の影響を低減する手法が提案されており、例えば特許文献1には隣接する異極間の境界を中心軸方向から一定角度だけ傾斜させた例、すなわち一定のスキュー角度を設けた例が開示されている。

【0004】

また、特許文献2では、回転軸方向両端部に回転軸方向中央部のスキュー角よりも傾きの小さい、又は逆方向に傾けたスキューを設けた例が開示されている。また、特許文献3には、スキュー角度が回転軸方向両端部において回転軸方向中央部よりも大きくされた永久磁石型モータ用の永久磁石が開示されている。

20

【0005】

【特許文献1】特開平2-74136号公報

【特許文献2】特開平11-136893号公報

【特許文献3】特開2003-169452号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

このような、従来の永久磁石モータにあっては、コギングトルクの低減にはそれぞれ一定の効果があるが、トルク脈動の原因となる無負荷誘起電圧の高調波成分を十分低減することができないため、自動車の電動パワーステアリング装置に組み込む用途として用いられるほどの低トルク脈動のモータを得ることはできなかった。

30

【0007】

従って本発明の目的は、無負荷誘起電圧の高調波成分を十分に低減した低トルク脈動の永久磁石モータを得ることである。

【課題を解決するための手段】

【0008】

この発明によれば、複数相の電機子巻線を有する固定子と、前記固定子に対向するリング形状の永久磁石を有する回転子とを備え、前記永久磁石は、前記永久磁石の回転軸方向両端部における磁極境界のスキュー角が、回転軸中央部における磁極境界のスキュー角よりも大きい角度とされた永久磁石型回転電機において、前記永久磁石の軸方向の端部から軸方向の長さL1の領域と回転軸方向の中心位置から軸方向に長さL2の領域にスキューが施され、L1の長さの領域のスキュー角を θ_1 （電気角）とし、L2の長さの領域のスキュー角を θ_2 （電気角）としたときに、L1とL2と θ_1 と θ_2 で定義されるn次高調波に対するスキュー係数K(n)

40

【0009】

【数 1】

$$K(n) = \frac{L_2 \frac{\sin n\theta_2}{n\theta_2} + L_1 \frac{\sin(n\theta_1 + n\theta_2)}{n\theta_1} - L_1 \frac{\sin n\theta_2}{n\theta_1}}{L_1 + L_2}$$

【0010】

ただし、 n は自然数、について、 $K(5) = K(7)$ を満たす L_1 と L_2 と θ_1 と θ_2 を選定したことを特徴とする永久磁石型回転電機が得られる。

【0011】

また、 L_1 と L_2 と θ_1 と θ_2 の選定条件として、同様のスキュー係数 $K(n)$ について、 $K(5) = K(7)$ の代わりに、 $(7/5) \times K(5) = K(7)$ 、あるいは $K(5)$ と $K(7)$ の 2 乗和が最小となるようにした永久磁石型回転電機が得られる。 10

【発明の効果】

【0012】

この発明によれば、無負荷誘起電圧の 5 次高調波と 7 次高調波を大幅に低減することができるのでトルク脈動の大幅な低減効果を得ることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

実施の形態 1.

図 1 は、この発明の永久磁石型回転電機を用いた車両用の電動パワーステアリング装置 30 を示す概略図である。電動パワーステアリング装置 30 は、ステアリングホイール 31 と、一端がステアリングホイール 31 に取り付けられたコラムシャフト 32 と、コラムシャフト 32 の他端に連結されたウォームギヤ 33 と、ウォームギヤ 33 を介してコラムシャフト 32 に連結されたハンドルジョイント 34 と、ハンドルジョイント 34 の他端に連結され、ウォームギヤ（図示してない）を内蔵するステアリングギヤ 35 と、ステアリングギヤ 35 に連結されて、ステアリングホイール 31 の回転に応じて図示してない操舵車輪を操作するステアリングラック 36 とを備えている。ウォームギヤ 33 にはコントローラ 37 によって制御されて操舵力をアシストするアシストトルクを発生するためのモータである永久磁石型回転電機 38 が連結されている。 20

【0014】

このような本発明の永久磁石型回転電機 38 を用いた電動パワーステアリング装置 30 においては、モータ 38 にて発生するトルクに殆ど脈動が無いため、滑らかなステアリング感覚を得ることが出来、電動パワーステアリング装置における操舵感覚が改善される。 30

【0015】

図 2 には、図 1 に示す永久磁石型回転電機 38 の断面を示す。永久磁石型回転電機 38 は、ハウジング 39 とハウジング 39 に固定されたフレーム 40 と、フレーム 40 内に支持された固定子 42 と、固定子 42 の内周側に設けられて、ハウジング 39 とフレーム 40 に設けられた軸受 43 および 44 によって回転自在に支持された回転子 45 とを備えている。固定子 42 は、フレーム 40 の内周面に設けられて径方向内側に伸びたティース 46 を持つ固定子鉄心 47 と、固定子鉄心 47 に巻回された電機子巻線 48 とを備えている。回転子 45 は、軸受 43、44 で支持された回転軸 49 と、回転軸 49 に取り付けられて固定子 42 に対面する中空円筒形の永久磁石 1 と、永久磁石 1 を回転軸 49 上に支持する回転子鉄心 2 とを備えており、また回転子 45 の回転角度を検出するための回転センサ 50 も回転軸 49 上に設けられている。 40

【0016】

図 3 は図 2 に示す永久磁石型回転電機 38 の回転子の永久磁石 1 の斜視図である。永久磁石 1 の形状はリング形状あるいは筒型であり、周方向に N 極と S 極が交互に配置されるように着磁された磁極部分 3 および 4 を持っている。それぞれの磁極部分 3、4 の間の境界 5 は全体としてスキューして、N 極および S 極の磁極部分 3、4 の境界 5 が全体として回転軸 CL に対して傾けられている。また、N 極の磁極部分 3 と S 極の磁極部分 4 の切 50

り替わり部分すなわち境界 5 のスキュー角すなわち回転軸 C L に対する傾き角度が、永久磁石の軸方向の位置に応じて変えられていて、回転軸方向両端部における領域の磁極の境界部分 5 a、5 c のスキュー角が、回転軸方向中央部における磁極の境界部分 5 b のスキュー角よりも大きい角度とされている。

【 0 0 1 7 】

図示の例では、それぞれの境界 5 は、図 3 において永久磁石 1 の上端の点 A から点 B までのスキュー角 θ_1 の境界部分 5 a と、点 B から点 C までのスキュー角 θ_2 の境界部分 5 b と、点 C から図 3 において下端の点 D までのスキュー角 θ_1 の境界部分 5 c とで構成されている。

【 0 0 1 8 】

図 4 は図 2 に示す本発明の永久磁石型回転電機の線 I V - I V に沿った断面図である。固定子 4 2 は固定子鉄心 4 7 とティース 4 6 に巻きまわされた電機子巻線 4 8 を有し、回転子 4 2 は回転子鉄心 2 と永久磁石 1 を有する。電機子巻線 4 8 に 3 相交流が通電されて回転磁界が発生し、この回転磁界と永久磁石 1 が発生する磁束が同期すれば回転子 4 5 が回転する。

【 0 0 1 9 】

以下に、本発明の構成によって、無負荷誘起電圧の 5 次高調波と 7 次高調波の両方を低減し、電気角 60 度周期のトルクリップルを低減できることを説明する。

【 0 0 2 0 】

まず、本発明の構成におけるスキュー係数を導出する。スキュー係数は無負荷誘起電圧に高調波がどれだけ含まれるかを評価するための指標であり、各次数に対して定義され、スキュー係数の絶対値が小さいほど高調波が低減されることを示す。

【 0 0 2 1 】

今回スキュー係数を導出する図 3 に示す永久磁石 1 の S 字スキューの概念図を図 5 に示す。永久磁石 1 の軸方向の両端部 1 a および 1 b では軸方向の長さ L_1 に渡って電気角 θ_1 の角度でスキューされており、軸方向中心から正の方向、負の方向両方に長さ L_2 に渡って電気角 θ_2 の角度でスキューされた状態を考える。図 5 において z は回転軸方向を示し、 θ は周方向の角度（電気角）を示す。点 A は永久磁石 1 の回転軸方向端部 1 a における磁極の境界 5 上の点を示し、点 D は他方の回転軸方向端部 1 b における磁極の境界 5 上の点を示す。さらに、点 B および C は境界 5 上のスキュー角が変化する点を示している。

【 0 0 2 2 】

周方向の角度 θ で磁束密度が \cos に比例するものとする、 $-L_1 - L_2 \leq z \leq -L_1$ の範囲における磁束密度の z 方向の積分値 ϕ_1 は

【 0 0 2 3 】

【数 2】

$$\phi_1 = \int_{-L_1-L_2}^{-L_1} \cos\left(\theta - \frac{\theta_1}{L_1}(z+L_2) + \theta_2\right) dz \quad (1)$$

【 0 0 2 4 】

と定義できる。同様に、 $-L_2 \leq z \leq L_2$ の範囲における磁束密度の z 方向の積分値 ϕ_2 は、

【 0 0 2 5 】

【数 3】

$$\phi_2 = \int_{-L_2}^{L_2} \cos\left(\theta - \frac{\theta_2}{L_2}z\right) dz \quad (2)$$

【 0 0 2 6 】

と定義できる。

また、 $L_2 \leq z \leq L_1 + L_2$ の範囲における磁束密度の z 方向の積分値 ϕ_3 は、

【 0 0 2 7 】

10

20

30

40

50

【数4】

$$\phi_3 = \int_{L_2}^{L_1+L_2} \cos\left(\theta - \frac{\theta_1}{L_1}(z-L_2) - \theta_2\right) dz \quad (3)$$

【0028】

と定義できる。一方、スキューがない場合の軸方向全域にわたる積分値 ϕ_0 は、

【0029】

【数5】

$$\phi_0 = \int_{-L_1-L_2}^{L_1+L_2} \cos(\theta) dz = 2(L_1 + L_2) \cos\theta \quad (4) \quad 10$$

【0030】

と定義できる。したがってスキュー係数をKとすると

【0031】

【数6】

$$K = \frac{\phi_1 + \phi_2 + \phi_3}{\phi_0} \quad (5)$$

【0032】

と定義できるので、式(1)～(3)を式(5)に代入して、

【0033】

【数7】

$$K = \frac{L_2 \frac{\sin \theta_2}{\theta_2} + L_1 \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\theta_1} - L_1 \frac{\sin \theta_2}{\theta_1}}{L_1 + L_2} \quad (6) \quad 20$$

【0034】

を得る。一般化してn次高調波に対するスキュー係数K(n)は

【0035】

【数8】

$$K(n) = \frac{L_2 \frac{\sin n\theta_2}{n\theta_2} + L_1 \frac{\sin(n\theta_1 + n\theta_2)}{n\theta_1} - L_1 \frac{\sin n\theta_2}{n\theta_1}}{L_1 + L_2} \quad (7) \quad 30$$

【0036】

となる。

【0037】

$L_1 = L_2$ とし、 $\theta_2 = 16.5$ (deg) としたときの5次と7次に対するスキュー係数K(5)とK(7)を横軸スキュー角に対してプロットしたのが図6である。ここで横軸は永久磁石の軸方向両端部でのスキュー角となるので $2 \times (\theta_1 + \theta_2)$ としている。これは図5では点Aから点Bまでの角度に相当する。 40

【0038】

図6では5次高調波のスキュー係数K(5)は $2 \times (\theta_1 + \theta_2) = 90^\circ$ 付近まで減少し、 90° 付近でほぼゼロとなり以降増加に転じている。一方、7次高調波のスキュー係数K(7)は 90° 付近でゼロとなっている。これはすなわち、5次高調波のスキュー係数も7次高調波のスキュー係数も同じスキュー角においてほぼゼロとなっていることになる。これは無負荷誘起電圧の5次高調波と7次高調波を同時に大幅に低減できることを示している。

【0039】

一方、従来例のスキューについて説明する。図7に一定のスキュー角度を設けた例を示 50

す。この場合のスキュー係数は知られているように、スキュー角を s とすれば、
 $\sin(n - s/2)/(n - s/2)$

で定義される。このスキュー係数を 5 次高調波、7 次高調波について示したのが図 8 である。この例では、5 次高調波と 7 次高調波がほぼ同時にゼロになることはない。すなわち無負荷誘起電圧の 5 次高調波と 7 次高調波を同時に大幅に低減することはできない。さらに、特許文献 2 の図 1 で示された例では、式 (7) において θ が負のときである。このときの例を図 9 に示す。こちらも同様に 5 次高調波と 7 次高調波がほぼ同時にゼロになっていない。しかしながら、本発明の構成にすることで、5 次高調波のスキュー係数も 7 次高調波のスキュー係数も同じスキュー角において、ほぼゼロとすることが可能となる。

【0040】

実際に無負荷誘起電圧を従来例と比較したのが図 10 と図 11 である。図 10 は無負荷誘起電圧の波形を基本波で規格化して示している。横軸は電気角の角度である。従来例としては一定角度のスキューにおいて $s = 90^\circ$ とした例であり、本発明は図 6 の例の $2 \times (\theta_1 + \theta_2) = 90^\circ$ とした例である。波形自体は大きな差異はないように見えるが、周波数分析すると差異が明確になる。図 11 は周波数分析し、各次数について基本波に対して何%含まれるのか示した図である。本発明の構成の方が 5 次、7 次高調波ともに低減できているのが確認できる。

【0041】

次に本発明の構成により、トルク脈動が低減できることと、スキュー角度のばらつきに対するロバスト性が向上する効果が得られることを説明する。無負荷誘起電圧に 5 次高調波と 7 次高調波が含まれると、トルク脈動として電気角 60 度周期の成分 (6 次成分) が発生する。磁気エネルギーの変動の 6 次成分は磁束密度の 1 次成分と 5 次成分の相互作用と磁束密度の 1 次成分と 7 次成分の相互作用に依存するからである。これを考え方を応用し、次のようなパラメータを考案した。スキューを設けなかった場合の無負荷誘起電圧に含まれる 5 次高調波と 7 次高調波の基本波に対する割合をそれぞれ V_5 、 V_7 とする。このとき、本発明のスキュー構造にしたときの無負荷誘起電圧に含まれる 5 次高調波と 7 次高調波の基本波に対する割合は、それぞれ $V_5 \times K(5)$ 、 $V_7 \times K(7)$ となる。これらの差 $V_5 \times K(5) - V_7 \times K(7)$ の絶対値をトルクリプル評価用パラメータと定義する。すなわち、パラメータを

$$X = |V_5 \times K(5) - V_7 \times K(7)| \quad (|| \text{は絶対値記号}) \quad (8)$$

と定義する。縦軸に本パラメータ X 、横軸にスキュー角をプロットしたのが図 12 である。図 12 は従来例についてもプロットした。図 12 から、本発明の構造にした場合はパラメータ X がゼロになる点は従来例とは異なるが、全体的に値は小さく、特にゼロとなる 90° 周辺においては非常に小さい値を示すことがわかる。また、ゼロになる点の前後での曲線の傾きは、本発明の方が小さい。これは、スキュー角が製造ばらつきなどの原因で最適値からずれたとしても、トルク脈動があまり増加しない効果があるものと考えられる。すなわち、スキュー角のばらつきに対してロバスト性の高い永久磁石型回転電機が得られるものと考えられる。

【0042】

そこで、スキュー角度を横軸に、トルク脈動を縦軸にプロットした図を図 13 に示す。図 13 から、本発明の構成にすれば従来例よりもトルク脈動が小さくなることが確認できる。従来例では 80° 付近で最小値をとっているが、本発明では $90 \sim 110^\circ$ 付近にて最小となっておりさらにその値は、本発明の方が 3 割程度小さい。さらに、従来例ではトルク脈動が最小となるスキュー角からずれたときのトルク脈動が増加するが、本発明では $90 \sim 110^\circ$ 付近でグラフが平坦となっているのでスキュー角がずれたときのトルク脈動の増加が抑制される。このことから、本発明の構成にすればスキュー角が製造ばらつきなどの原因で最適値からずれたとしても、トルク脈動があまり増加しない効果があるといえる。

【0043】

トルク脈動が小さくなるスキュー角はパラメータ X が $X = 0$ をみたく角度とほぼ一致し

10

20

30

40

50

ている。ただし、スキューを設けなかった場合の無負荷誘起電圧に含まる5次高調波と7次高調波の基本波に対する割合が分からない場合などは、永久磁石の表面磁束密度の5次成分、7次成分の基本波に対する割合として V_5 、 V_7 をそれぞれ定義してもよい。さらに、簡易的な方法として理想的な矩形波着磁を想定すると n 次高調波の振幅は $1/n$ に比例するとして5次高調波、7次高調波の基本波に対する割合は $V_5 : V_7 = 1/5 : 1/7$ となる。したがって $V_5 = (7/5) V_7$ となりこれを式(8)に代入し V_7 で規格化した

$$X' = | (7/5) \times K(5) - K(7) | \quad (| | \text{は絶対値記号}) \quad (8)$$

について

$X' = 0$ となるスキュー角に設定してもよい。

さらに、もっと簡単に $K(5) = K(7)$ となるスキュー角としても上記のスキュー角と大きく外れることはなくトルク脈動は低減できる効果は得られる。

【0044】

また図14に基本波に対するスキュー係数 $K(1)$ を示す。トルク脈動が最小となるスキュー角は従来例に比べてやや大きかったが、基本波に対するスキュー係数は従来例と比べてほとんど同じであることが分かる。このことから、従来例とほぼ同じトルクの大きさを確保しながら、トルク脈動を低減する効果が得られることがわかる。

【0045】

以上説明したように、この発明の永久磁石型回転電機においては、複数相の電機子巻線48を有する固定子42と、固定子2の固定子鉄心47のティース46に対向するリング形状の永久磁石1を有する回転子45とを備え、この永久磁石1は、永久磁石1の回転軸方向両端部1a、1bにおける磁極境界5aのスキュー角 θ_1 が、回転軸中央部L2における磁極境界5bのスキュー角 θ_2 よりも大きい角度とされており、永久磁石1の軸方向の端部1a、1bから軸方向の長さL1の領域と回転軸方向の中心位置から軸方向に長さL2の領域にスキューが施され、L1の長さの領域のスキュー角を θ_1 (電気角)とし、L2の長さの領域のスキュー角を θ_2 (電気角)としたときに、L1とL2と θ_1 と θ_2 で定義される n 次高調波に対するスキュー係数 $K(n)$

【0046】

【数9】

$$K(n) = \frac{L_2 \frac{\sin n\theta_2}{n\theta_2} + L_1 \frac{\sin(n\theta_1 + n\theta_2)}{n\theta_1} - L_1 \frac{\sin n\theta_1}{n\theta_1}}{L_1 + L_2} \quad (7)$$

【0047】

ただし、 n は自然数について、 $K(5) = K(7)$ を満たすL1とL2と θ_1 と θ_2 を選定とされている。この構成により、無負荷誘起電圧の5次高調波と7次高調波の両方を低減することができ、電気角60度周期のトルク脈動を十分小さくすることができる。また、スキュー角がばらついてトルク脈動が増加しにくく、スキュー角に対してロバスト性の高い永久磁石型回転電機を得ることができる。

【0048】

実施の形態2.

図15に本実施の形態2にかかる永久磁石型回転電機の永久磁石における磁極の切り替わり部の説明図を示す。図5では磁極の切り替わり部をすべて直線で示したが、回転軸方向でスキュー角を変化させる場合、磁極の切り替わり部のスキュー角が変化する点付近、すなわち図5の点B、点C付近において理想的な折れ線状にすることは、着磁時に着磁ヨークにて磁場分布を折れ線状に変化させなければならず実現するのが難しく、量産が困難となる。そこで図15で示すように点C付近に曲線状となった磁極の切り替わり部5eを設けた。このようにすることで、磁極の切り替わり部は磁極の切り替わり部5a、磁極の切り替わり部5e、磁極の切り替わり部5bから構成されるようになり、滑らかな曲線によってつながる。これにより、着磁が容易となり量産性に優れた永久磁石型回転電機を得

10

20

30

40

50

ることができるという効果が得られる。

【0049】

また、この磁極の切り替わり部5eの軸方向長さL3が長いとスキュー係数に影響がでるため短い方が望ましい、そこでL3をL1とL2の和の10%程度に収めるとスキュー係数への影響は小さくなり、無負荷誘起電圧の5次、7次高調波の両方の低減とトルク脈動の低減効果が得られる。

【0050】

また、それぞれの領域の軸方向長さL1とL2のいずれか一方が小さすぎる場合、曲線状の部分の影響を受けてスキューの効果が十分得られない可能性がある。したがって、 $0.3 \leq L1 / (L1 + L2) \leq 0.7$ の範囲にしておけばスキューの効果を発揮させることができる。

【0051】

また、磁極の切り替わり部が曲線のみで構成される場合は、式(7)のような数式で巻線係数を表現するのが困難であるという課題があった。したがって、無負荷誘起電圧の5次、7次高調波を両方とも大幅に低減するようなスキュー角を決定することは困難である。しかしながら、本願で式(7)のような数式で各高調波次数に対する巻線係数が定義できるので、無負荷誘起電圧の5次、7次高調波を両方とも大幅に低減するスキュー角の決定が容易であるという効果もある。

【0052】

なお、ここで、回転子45の永久磁石1の回転軸方向の長さは固定子鉄心47の回転軸方向の長さとはほぼ一致している。実施の形態1の式(1)~(7)に基づくスキュー係数は永久磁石1の軸方向全域にわたる積分によって導出しているが、固定子鉄心47の回転軸方向の長さとはほぼ一致している場合、望ましくは一致している場合に成立する。長さが異なっている場合には、スキューの効果が十分に得られない。特許文献3の例では永久磁石の方が固定子鉄心よりも軸方向に長い場合、永久磁石の端部が固定子鉄心と対向しないので、スキュー角の影響がほとんど現れないという課題があった。また、逆に永久磁石の方が固定子鉄心よりも軸方向に短い場合にも、負荷時には永久磁石の軸方向端部では磁束密度の軸方向成分が増大し、トルク脈動低減が十分実現できないという課題があった。

しかしながら、固定子鉄心の軸方向長さL1と永久磁石の軸方向長さL2がほぼ一致している場合、望ましくは一致している場合に、無負荷誘起電圧の第5、第7高調波が両方とも十分に低減でき、コギングトルクのみならず、電気角60度周期のトルク脈層の低減もできるといった本発明の効果が得られる。

【0053】

実施の形態3.

実施の形態1では、スキュー係数のK(5)とK(7)を用いたパラメータによりトルク脈動を評価したが、無負荷誘起電圧の5次高調波と7次高調波が両方同時に低減できているかどうかを判断する指標としてK(5)の2乗とK(7)の2乗の平方根によって判断する方法が考えられる。すなわちパラメータYとして

【0054】

【数10】

$$Y = \sqrt{K(5)^2 + K(7)^2} \quad (9)$$

【0055】

を定義しその大きさを判断すればよい。

$L1 / (L1 + L2) = 0.3, 0.5, 0.7$ としたときのYの値を1次元平面上に描いたグラフを図14、15、16にそれぞれ示す。

図16では点Aで示す $(\theta_1, \theta_2) = (33^\circ, 33^\circ)$ 付近

図17では点Aで示す $(\theta_1, \theta_2) = (16^\circ, 29^\circ)$ 付近

図18では点Aで示す $(\theta_1, \theta_2) = (7^\circ, 36^\circ)$ 付近

において、それぞれYが小さくなり、この付近にスキュー角を設定すれば無負荷誘起電圧

10

20

30

40

50

の5次高調波と7次高調波が両方同時低減できてトルク脈動が大幅に低減できるという効果が得られる。また、スキュー角は小さい方が回転電機のトルクが大きいことから

1 40° 、2 40° の両方がみだされる条件においてYが最小値となるようにスキュー角を設定するのが望ましい。

【0056】

実施の形態4.

図19はスロット数12、永久磁石の極数8の永久磁石型回転電機の例である。電機子巻線6は三相となっており、U相、V相、W相の巻線が図示するようにU相、V相、W相の順に並んで配列されている。このような極数：スロット数 = 2：3のモータは電機子起磁力の5次、7次高調波が大きくトルク脈動が大きい傾向にある。また、極数：スロット数 = 4：3も同様である。図19の永久磁石型回転電機の回転子の永久磁石1はラジアル異方性のリング磁石である。ラジアル異方性は磁石の配向が径方向（ラジアル方向）に向いている特徴を有している。そのため、ラジアル異方性のリング磁石は着磁波形が矩形波状となり、極異方性のリング磁石などに比べて発生する磁束密度波形に高調波が多く含まれる。したがって、ラジアル異方性のリング形状を用いたモータでトルク脈動を低減するにはスキューなどの対策が必要である。

【0057】

そこで、本発明では、回転子の永久磁石において回転軸方向両端部における領域の磁極の切り替わり部分のスキュー角度が、回転軸中央部における磁極の切り替わり部分のスキュー角度よりも大きい角度としている。

【0058】

さらに、電気角60度周期のトルク脈動の低減を目的としてティース46の幅を T_w とし、永久磁石1の外周の半径を R_m としたとき、磁極ピッチに対する T_w の割合とトルク脈動の関係について検討した。その結果が図20のグラフである。ここで、永久磁石型回転電機の極数を P とすると磁極ピッチは $2 R_m / P$ となるので、磁極ピッチに対する T_w の割合は $T_w P / 2 R_m$ で表される。横軸は磁極ピッチに対する T_w の割合（ $T_w P / 2 R_m$ ）とし縦軸にトルク脈動（%）を示した。図20のグラフから磁極ピッチに対する T_w の割合が0.4前後で急激にトルク脈動が変化していることが確認できる。このことからトルク脈動の効果がより一層得られるのは、磁極ピッチに対する T_w の割合が0.4以上であることがわかる。

【0059】

以上に図示して説明した永久磁石型回転電機は単なる例であって様々な変形が可能であり、またそれぞれの具体例の特徴を適宜全てあるいは選択的に組み合わせることもできる。

【図面の簡単な説明】

【0060】

【図1】本発明の実施の形態1の永久磁石型回転電機を用いた電動パワーステアリング装置の概略図である。

【図2】図1の永久磁石型回転電機の回転軸に沿った断面図である。

【図3】本発明の実施の形態1による回転子の永久磁石の斜視図である。

【図4】図2の永久磁石型回転電機の固定子と回転子を示す回転軸に垂直な面に沿った断面図である。

【図5】図3に示す永久磁石におけるスキューの説明図である。

【図6】図3に示す永久磁石におけるスキュー係数のグラフである。

【図7】従来の回転子の永久磁石の斜視図である。

【図8】図8の従来の永久磁石におけるスキュー係数のグラフである。

【図9】別の従来例によるスキュー係数のグラフである。

【図10】本発明の永久磁石における無負荷誘起電圧の波形を従来例と比較して示すグラフである。

【図11】本発明の永久磁石における無負荷誘起電圧の高調波成分を従来例と比較して示

10

20

30

40

50

すグラフである。

【図 1 2】スキュー係数から算出したパラメータのグラフである。

【図 1 3】スキュー角に対するトルク脈動のグラフである。

【図 1 4】本発明のスキュー係数に関するグラフである。

【図 1 5】本発明の実施の形態 2 による永久磁石におけるスキューの説明図である。

【図 1 6】スキュー角と無負荷誘起電圧の高調波に関する説明図である。

【図 1 7】スキュー角と無負荷誘起電圧の高調波に関する説明図である。

【図 1 8】スキュー角と無負荷誘起電圧の高調波に関する説明図である。

【図 1 9】本発明の実施の形態 4 による永久磁石型回転電機の概略断面図である。

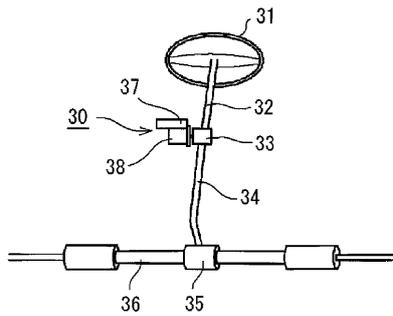
【図 2 0】図 1 9 の永久磁石型回転電機におけるトルク脈動のグラフである。

【符号の説明】

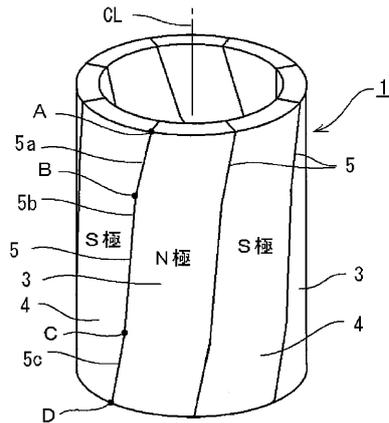
【0061】

1 永久磁石、1 a、1 b 両端部、5、5 a、5 b、5 c 磁極境界、4 2 固定子、4 5 回転子、4 8 電機子巻線、C L 回転軸、1、2 スキュー角、L 1、L 2 長さ。

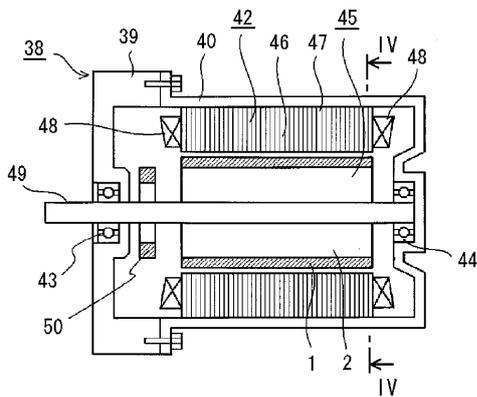
【図 1】



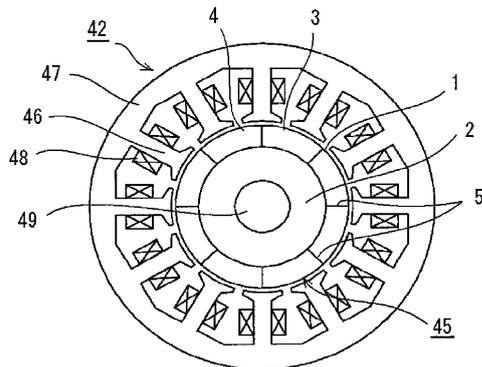
【図 3】



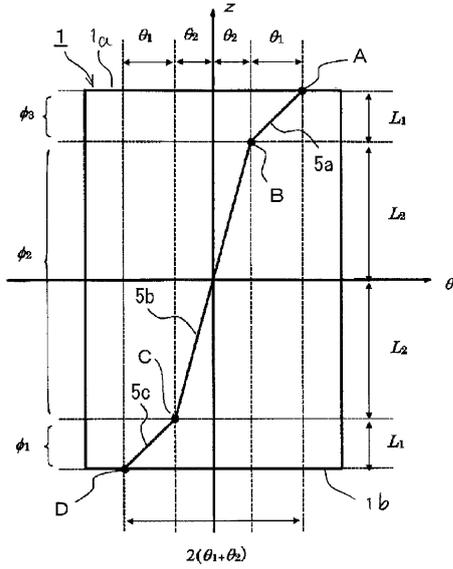
【図 2】



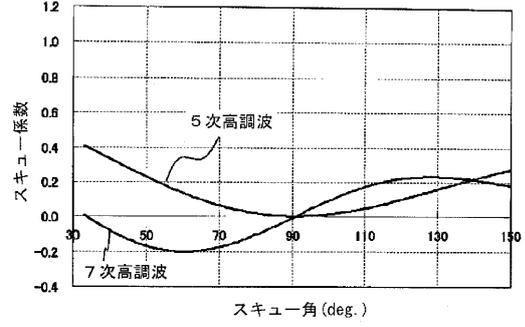
【図 4】



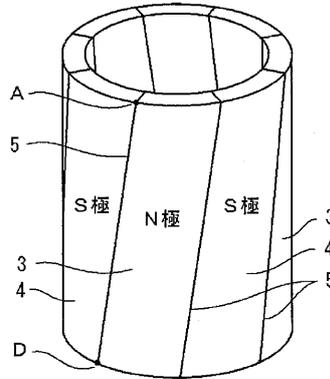
【図5】



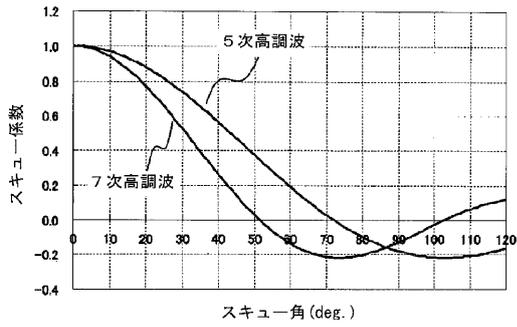
【図6】



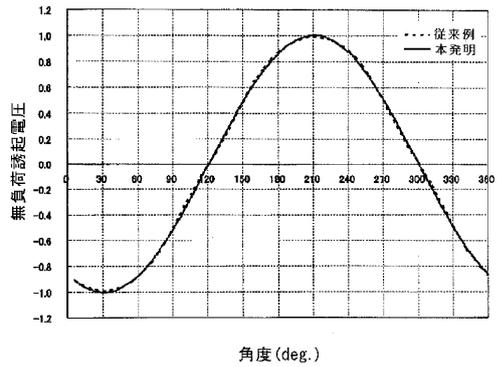
【図7】



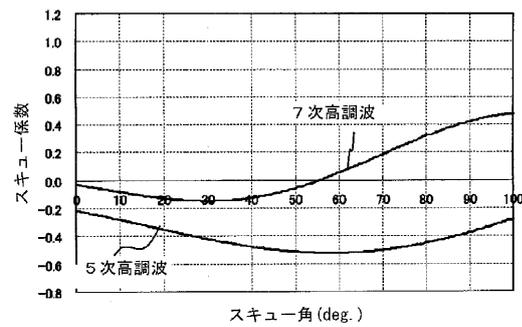
【図8】



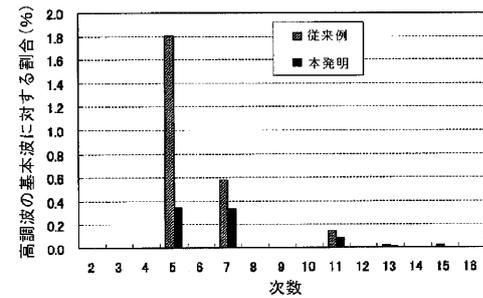
【図10】



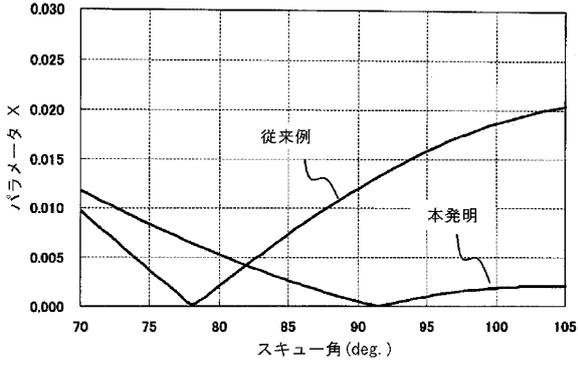
【図9】



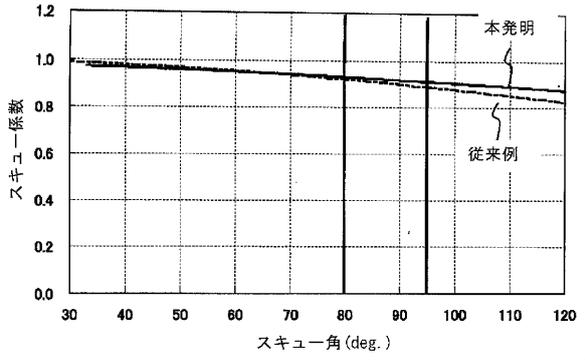
【図11】



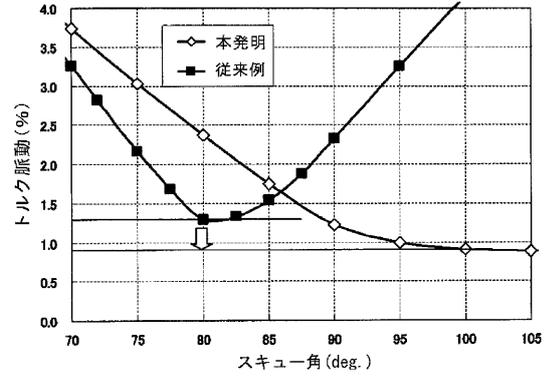
【図12】



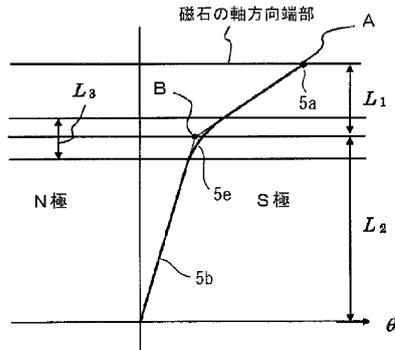
【図14】



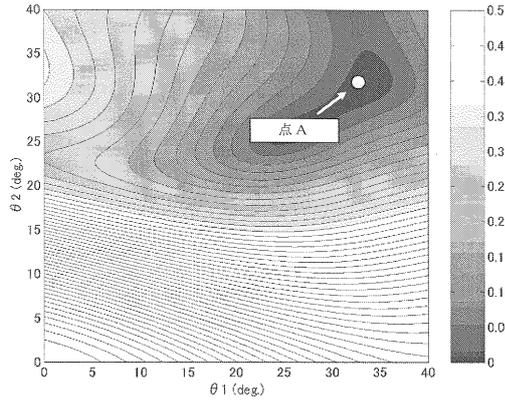
【図13】



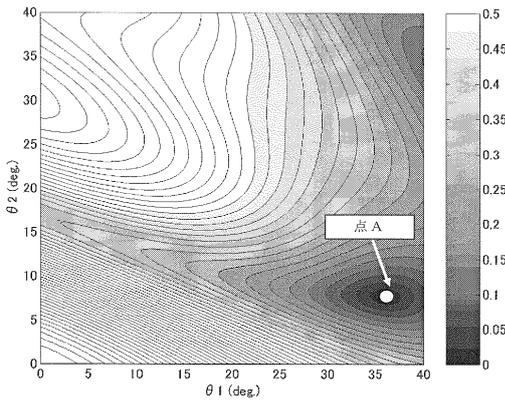
【図15】



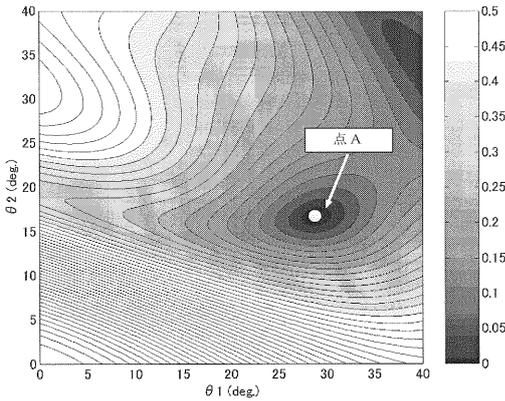
【図16】



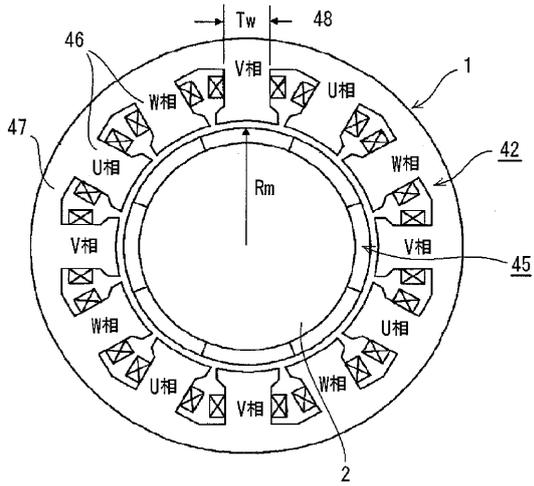
【図18】



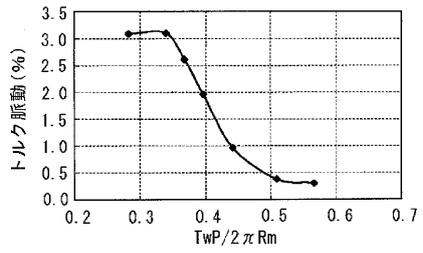
【図17】



【図19】



【図20】



フロントページの続き

- (72)発明者 中野 正嗣
東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
- (72)発明者 西川 英也
東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内

審査官 森山 拓哉

- (56)参考文献 特開2003-169452(JP,A)
特開2000-312448(JP,A)
特表2008-514174(JP,A)
米国特許出願公開第2004/0124728(US,A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H02K 1/27
H02K 21/00 - 21/48