

(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2014-72995  
(P2014-72995A)

(43) 公開日 平成26年4月21日(2014.4.21)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
<b>H02K 1/27 (2006.01)</b>	H02K 1/27 501A	5H622
	H02K 1/27 501M	
	H02K 1/27 501K	

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2012-217463 (P2012-217463)  
(22) 出願日 平成24年9月28日 (2012.9.28)

(71) 出願人 000002082  
スズキ株式会社  
静岡県浜松市南区高塚町300番地  
(74) 代理人 110001520  
特許業務法人日誠国際特許事務所  
(72) 発明者 青山 真大  
静岡県浜松市南区高塚町300番地 スズ  
キ株式会社内  
Fターム(参考) 5H622 AA03 CA02 CA07 CA10 CA14  
CB01 PP10

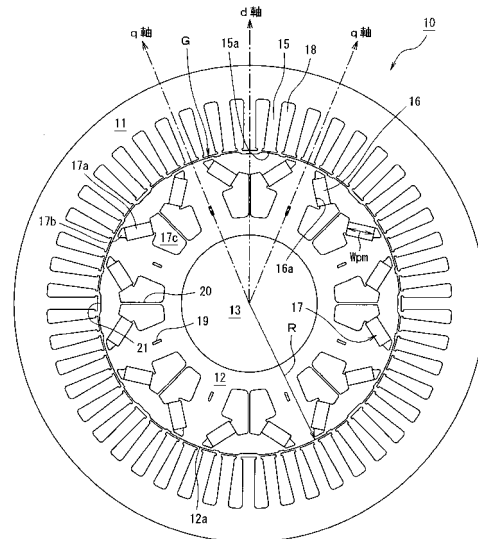
(54) 【発明の名称】 IPM型電動回転機

(57) 【要約】

【課題】永久磁石の使用量を削減しつつ高効率な回転駆動を実現して、低コストかつ高エネルギー密度のIPM型電動回転機を提供すること。

【解決手段】永久磁石16を埋め込んだ回転子12と、該回転子を相対回転自在に収納して当該回転子に対面する複数のステータース15間のスロット18にコイルを收容して電機子として機能する固定子11と、を備えるIPM型電動回転機10であって、磁極毎の中心軸に一致するd軸側まで永久磁石を存在させた場合に、該d軸側において電機子が発生する電機子磁束を打ち消す方向の磁石磁束を発生する範囲の当該永久磁石を、透磁率の小さな空隙の空間(フラックスバリア)17cに置き換える。例えば、毎極毎相スロット数 $q = 2$ の構造の場合、 $1.38 < (磁極数P \times 永久磁石サイズW_{pm}) / 回転子半径R < 1.84$ を満たす寸法形状にする。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

永久磁石を埋め込んだ回転子と、該回転子を相対回転自在に収納して当該回転子に対面する複数のティース間のスロットにコイルを収容して電機子として機能する固定子と、を備える I P M 型電動回転機であって、

前記永久磁石が形成する磁極毎の該永久磁石の中心軸に一致する磁束方向の d 軸側まで当該永久磁石を存在させた場合に、該 d 軸側において前記電機子が発生する電機子磁束を打ち消す方向の磁石磁束を発生する範囲の前記永久磁石を、透磁率の小さな空隙に置き換えたことを特徴とする I P M 型電動回転機。

## 【請求項 2】

毎極毎相スロット数  $q = 2$  の構造の場合、

前記回転子の半径方向の前記永久磁石の大きさを  $W \text{ pm}$ 、前記回転子の外周面までの半径を  $R$ 、前記永久磁石が形成する磁極数を  $P$  としたとき、

$$1.38 (P \times W \text{ pm}) / R < 1.84$$

を満たすことを特徴とする請求項 1 に記載の I P M 型電動回転機。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、I P M 型電動回転機に関し、詳しくは、高効率な回転駆動を実現するものに関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

各種装置に搭載する電動回転機には、搭載装置に応じた特性が要求される。

例えば、駆動源として内燃機関と共にハイブリッド自動車 (H E V : Hybrid Electric Vehicle) に搭載されたり、単独の駆動源として電気自動車 (E V : Electric Vehicle) に搭載される、駆動用モータの場合には、低速回転域で大トルクを発生すると同時に、広い可変速特性を備えることが要求される。

## 【0003】

この種の車両には、燃費向上のために、電動回転機を含めて各コンポーネントにエネルギー変換効率の向上が要求されており、特に、車載の電動回転機においては、常用領域における効率向上が望まれている。さらに、車載の電動回転機には、設置空間の制約や軽量化の観点から、より小型化した高エネルギー密度の構造が求められている。

ところで、H E V や E V では、一般的に、電動回転機の低速回転・低負荷領域が常用領域である。このことから、車載の電動回転機のトルクに貢献する割合は、電機子電流の大小に応じたリラクタンストルクよりもマグネットトルクの方が大きくなり、高効率化のために高磁力の永久磁石を多く使用する傾向にある。

このような傾向から、電動回転機としては、エネルギー変換効率の向上、特に、低速回転・低負荷領域の常用領域における効率向上のために、高残留磁束密度のネオジウム磁石を回転子の鉄心内部に埋め込んだ永久磁石式の同期モータである I P M (Interior Permanent Magnet) 型が多用されている。この I P M 型電動回転機では、外周面側に向かって開く V 字形になるように永久磁石を回転子内に埋め込むことにより、マグネットトルクに加えて、リラクタンストルクも積極的に利用できる磁気回路にすることが提案されている (例えば、特許文献 1、2)。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0004】

【特許文献 1】特開 2006 - 254629 号公報

【特許文献 2】特開 2008 - 104323 号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

10

20

30

40

50

## 【0005】

ところで、近年の電動回転機には、磁力を高めるためにNd、Dy、Tbなどのレアアースを含む永久磁石が多用されているが、その稀少性に伴う価格高騰とその流通量の不安定さから、レアアース使用量を低減しつつ高効率化する必要性が高まっている。

しかしながら、HEVやEVでは、電動回転機の常用領域が低速回転・低負荷領域であることから、その領域に寄与するマグネットトルクを大きくするために、高磁力の永久磁石の使用量を多くする傾向にある。これは、レアアースの使用量の低減という課題の解決を妨げる方向である。

そこで、本発明は、永久磁石の使用量を削減しつつ高効率な回転駆動を実現して、低コストかつ高エネルギー密度の電動回転機を提供することを目的としている。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0006】

上記課題を解決するIPM型電動回転機に係る発明の第1の態様は、永久磁石を埋め込んだ回転子と、該回転子を相対回転自在に収納して当該回転子に対面する複数のティース間のスロットにコイルを収容して電機子として機能する固定子と、を備えるIPM型電動回転機であって、前記永久磁石が形成する磁極毎の該永久磁石の中心軸に一致する磁束方向のd軸側まで当該永久磁石を存在させた場合に、該d軸側において前記電機子が発生する電機子磁束を打ち消す方向の磁石磁束を発生する範囲の前記永久磁石を、透磁率の小さな空隙に置き換えたことを特徴とするものである。

## 【0007】

上記課題を解決するIPM型電動回転機に係る発明の第2の態様は、上記第1の態様の特定事項に加え、毎極毎相スロット数 $q = 2$ の構造の場合、前記回転子の半径方向の前記永久磁石の大きさを $W_{pm}$ 、前記回転子の外周面までの半径を $R$ 、前記永久磁石が形成する磁極数を $P$ としたとき、 $1.38 < (P \times W_{pm}) / R < 1.84$ を満たすことを特徴とするものである。

## 【発明の効果】

## 【0008】

このように、本発明の上記の第1の態様によれば、d軸側で、電機子磁束を打ち消す方向の磁石磁束を発生する範囲の永久磁石を、透磁率の小さな空隙に置き換えたので、d軸側で磁石磁束と電機子磁束が干渉（相殺）してしまうことなく、また、その範囲内を電機子磁束が通過してしまうことも制限することができる。したがって、d軸側で電機子磁束を無駄にする磁石磁束をなくし、マグネットトルクと共にリラクタンストルクを有効活用することができ、d軸側永久磁石の置換前以上のトルクを得つつ永久磁石自体の使用量を削減することができる。

さらに、永久磁石を空隙に置換することで、磁石磁束を低減して高速回転側での誘起電圧定数を低減することができ、高速回転側での出力を向上させることができる。また、軽量化することができ、イナーシャを低減することができる。

また、磁石磁束の低減により、弱め界磁領域を削減（弱め界磁量を低減）することができ、磁気歪みとなる空間高調波を低減することができる。このため、永久磁石内での渦電流の発生を制限して発熱を抑えることができ、永久磁石の温度変化による減磁を抑制して耐熱グレードを下げ低コスト化することができる。

この結果、高エネルギー密度で高品質に回転駆動する低コストの電動回転機を実現することができる。

## 【0009】

本発明の上記の第2の態様によれば、毎極毎相スロット数 $q = 2$ の構造の場合、永久磁石の大きさ $W_{pm} \times$ 磁極数 $P /$ 回転子半径 $R$ を $1.38$ 以上で $1.84$ 未満にすることで、d軸側まで永久磁石を存在させた場合よりもその永久磁石自体の使用量を削減することができる。特に、 $1.38$ のときには同等以上の最大トルクを得つつ永久磁石の使用量を $24.7\%$ 削減することができる。

## 【図面の簡単な説明】

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 0 】

【図 1】図 1 は、本発明に係る I P M 型電動回転機（モータ）の一実施形態を示す図であり、その概略全体構成を示す平面図である。

【図 2】図 2 は、実施形態の構造における低負荷駆動時の電機子磁束の磁束線図である。

【図 3】図 3 は、実施形態の構造における低負荷駆動時の磁石磁束の磁束線図である。

【図 4】図 4 は、d 軸側に大きな空隙のない V 字型 I P M モータの電流位相に対するトルク特性を示すグラフである。

【図 5 A】図 5 A は、d 軸側に大きな空隙のない V 字型 I P M モータの磁石磁束の磁束線図である。

【図 5 B】図 5 B は、d 軸側に大きな空隙のない V 字型 I P M モータの d 軸付近における磁石磁束のベクトル図である。 10

【図 6 A】図 6 A は、d 軸側に大きな空隙のない V 字型 I P M モータの最大負荷駆動時における電機子磁束の磁束線図である。

【図 6 B】図 6 B は、d 軸側に大きな空隙のない V 字型 I P M モータの最大負荷駆動時における d 軸付近の電機子磁束のベクトル図である。

【図 7】図 7 は、d 軸側に大きな空隙のない V 字型 I P M モータの最大負荷駆動時における磁極（永久磁石）の外周側の磁石磁束ベクトルと電機子磁束ベクトルの相対関係を示すモデル図である。

【図 8】図 8 は、I P M 型モータの入力電流に対する電流位相と出力トルクの対応関係（特性）を示すグラフである。 20

【図 9】図 9 は、d 軸側に大きな空隙のない V 字型 I P M モータの低負荷駆動時における電機子磁束の磁束線図である。

【図 1 0】図 1 0 は、d 軸側に大きな空隙のない V 字型 I P M モータの低負荷駆動時における磁石磁束と電機子磁束の合成磁束の磁束線図と共にその合成磁束が取る経路を示す経路図である。

【図 1 1】図 1 1 は、d 軸側空隙付きの V 字型 I P M モータの埋設永久磁石を短縮させた場合の発生トルクの変化やトルクリプルの低減率を示すグラフである。

【図 1 2】図 1 2 は、d 軸側空隙付きの V 字型 I P M モータの埋設永久磁石を短縮させた場合に重畳する 5 次の空間高調波の変化を示すグラフである。

【図 1 3】図 1 3 は、d 軸側に大きな空隙のない V 字型 I P M モータと d 軸側空隙付きの V 字型 I P M モータの低負荷駆動領域におけるトルク発生割合を示すグラフである。 30

【図 1 4】図 1 4 は、d 軸側に大きな空隙のない V 字型 I P M モータと d 軸側空隙付きの V 字型 I P M モータの最大負荷駆動領域におけるトルク発生割合を示すグラフである。

【図 1 5】図 1 5 は、d 軸側空隙付きの V 字型 I P M モータの最大負荷駆動時における電機子磁束を示す磁束線図である。

【図 1 6】図 1 6 は、d 軸側空隙付きの V 字型 I P M モータの低負荷駆動時における磁石磁束と電機子磁束の合成磁束を示す磁束線図である。

【図 1 7】図 1 7 は、d 軸側空隙付きの V 字型 I P M モータの最大負荷駆動時における磁石磁束と電機子磁束の合成磁束を示す磁束線図である。

【発明を実施するための形態】 40

## 【 0 0 1 1 】

以下、図面を参照して、本発明の実施形態について詳細に説明する。図 1 ~ 図 1 7 は本発明に係る I P M 型電動回転機の一実施形態を示す図である。ここで、本実施形態の説明では、固定子に対して回転子を反時計回り（C C W : counterclockwise）方向に回転させる場合を一例にしてその回転方向を図示する。

図 1 において、電動回転機（モータ）1 0 は、概略円筒形状に形成された固定子（ステータ）1 1 と、この固定子 1 1 内に回転自在に収納されて軸心に一致する回転駆動軸 1 3 が固設されている回転子（ロータ）1 2 と、を備えている。この電動回転機 1 0 は、例えば、ハイブリッド自動車（H E V）や電気自動車（E V）において、内燃機関と同様の駆動源として、あるいは車輪ホイール内に搭載するのに好適な性能を有している。 50

## 【0012】

固定子11には、回転子12の外周面12aにギャップGを介して内周面15a側を対面させるように軸心の法線方向に延在する複数本のステータティース15が形成されている。このステータティース15には、内部に対面収納されている回転子12を回転駆動させる磁束を発生させるコイルを構成する3相巻線（不図示）が分布巻により巻付形成されている。

回転子12は、外周面12aに向かって開くV字型になるように、一对で1組の永久磁石16を1磁極として埋め込むIPM（Interior Permanent Magnet）構造になるように作製されている。この回転子12は、図面の表裏方向に延在する平板状の永久磁石16の角部16aを嵌め込んで不動状態に収容するV字空間17が外周面12aに対面するように形成されている。

V字空間17は、永久磁石16を嵌め込み収容する空間17aと、その永久磁石16の幅方向の両側方に位置して磁束の回り込みを制限するフラックスバリアとして機能する空間17b、17c（以下ではフラックスバリア17b、17cともいう）と、を備えるように形成されている。このV字空間17には、永久磁石16を高速回転時の遠心力に抗して位置決め保持することができるように、空間17c間で法線方向に延長されて外周側と内周側とを連結支持するセンタブリッジ20が形成されている。

## 【0013】

この電動回転機10は、固定子11側のステータティース15間の空間が、巻線を通して巻き掛けることによりコイルを形成するためのスロット18を構成している。これに対して、回転子12は、8組の永久磁石16のそれぞれに、固定子11側の6本のステータティース15が対面している。要するに、この電動回転機10では、回転子12側の一对の永久磁石16側が構成する1磁極に、固定子11側の6スロット18が対応するように構築されている。すなわち、電動回転機10は、隣接する1磁極毎に永久磁石16のN極とS極の表裏を交互にした、8極（4極対）、48スロットで、単相分布巻5ピッチで巻線した3相IPMモータに作製されている。言い換えると、電動回転機10は、毎極毎相スロット数 $q = (\text{スロット数} / \text{極数}) / \text{相数} = 2$ のIPM型構造に作製されている。

これにより、電動回転機10は、固定子11のスロット18内のコイルに通電してステータティース15から対面する回転子12内に磁束を通すことにより回転駆動させることができる。このとき、電動回転機10（固定子11と回転子12）は、永久磁石16との間に生じる吸引力と反発力に起因するマグネットトルクに加えて、磁束が通過する磁路を最短にしようとするリラクタンストルクとの総合トルクにより回転駆動することができる。よって、電動回転機10は、通電入力する電気的エネルギーを、固定子11に対して回転子12と一体回転する回転駆動軸13から、機械的エネルギーとして出力することができる。

なお、固定子11と回転子12は、ケイ素鋼などの電磁鋼板材料の薄板を所望の出力トルクに応じた厚さになるように軸方向に重ねており、その積層状態を維持するようにカシメ19などにより一体物に作製されている。

## 【0014】

ここで、この電動回転機10は、図2に磁束線図として図示するように、1磁極を構成する一对の永久磁石16に対応する複数のステータティース15毎に、固定子11の外周側（ステータティース15の背面側）から回転子12内を通過する経路の磁路（電機子磁束）を形成するように、スロット18内に巻線コイルが分布巻きされている。その永久磁石16は、電機子磁束 $r$ の磁路に沿うように、言い換えると、その電機子磁束 $r$ の形成を妨げないように、形成されているV字空間17の嵌込空間17a内に収容されている。

この永久磁石16の磁路（磁石磁束 $m$ ）は、図3に磁束線図として図示するように、1磁極を構成する一对の永久磁石16の表裏面のN極とS極から鉛直方向に出て繋げる経路を取り、特に、固定子11側では対応するステータティース15からその背面側を通過する経路になる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 5 】

そして、回転子 1 2 内に永久磁石 1 6 を V 字に埋め込んだ I P M 構造では、磁極が作る磁束の方向、すなわち、V 字の永久磁石 1 6 間の中心軸を d 軸とし、また、その d 軸と電氣的・磁氣的に直交する、隣接する磁極間の永久磁石 1 6 間の中心軸を q 軸とする。この回転子 1 2 は、V 字空間 1 7 の d 軸側に位置する内側の空間 1 7 c を、軸心に向かう大きな空隙に拡大されてフラックスバリア 1 7 c として機能するように形成されている。

これにより、この電動回転機 1 0 では、図 2 に示すように、ステータティース 1 5 から回転子 1 2 内に進入する電機子磁束  $r$  を、V 字空間 1 7 の外周側に回り込まないように大きく内周（軸心）側に迂回させてステータティース 1 5 に戻る経路を取るように形成されている。要するに、電動回転機 1 0 は、回転子 1 2 が d 軸空隙付き V 字型 I P M モータに構築されている。

10

また、この電動回転機 1 0 は、d 軸に対応するステータティース 1 5 から進入する電機子磁束  $r$  の密度が飽和してしまわないように、回転子 1 2 側の外周面に、そのステータティース 1 5 の内周面 1 5 a と平行方向（軸心方向）に延長されるセンタ溝 2 1 が形成されている。

## 【 0 0 1 6 】

このように、回転子 1 2 内に永久磁石 1 6 を V 字型に埋め込む I P M 構造の電動回転機 1 0 の場合、トルク  $T$  は、下記の式（1）で表すことができ、図 4 に示すように、マグネットトルク  $T_m$  とリラクタンストルク  $T_r$  との和が最大となる電流位相にて駆動することで高トルク・高効率運転を実現している。

20

## 【 数 1 】

$$T = P_p \{ \Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad \dots (1)$$

$P_p$  : 極対数、  $m$  : 電機子（ステータティース 1 5）鎖交磁石磁束、

$i_d$  : 線電流の d 軸成分、  $i_q$  : 線電流の q 軸成分、

$L_d$  : d 軸インダクタンス、  $L_q$  : q 軸インダクタンス

## 【 0 0 1 7 】

30

ところで、d 軸側空隙のフラックスバリア 1 7 c に代えて、V 字空間 1 7 の外側のフラックスバリア 1 7 b と同等のフラックスバリア 1 7 c' を備える関連技術の回転子 1 2' の場合には、図 5 A の磁束線図に図示する永久磁石 1 6 の磁路が形成され、その磁石磁束  $m$  は、図 5 B の磁束ベクトル図に図示する向きのベクトル  $V_m$  になっている。また、スロット 1 8 への通電により発生する電機子磁束  $r$  は、図 6 A の磁束線図に図示する磁路に形成され、図 6 B の磁束ベクトル図に図示する向きのベクトル  $V_r$  になっている。

この種の電動回転機では、最大負荷駆動時には高トルク・高効率駆動の実現のために電流位相角を進角させて駆動させている。関連技術の回転子 1 2' では、図 5 B および図 6 B の磁束ベクトル図に示すように、V 字空間 1 7（磁極）の外周側に位置する d 軸付近の小領域 A 1 において、磁石磁束  $m$  と電機子磁束  $r$  が逆磁界の関係になって、リラクタンストルク  $T_r$  がマグネットトルク  $T_m$  を打ち消し（相殺し）つつ駆動する状態にある。要するに、この磁極外周側小領域 A 1 は、図 7 に示すように、磁石磁束  $m$  と電機子磁束  $r$  とが挟角 90 度以上で逆向きの位置関係で対向する干渉領域であり、この磁極外周側小領域 A 1 に隣接する永久磁石 1 6 の d 軸側の範囲 B で発生する磁石磁束  $m$  を抑え込む（打ち消す）のに電機子磁束  $r$  が浪費されている。

40

このことから、この磁極外周側小領域 A 1 に対応する永久磁石 1 6 の d 軸側範囲 B は、トルク  $T$  に積極的に寄与していないと言ふことができ、その永久磁石 1 6 における d 軸側範囲 B の部分を削減しつつ同等の突極比を維持する磁気回路とすることで、永久磁石 1 6 自体の磁石量を低減することができる。

ここで、トルク  $T$  は、上記式（1）であるため、永久磁石 1 6 の磁石量を減らした場合

50

にはリラクタンストルク  $T_r$  を大きくすることで、永久磁石 16 の磁石量を減らさない場合と同等にすることができる。このリラクタンストルク  $T_r$  は、d 軸インダクタンス  $L_d$  と q 軸インダクタンス  $L_q$  との差、すなわち、突極比を大きくすることで増加させることができる。

よって、本実施形態の回転子 12 では、永久磁石 16 の d 軸側範囲 B を透磁率の小さな空隙（制限領域）に置き換えることで、永久磁石 16 の磁石量を低減しつつ突極比を増加させて置換前と同等以上のトルク  $T$  を得ることができる。見方を換えると、リラクタンストルク  $T_r$  は、永久磁石 16 の d 軸側範囲 B で発生する磁石磁束  $m$  を抑え込むのに浪費されていた電機子磁束  $r$  を有効活用することで大きくすることができ、永久磁石 16 の磁石量を削減しても同等のトルク  $T$  を得ることができる。

10

【0018】

なお、トルク  $T$  は、下記の式（2）のように表すこともでき、電流値  $I_a$  が小さな低負荷領域ではマグネットトルク  $T_m$  の割合が高くなり、図 8 に示すように、電流値  $I_a$  が低いほど最大トルク時の電流位相  $\beta$  はゼロに近くなる。この図 8 中の波形  $i \sim v$  は、各電流値  $I_a(i) \sim I_a(v)$  における電流位相 - トルク特性を示しており、電流値  $I_a$  の大きさは、 $i < i_i < i_i < i_v < v$  の関係となっている。よって、低負荷駆動時には、マグネットトルク  $T_m$  の割合（依存）が自ずと高くなるが、そのマグネットトルク  $T_m$  を最大限に有効活用する磁気回路が望ましい。

【数 2】

20

$$T = P_p \left\{ \Psi_m I_a \cos \beta + \frac{1}{2} \cdot (L_d - L_q) I_a^2 \sin 2\beta \right\} \dots (2)$$

：電流位相角度、 $I_a$ ：相電流値

【0019】

関連技術の回転子 12' では、図 9 に示すように、低電流値の低負荷領域では電流位相がゼロに近い条件で駆動させるため、電機子磁束  $r$  の磁束量が q 軸となる磁極間（隣接する別磁極の永久磁石 16 の間）で多くなる。このため、この電機子磁束  $r$  に磁石磁束  $m$  を合成した磁束  $s$  の経路としては、図 10 に示す磁路 MP1、MP2 を通過する磁気回路とするのが好適である。これにより、合成磁束  $s$  は、q 軸磁路（磁束）を分散化させて（飽和することを回避して）q 軸インダクタンス  $L_q$  を大きくすることができ、リラクタンストルク  $T_r$  を積極的に利用可能にすることができる。

30

磁路 MP1 は、固定子 11 側のステータティース 15 からエアギャップ G を介して回転子 12' に鎖交して磁極間に進入した後に、回転方向進行側（図中左側）の磁極を形成する近接側の永久磁石 16 を内周側から抜ける経路を取る。さらに、この磁路 MP1 は、その磁極の外周側領域 A2 を通過して、再度エアギャップ G を介してステータティース 15 に戻る経路を取る。

磁路 MP2 は、磁路 MP1 と同様に磁極間に進入した後に、回転方向進行側の磁極を形成する離隔側の永久磁石 16 を内周側から抜けて、その磁極の外周側領域 A2 を通過して、再度エアギャップ G を介してステータティース 15 に戻る経路を取る。

40

【0020】

例えば、この磁路 MP1、MP2 では、一对の永久磁石 16 の両端側（磁極外端部）を削って内側に寄せた場合には、その両端側に大きなフラックスバリアが存在して磁極の中心付近に集中することになり、特に、磁極外周側領域 A2 の右側の経路が取り難くなって、その領域 A2 全体を有効に利用できない。

反対に、一对の永久磁石 16 の中心側（磁極内端部）を削って外側に寄せた場合には、その中心側に大きなフラックスバリアが存在して磁極の両側に磁束経路を分散させることができ、磁極外周側領域 A2 の右側の経路も含めて積極的に有効活用してその領域 A2 を満遍なく磁束が通過できる。この構造の場合には、回転方向後進側の磁極の永久磁石 16

50

を外周側から内周側に向かって抜けた後、隣接する磁極の永久磁石 16 の N 極・S 極間を結合する磁路 M P 3 も取ることができる。この磁路 M P 3 では、磁路 M P 1 と同様の経路を通過して、回転方向進行側の磁極の外周側領域 A 2 を通過することができ、磁束の分散化効率が高い。

このことから、回転子 12 は、磁極を形成する一对の永久磁石 16 の埋設構造として、リラクタンストルク  $T_r$  を発生させる電機子磁束  $r$  を妨げないように V 字型を維持しつつ、両端側（磁極外端部）に寄せる形状を採用するのが好適である。さらに、その一对の永久磁石 16 の間（磁極内端部）には、磁束が短絡経路を取るのを制限するフラックスバリア 17 c を形成する構造を採用するのが好適である。また、回転子 12 の d 軸上の外周面には、固定子 11 側のステータース 15 から進入する電機子磁束  $r$  の飽和を制限する、言い換えると、その磁束  $r$  を分散させるセンタ溝 21 を形成する構造を採用するのが好適である。このような構造を採用することにより、回転子 12 は、q 軸磁路（磁束）を分散化させて q 軸インダクタンス  $L_q$  を大きくし、リラクタンストルク  $T_r$  を積極的に利用することができる。

#### 【0021】

この永久磁石 16 は、図面内の長手方向の長さ（幅） $W_{pm}$  の最適値を、その長さ  $W_{pm}$  を短縮しない場合を基準にして比較決定する。

具体的には、極数  $P$  と、回転子 12 の軸心から外周面までの外半径  $R$  とを固定値として、磁極外端部に設置する永久磁石 16 の長さ  $W_{pm}$  を変数（内端側端辺の位置を変位）とし、下記の式（3）で算出する比率  $\alpha$  を変化させて決定する。この決定要素として、比率  $\alpha$  に対する、最大負荷時のトルク  $T$  の per unit 単位での変化と、そのトルク  $T$  の変動幅であるトルクリプル（torque ripple）の低減率の変化とを磁界解析してグラフ表示すると、図 11 のようになる。なお、per unit 単位では、例えば、 $1.0 [p.u.]$  の場合に同等であることを意味している。

$$\alpha = (P \times W_{pm}) / R \quad \dots (3)$$

図 11 では、比率  $\alpha = 1.84$  が長さ  $W_{pm}$  を短縮しない形状寸法（磁石低減量 0%）の永久磁石 16 の場合であり、比率  $\alpha = 1.38$  の寸法形状（磁石低減量 24.7%）の場合に非短縮時と同等（ $1.0 [p.u.]$ ）のトルク  $T$  を得ることが分かる。この永久磁石 16 は、常用の低速回転負荷時においても、比率  $\alpha = 1.38$  とすることで、同等のトルク  $T$  を得ることができる。

ここで、この図 11 では、V 字空間 17 の内外端側に同等の大きさのフラックスバリア 17 b、17 c' を備える関連技術の回転子 12' を比較対象としている。これに対して、本実施形態の回転子 12 の場合には、フラックスバリア 17 c とセンタ溝 21 を備えることで、電機子磁束  $r$  を効果的に分割して振り分けることができる。このため、この回転子 12 では、リラクタンストルク  $T_r$  を有効に発生させることができ、永久磁石 16 が同等の長さ  $W_{pm}$  である比率  $\alpha = 1.84$  でもトルク  $T$  が向上するとともにトルクリプルも低減されている。すなわち、図 11 では、この回転子 12 の構造で永久磁石 16 の長さ  $W_{pm}$  を短縮させて、比率  $\alpha$  に対するトルク  $T$  とトルクリプルの変化を図示している。なお、関連技術の回転子 12' の構造のまま永久磁石 16 の長さ  $W_{pm}$  を短縮する場合には、比率  $\alpha = 1.84$  から比率  $\alpha = 1.38$  付近までトルク  $T$  の大きな変化はない（ $1.0 [p.u.]$ ）ものと想定される。

#### 【0022】

また、電動回転機では、回転子の回転に伴って、埋設する永久磁石量に応じた誘起電圧（逆起電圧）が発生して弱め界磁に起因する磁気歪みの空間高調波が重畳することになる。この空間高調波は、5 次、7 次、11 次、13 次の成分がトルクリプルの発生要因になり、鉄損の増加原因となっている。このことから、比率  $\alpha$  に対する、例えば、5 次の空間高調波の発生を per unit 単位でグラフ化すると、図 12 のようになり、比率  $\alpha = 1.75$  以下にするほど、その 5 次の空間高調波の発生を抑えることができることが分かる。この場合には、永久磁石 16 の磁石量を 4.7% 以上削減することができ、また、磁気歪みの空間高調波の低減により鉄損を低減して駆動効率を向上させつつ永久磁石 16 内での渦電

10

20

30

40

50



流の発生を制限して発熱を抑えることができる。

【0023】

このことからすると、本実施形態の回転子12では、関連技術の回転子12'と同等のトルクTを得つつ永久磁石16の使用量を削減するには、その永久磁石16の長さ $W_{pm}$ を短縮（磁石量を24.7%削減）して比率 $=1.38$ 程度にするのが好適であり、トルクリプルも低減することができる。要するに、永久磁石16は、トルクTやトルクリプル等の所望の特性に応じて比率 $=1.38$ （磁石低減量24.7%）から1.75（磁石低減量4.7%）の範囲内の寸法形状で適宜選択すればよい。

そこで、電動回転機10は、同等のトルクTとなる、永久磁石16の長さ $W_{pm}$ を短縮して比率 $=1.38$ の寸法形状に形成するd軸空隙付きV字型のIPMモータの場合と、永久磁石16を短縮しないV字型のIPMモータの場合とで磁界解析すると、図13および図14に示すように、マグネットトルク $T_m$ とリラクタンストルク $T_r$ の比率が変化して同等のトルクTを出力可能なことが分かる。なお、d軸空隙付きV字型のIPMモータは、大きな空隙のフラックスバリア17cをd軸側に備える構造であり、単なるV字型のIPMモータは、小さなフラックスバリア17c'をd軸側に備える構造である。

この図13は、低負荷領域でのトルク $T_m$ 、 $T_r$ の割合を図示しており、図14は、最大負荷領域でのトルク $T_m$ 、 $T_r$ の割合を図示している。いずれでも、d軸空隙付きV字型のIPMモータの場合には、永久磁石16を短縮するためにマグネットトルク $T_m$ が小さくなるのに代わって、リラクタンストルク $T_r$ が大きくなっていることが分かる。すなわち、電動回転機10は、d軸付近の永久磁石16に置換して大きな空隙空間のフラックスバリア17cやセンタ溝21を形成することで、図6Bと図7に示す磁極外周側小領域A1で電機子磁束 $r$ を打ち消す磁石磁束 $m$ を少なくすることができている。この結果、電動回転機10は、q軸インダクタンス $L_q$ を大きくしてd軸インダクタンス $L_d$ との差（突極比）を非短縮V字型のIPMモータよりも大きくすることができ、リラクタンストルク $T_r$ を有効活用して同等のトルクTを確保することができている。

【0024】

この構造により、電動回転機10は、図15に磁束線図として図示するように、磁極を形成する一对の永久磁石16の外周側の小領域A1に集中していた電機子磁束 $r$ を、その磁極外周側小領域A1を通過する磁路 $M_r1$ からV字空間17のd軸側空間17cの内周側を迂回する磁路 $M_r2$ にも効果的に分割（分流）させることができる。この結果、電動回転機10は、磁石磁束 $m$ と電機子磁束 $r$ （d軸・q軸）の磁氣的干渉を低減して、磁極外周側小領域A1の回転方向進行側（図中左側）で局所的に磁気飽和状態になってしまうことを回避してトルクTの発生に効果的に寄与させることができる。

【0025】

したがって、電動回転機10は、図16の磁束線図に図示するように、低負荷駆動時には磁石磁束 $m$ と電機子磁束 $r$ の合成磁束 $s$ が主に永久磁石16を通過する磁路 $M_P0$ を通過するのに対して、最大負荷駆動時にはその合成磁束 $s$ は図17の磁束線図に図示するように、磁路 $M_P1$ 、磁路 $M_P2$ に分割させることができる。この結果、磁氣的干渉の低減と共に局所的な磁気飽和状態の回避を実現して、永久磁石16の磁石量を低減しつつ同等以上のトルクTを効率よく発生させることができる。なお、低負荷駆動時の合成磁束 $s$ は、電機子磁束 $r$ よりも磁石磁束 $m$ の割合が大きい。

また、電動回転機10は、永久磁石16を、例えば、比率 $=1.44$ の寸法形状にして低透磁率のフラックスバリア17cに置換（磁石磁束 $m$ を低減）し磁石量を23%削減すると、イナーシャ（慣性力）の低減と共に、誘起電圧定数も13.4%程度低減することができる。高速回転側での出力を増加させることができる。さらに、この電動回転機10では、磁気歪みとなる空間高調波が低減されることで、永久磁石16内で発生する渦電流による発熱や鉄損および電磁騒音を抑えることができる。

【0026】

このように本実施形態においては、永久磁石16のd軸側範囲Bを削減して大きなフラックスバリア17cに置き換えたので、電機子磁束 $r$ を打ち消す方向の磁石磁束 $m$ を

なくして互いに干渉（相殺）してしまうことをなくすことができ、また、その範囲 B 内を電機子磁束  $r$  が通過してしまうことも制限することができる。

したがって、永久磁石 16 の使用量を削減しつつ、d 軸側での電機子磁束  $r$  や磁石磁束  $m$  を有効に活用して、大きなマグネットトルク  $T_m$  とリラクタンストルク  $T_r$  を得ることができる。また、誘起電圧定数の低減による高速回転側での出力の増加を図ることができるとともに、永久磁石 16 の渦電流に起因する発熱を抑えて温度変化による減磁を抑制して耐熱グレードを下げることによるコスト削減をすることができる。

この結果、固定子 11 内の回転子 12 を低コストに作製して高エネルギー密度で高品質に回転駆動させることができる。

#### 【0027】

ここで、本実施形態では、8極48スロットモータの構成の電動回転機10を一例にして説明するが、これに限るものではなく、毎極毎相スロット数  $q = 2$  の構造であれば、そのまま好適に適用することができ、例えば、6極36スロット、4極24スロット、10極60スロットのモータ構造にもそのまま適用することができる。

本発明の範囲は、図示され記載された例示的な実施形態に限定されるものではなく、本発明が目的とするものと均等な効果をもたらすすべての実施形態をも含む。さらに、本発明の範囲は、各請求項により画される発明の特徴の組み合わせに限定されるものではなく、すべての開示されたそれぞれの特徴のうち特定の特徴のあらゆる所望する組み合わせによって画されうる。

#### 【産業上の利用可能性】

#### 【0028】

これまで本発明の一実施形態について説明したが、本発明は上述の実施形態に限定されず、その技術的思想の範囲内において種々異なる形態にて実施されてよいことは言うまでもない。

#### 【符号の説明】

#### 【0029】

- 10 電動回転機（IPM型）
- 11 固定子
- 12 回転子
- 12 a 外周面
- 13 回転駆動軸
- 15 ステータティース
- 16 永久磁石
- 16 a 角部
- 17 V字空間
- 17 b、17 c フラックスバリア
- 18 スロット
- 20 センタブリッジ
- 21 センタ溝
- A1 磁極外周側小領域
- A2 磁極外周側領域
- B d軸側範囲
- G エアギャップ
- MP0、MP1～MP3、Mr1、Mr2 磁路
- m 磁石磁束
- r 電機子磁束
- s 合成磁束

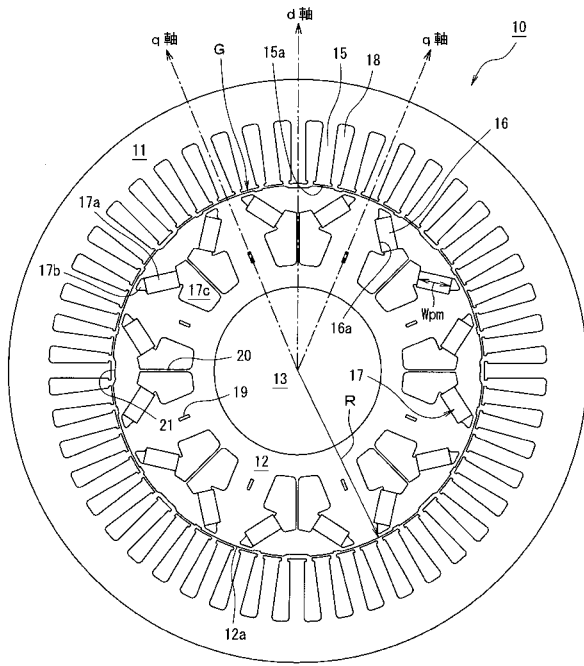
10

20

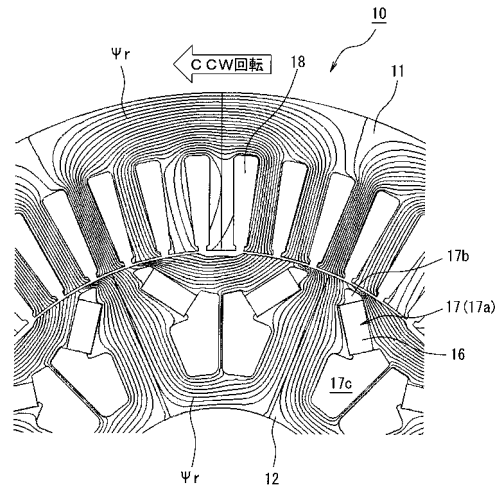
30

40

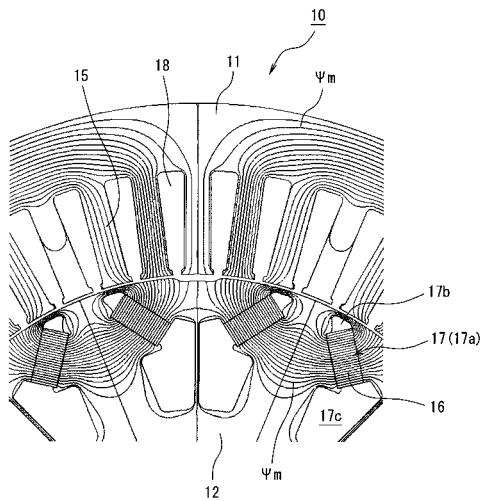
【図1】



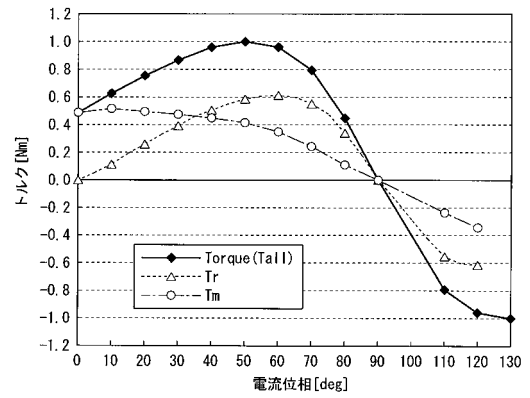
【図2】



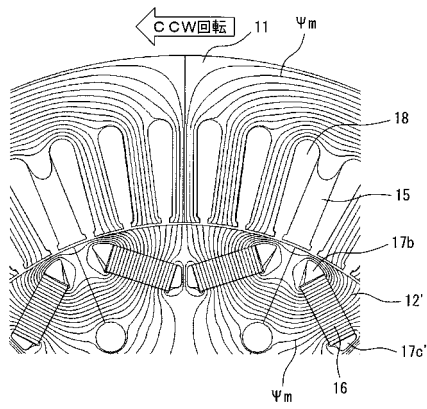
【図3】



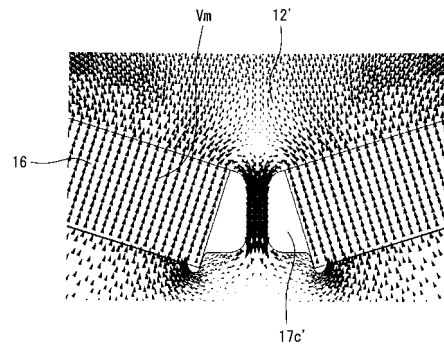
【図4】



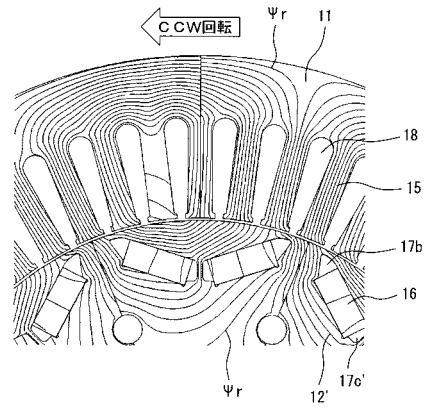
【図 5 A】



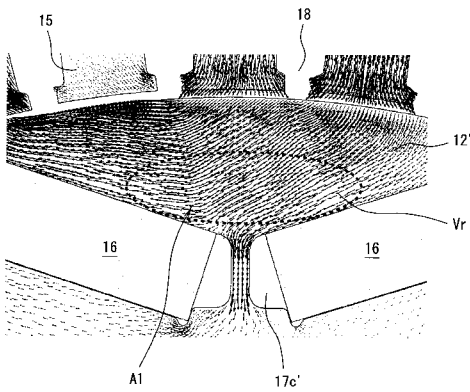
【図 5 B】



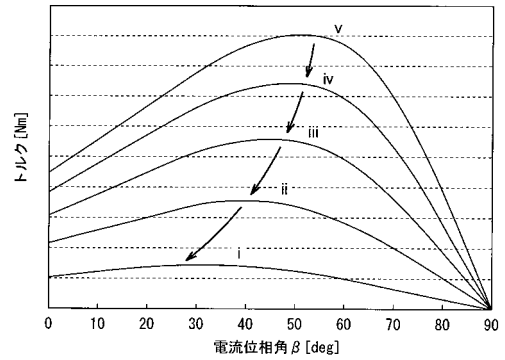
【図 6 A】



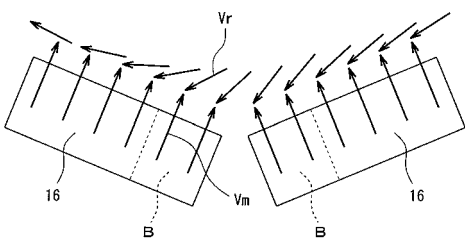
【図 6 B】



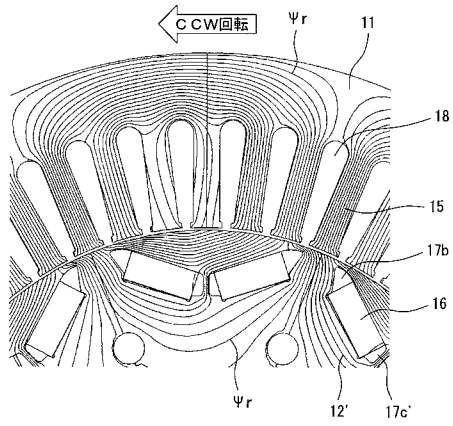
【図 8】



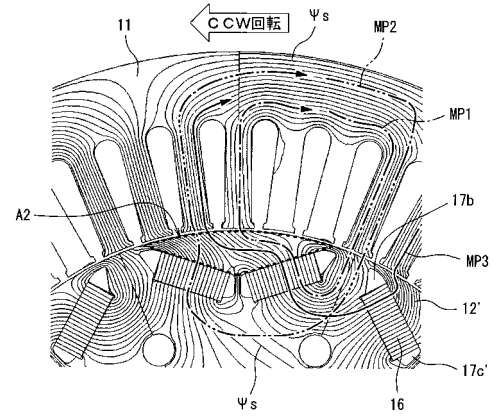
【図 7】



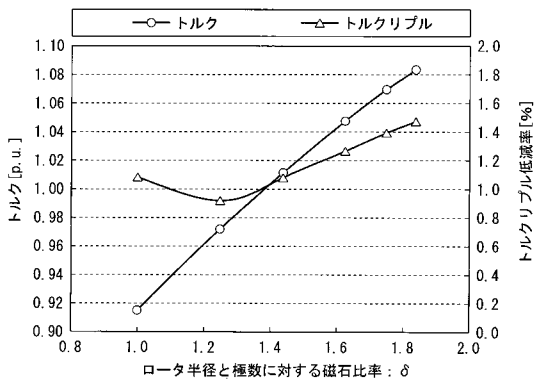
【 図 9 】



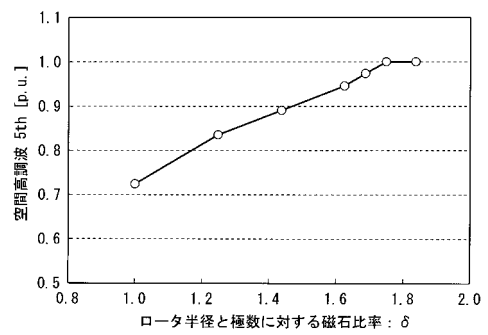
【 図 10 】



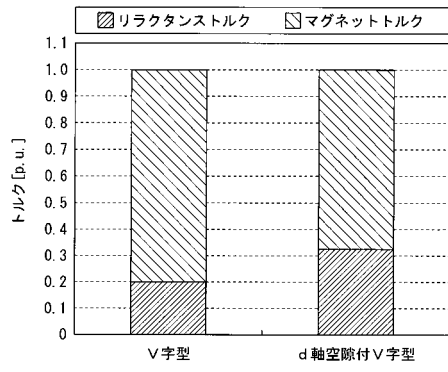
【 図 11 】



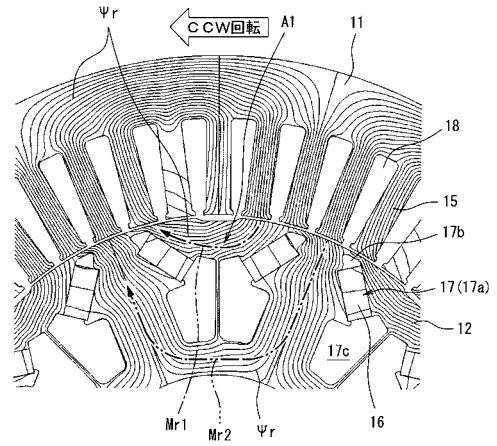
【 図 12 】



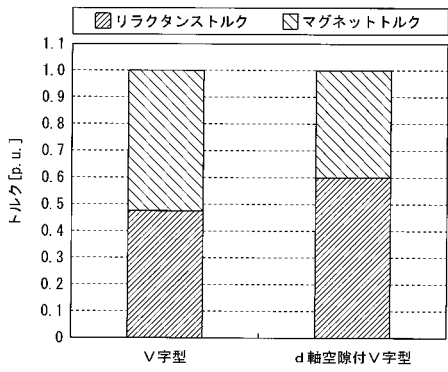
【 図 1 3 】



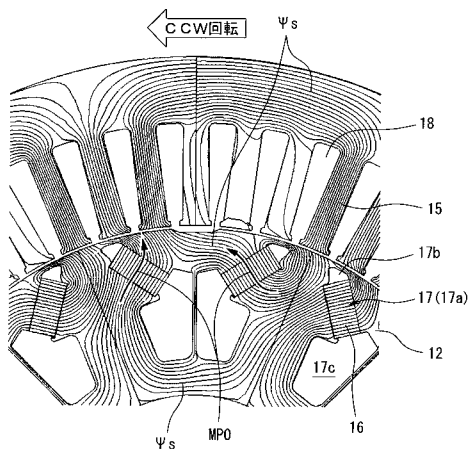
【 図 1 5 】



【 図 1 4 】



【 図 1 6 】



【 図 1 7 】

