

学術論文

固液分離機用ベアリングレスモータの巻線方法による トルクと磁気支持力の改善

Improvement of Torque and Suspension Force with Winding Arrangement Variation in a Bearingless Motor for Solid-Liquid Separators

興 康弘^{*1}(学生員), 大島 政英^{*1}(正員), 北田 浩^{*2}

Yasuhiro KOSHI (Stu.Mem.), Masahide OOSHIMA (Mem.), Hiroshi KITADA

This paper presents a new winding arrangement to increase the rotational torque and suspension force in a bearingless motor to drive the separators, which are used to separate the original liquid into the solid and the liquid. The motor structure and principle of suspension force generation is shown. A new winding arrangement is proposed and explained in details. The rotational torque and suspension force are computed by Finite Element Method (FEM) using a machine model. With the proposed winding arrangement, requirement of the torque and suspension force to drive the separator is satisfied and the torque ripple and the suspension force vibration are enough small. The proposed winding arrangement is found enough to drive the separator and support the rotational pipe without mechanical contact on the bearing journals.

Keywords: solid-liquid separator, bearingless motor, finite element method, torque ripple, suspension force vibration, distributed winding.

1 まえがき

ニッケル合金や水酸化アルミニウムなどの回収に遠心力と物質の比重差を利用して、固体と液体に分離する固液分離機が用いられている。このうち、著者らは分離効率が高い縦型固液分離機[1]を取り上げ、分離処理能力の向上を目指し、装置の大型化と機械損の低減を図るためにアキシアル磁気軸受を提案した[2-4]。

さらに従来の固液分離機は、回転動力をベルトを介して伝えているため騒音や振動、ラジアル方向への引張り力による軸受への負担などの問題点があった。著者らはすでにベルト駆動による問題点を解決するために回転筒とスクリュウの同軸化、さらにメンテナンスフリーで長寿命などのメリットを持つベアリングレスドライブ技術[5,6]の適用を図った。また、将来的にナノレベルの微粒子に分離するために高速化する必要があるが、ベアリングレスモータにより実現できる可能性がある。すでに、低トルクリプルを目的として 36 スロット 6 極ベアリングレスモータを提案した[7]。しかし、トルクリプルが大きく、安定に回転させることが難しいと考えられ、リプルの低減が必要である。ま

た、支持力は非常に小さく、固液分離機に適用したとき回転筒を外乱に耐えて安定に支持できない。これは、現製品の固液分離機(スクリュウ直径 300mm)にベアリングレスモータを設置するため、限られたモータ外径、スロット面積で所望のトルクを満たすように電動機巻線を巻くと支持巻線を巻くスロット領域がわずかしかなかったため支持力が小さいと考えられる。そこで本論文では、固定子鉄心の外径は維持したまま、所望のトルクを満たし、回転筒を安定に支持できる力が得られる巻線方法の検討をする。そして、有限要素法解析を用いて所望のトルク、支持力の発生を確認し、トルクリプル、支持力リプルの評価を行った。その結果、提案する巻線方法により、固液分離機の要求を満足するベアリングレスモータが実現できることを明らかにした。

2 固液分離機の構造と要求

Fig. 1 に従来の縦型固液分離機の構造を示し、Fig. 2 に固液分離の原理を示す。Fig. 1 に示したように外側に固定筒があり、その内側に回転筒、さらに回転筒の内側にスクリュウがある。スクリュウはパイプ状の①と中空構造ではない②の部分から成り、両者は一体になっているが、中間部には Fig. 1 に描いたように原液を回転筒内に拡散するための穴が径方向に 4 箇所

連絡先: 大島 政英, 〒391-0213 長野県茅野市豊平 5000-1,
諏訪東京理科大学システム工学部電子システム工学科,
e-mail: moshima@rs.suwa.tus.ac.jp

^{*1} 諏訪東京理科大学 ^{*2} ㈱CMS

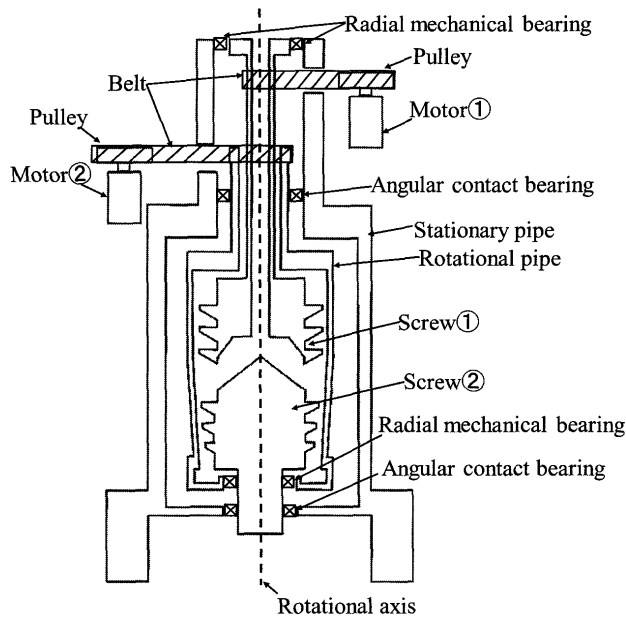


Fig. 1 Structure of vertical-type solid-liquid separator.

開けてある。回転筒とスクリューはそれぞれモータ①とモータ②によりプーリーを介し、ベルトを用いて回転させる。回転筒とスクリューは回転速度差をつけて同方向へ回転する。また、回転筒とスクリューを回転させるとき、モータ①とモータ②の片方のモータで回転させ、もう片方は発電動作をするため、省電力で動作できる。回転筒とスクリューの間には本体の下方にラジアル軸受があり、スクリューはラジアル方向に支持される。固定筒とスクリューの間には本体上方にラジアル軸受があり、スクリューはラジアル方向に支持される。また、下方にはアンギュラ軸受があり、スクリューはラジアル方向及びアキシヤル方向に支持される。回転筒と固定筒の間にはアンギュラ軸受があり、回転筒はアンギュラ軸受によりラジアル方向とアキシヤル方向に支持される。次に固液分離の原理について示す。Fig. 2 に示したように本体上部より原液を投入し、スクリュー内のパイプを通り、スクリュー中間で 360° 方向へ拡散される。遠心効果により、固形物は回転筒内壁に付着し、スクリューと重力で本体下方へ排出される。一方、比重の軽い分離液は推力により回転筒内を上昇し、回転筒上部にある堰を通過して固定筒外部へ排出される。

固液分離機はベルトにより回転動力を伝えているため、機械損や騒音の問題があり、さらにベルト駆動によるラジアル方向の引張り力でスクリューと回転筒を支持する軸受に大きな負担がかかるという問題があった。これらの改善策として、ベルトをなくして

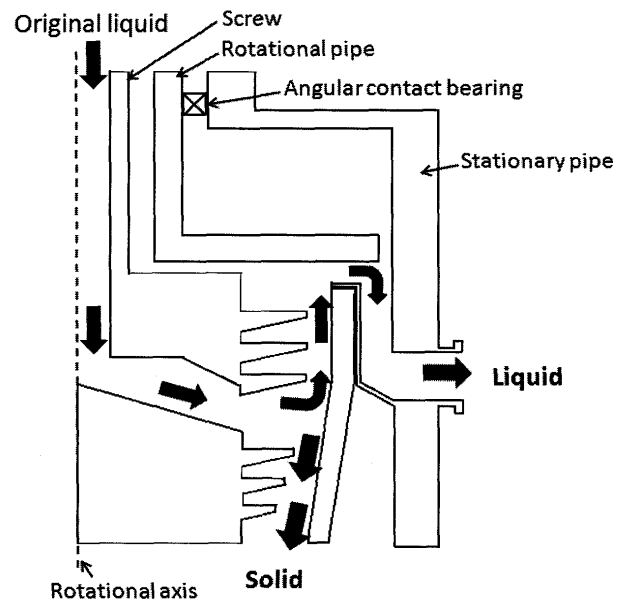


Fig. 2 Principles of solid-liquid separation of the vertical-type solid-liquid separator.

モータを回転軸と同軸にし、さらにスクリューと回転筒駆動用にベアリングレスモータを提案した[7]。また、本論文で対象としている固液分離機は磁性体を含む原液も固液分離するため漏れ磁束の影響を最小限にする必要があり、電動機巻線と支持巻線の巻線方法をコイルエンドが短く漏れ磁束が少ない短節集中巻にした。以降、集中巻という。しかし、巻線方法を集中巻にすると所望のトルクを満たすように電動機巻線を巻くと支持巻線のスロット領域がわずかしか残らず支持力が小さかった。そのため、固液分離機に適用した際、安定に回転軸を支持できないと考えられる。そこで、以下では所望のトルクを満たす電動機巻線を巻き、回転軸を安定に支持できる力が得られる巻線方法の検討を行う。

3 巻線方法変更によるトルクと支持力の増加

3.1 提案する巻線方法

本論文で対象としている固液分離機は原液に磁性体が含まれることもあるので漏れ磁束などの磁界の影響を最小限にする必要がある。そこで、固定子巻線のコイルエンドを短くするため、電動機巻線、支持巻線ともに短節集中巻としていた[7]。しかし、所望のトルクを満たすように電動機巻線を巻くと支持巻線を巻くスロット領域がわずかであるため、支持力が小さく安定支持できない。そこで本論文では、Fig. 3 に示した電動機巻線を3スロットピッチで巻く分布巻(重ね巻)を

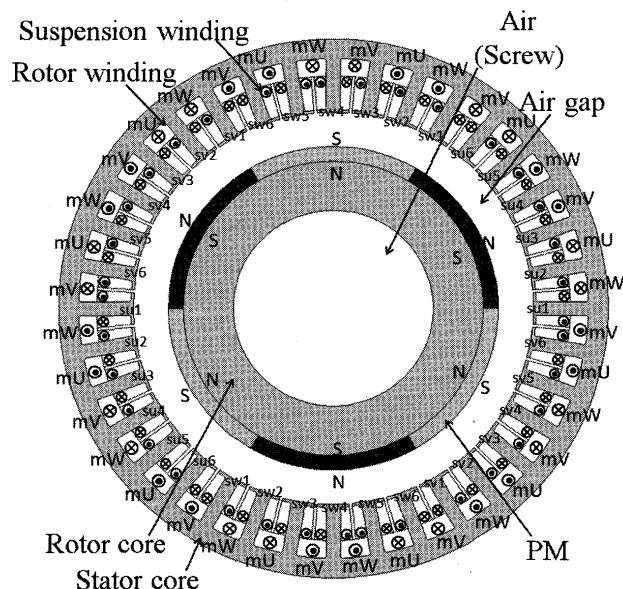
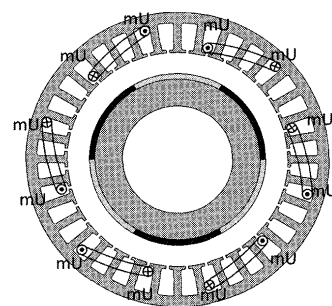


Fig. 3 Cross section of proposed bearingless motor
(Motor winding : Distributed, Suspension winding:
Concentrated).

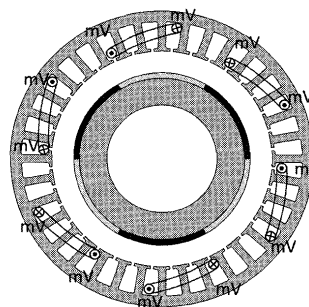
適用する。Fig. 4(a)から(c)に、三相電動機巻線 mU 相, mV 相, mW 相をピックアップし、それぞれ示した。トルクの発生原理は従来の永久磁石同期モータと同様である。分布巻(重ね巻)にすると集中巻よりも少ない巻数で等しいトルクを発生する。Fig. 4 のような巻線配置にすると他の分布巻に比べて比較的コイルエンドが短くできる。さらに集中巻では電動機巻線用インバータとして六相インバータという特殊なものが必要であるが分布巻(重ね巻)にすると汎用三相インバータ 1 台で制御できるため、コストダウンにも繋がる。

Fig. 3 の固定子歯のギャップ側の巻線 su1, sv1, sw1 と su2, sv2, sw2 と su3, sv3, sw3 と su4, sv4, sw4 と su5, sv5, sw5 と su6, sv6, sw6 はそれぞれ三相の支持巻線であり、回転子を挟み対向する 2 本の歯に各相の巻線を巻いた。本論文の磁気支持制御法は三軸制御法を用いているためスロット数は 6 の倍数でなければならない。また、三軸制御法を用いることで汎用三相インバータの使用が可能であり、さらに二軸制御法と比べると支持力が大きく発生する。ここではトルクリプル、支持力リプルを考慮して 36 スロットを使用した。

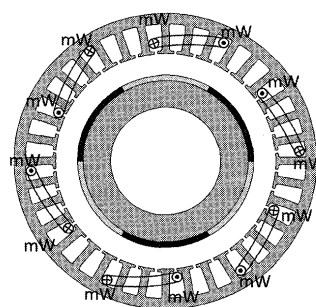
Fig. 5 に各相の磁気支持力の発生方向に沿った座標系を示す。Fig. 5(a)に示した su1, sv1, sw1 巻線の起磁力の方向をそれぞれ su1 軸, sv1 軸, sw1 軸とし、これら三軸で構成される座標系を第一座標系と定義した。



(a) U-phase winding.



(b) V-phase winding.



(c) W-phase winding.

Fig. 4 Motor winding arrangement (Distributed winding).

su1, sv1, sw1 巻線は同時に励磁し、su1 軸, sv1 軸, sw1 軸方向にそれぞれ磁気支持力が発生し、3 つの合力により回転子を安定に支持する。同様に Fig. 5(b)に示した su2, sv2, sw2 巻線の起磁力の方向をそれぞれ su2 軸, sv2 軸, sw2 軸, Fig. 5(c)に示した su3, sv3, sw3 巻線の起磁力の方向をそれぞれ su3 軸, sv3 軸, sw3 軸, Fig. 5(d)に示した su4, sv4, sw4 巻線の起磁力の方向をそれぞれ su4 軸, sv4 軸, sw4 軸, Fig. 5(e)に示した su5, sv5, sw5 巻線の起磁力の方向をそれぞれ su5 軸, sv5 軸, sw5 軸, Fig. 5(f)に示した su6, sv6, sw6 巻線の起磁力の方向をそれぞれ su6 軸, sv6 軸, sw6 軸と定義した。また、su2 軸, sv2 軸, sw2 軸で構成される座標系を第二座標系, su3 軸, sv3 軸, sw3 軸で構成される座標系を第三座標系, su4 軸, sv4 軸, sw4 軸で構成される座標系を第四座標系, su5 軸, sv5 軸, sw5 軸で構成される座標系を第五座標系, su6 軸, sv6 軸, sw6 軸で構成される座標系を第六座標系と定義した。それぞれの座標系では第一座標系と同様に支持力を発生する。

3.2 磁気支持力の発生原理

Fig. 6 に 36 スロット 6 極ベアリングレスモータの磁気支持力の発生原理を示した。例として、回転角度 $\phi = 0^\circ$ のときの x 軸正方向の磁気支持力(F_x)を発生させる場合を示した。磁気支持力は固定子歯に対向する永

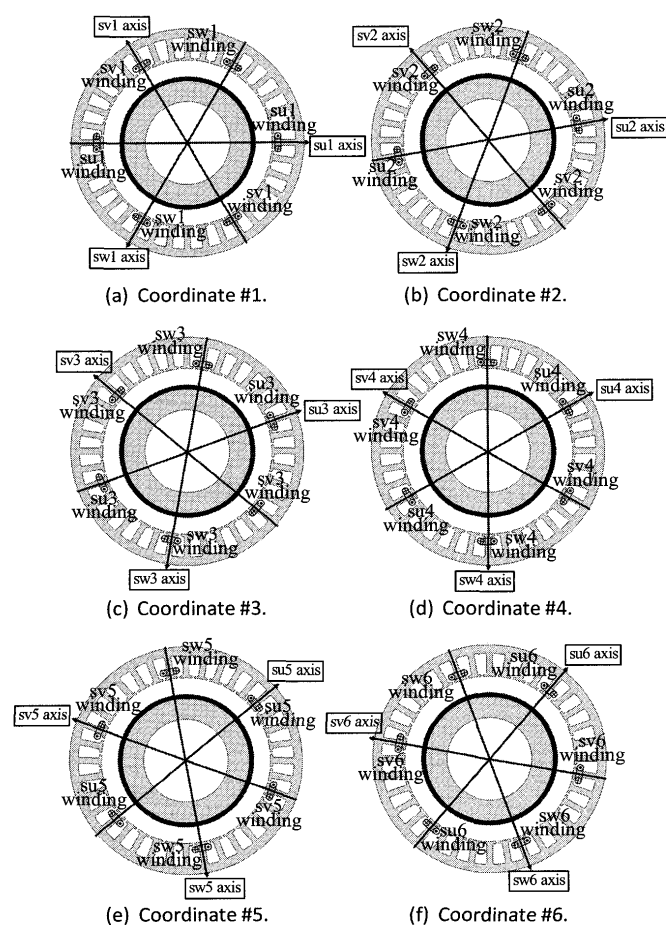


Fig. 5 The coordinates in suspension force generation (36-slot).

久磁石(PM)の極が一定の区間で、その固定子歯に巻かれた支持巻線を励磁して発生する。

Fig. 6 では、Fig. 5 で示した固定子歯の対向部が PM の極間にある第一座標系以外の 5 つの座標系を構成する巻線を同時に励磁する。太い矢印で示した支持磁束と細い矢印で示した PM の界磁磁束の方向より、実線の円内では 2 種類の磁束が同方向であり吸引力が生じる。点線の円内では 2 種類の磁束が逆方向であり反発力が生じる。すなわち、Fig. 5(b) に示した第二座標系を構成する巻線を同時に励磁すると磁気支持力 F_{su2} , F_{sv2} , F_{sw2} が発生する。同様に Fig. 5(c) に示した第三座標系を構成する巻線を同時に励磁すると磁気支持力 F_{su3} , F_{sv3} , F_{sw3} , Fig. 5(d) に示した第四座標系を構成する巻線を同時に励磁すると磁気支持力 F_{su4} , F_{sv4} , F_{sw4} , Fig. 5(e) に示した第五座標系を構成する巻線を同時に励磁すると磁気支持力 F_{su5} , F_{sv5} , F_{sw5} , Fig. 5(f) に示した第六座標系を構成する巻線を同時に励磁すると磁気支持力 F_{su6} , F_{sv6} , F_{sw6} がそれぞれ発生する。各相の磁気支持

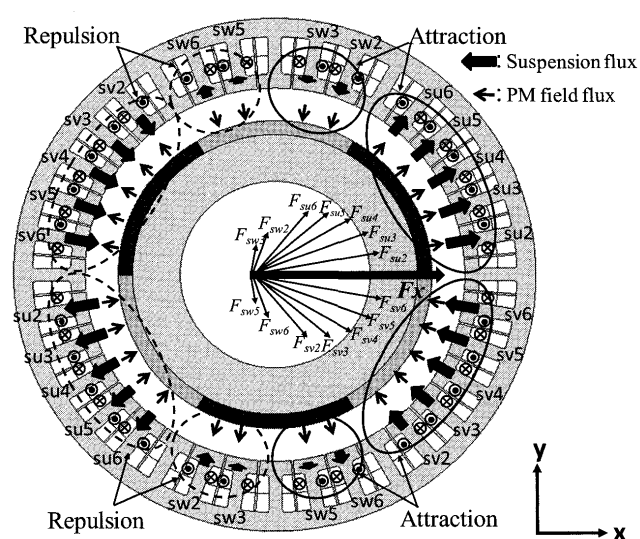


Fig. 6 Principle of suspension force generation at $\phi = 0^\circ$.

力のベクトル合成により、 F_x が発生する。支持力は支持巻線電流の大きさと向きを調整して、任意の方向に発生することが可能である。また、他の回転角度においても励磁する支持巻線の座標系を切替えることにより同様に力を発生する。磁気支持制御系では参考文献 [6] に示したように、回転子変位を検出して Fig. 5 に示した 6 種類各々の座標系を形成する巻線セットの各電流指令値を決定し、各支持巻線電流が指令値に追従するように制御される。回転角度に応じて、励磁する巻線セットを選択し、力を発生する。

4 有限要素法によるトルクと支持力の解析

4.1 有限要素法解析による比較

電動機巻線の巻線方法を分布巻(重ね巻)に変更し、有限要素法によりトルクと支持力の解析を行った。Fig. 7 に解析モデルの寸法を示す。Fig. 7 の解析モデルの寸法は、電動機巻線が集中巻のモデルと固定子鉄心と回転子鉄心の寸法、PM の着磁と厚さなど全て等しく、電動機巻線と支持巻線の巻線領域が異なるのみである。Table 1 に解析モデルの材料と巻線の巻数を示す。提案する分布巻では、同じトルクを発生するのに必要な電動機巻線は集中巻より少なく、その分、支持巻線は 4 ターンから 49 ターンに多く巻くことができる。本論文で対象としている固液分離機用のモータは回転速度 3000r/min のとき出力 22kW であり、トルクを換算すると 70Nm になる。電動機巻線は所望の値になるように巻数を決定し、支持巻線は残りのスロット領域に占積

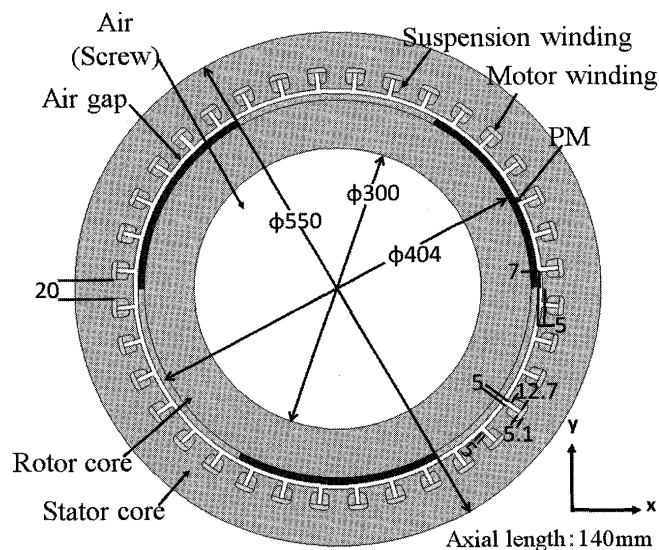


Fig. 7 Analyzed FE model
(Motor winding: Distributed, Suspension winding: Concentrated).

Table 1 Specification of analyzed FE model.

	Conventional (Concentrated)	Proposed (Distributed)
Rotor core	Silicon steel	
Stator core		
PM	Nd-Fe-B	
Motor winding [turns]	61	43
Suspension winding [turns]	4	49

率 60%になるように巻数を決定した。解析には回転角度を $0^\circ \sim 120^\circ$ の間で 2° 毎で行い、トルクを反時計方向、支持力を x 軸正方向にそれぞれ指令した。有限要素法解析は(株)JSOL の JMag-Studio Ver.9.1 を用いて 2 次元解析を行った。

Fig. 8 に回転角度に対するトルクを示した。比較のために巻線方法が集中巻の場合のトルクも示した。トルクは分布巻(重ね巻)と集中巻と同様に平均で所望の値 70Nm を満たしている。しかし、トルクリプルは分布巻(重ね巻)に変更すると約 38%から約 58%に増加し、回転子を安定に回転させるには難しく、リプルを低減させる必要がある。次節にて一般的なモータにも用いられているトルクリプルを低減させる方法の一つであるスキューを回転子にかけてリプルの低減を図る。

Fig.9 に回転角度に対する x 軸正方向の支持力(F_x)を示した。比較のために巻線配置が集中巻の場合の F_x も示した。ここで、支持力の評価を行うために所望の値を回転子を 1mm 偏心させたときの不平衡吸引力と等しい値とする。これは、本論文で対象としている固

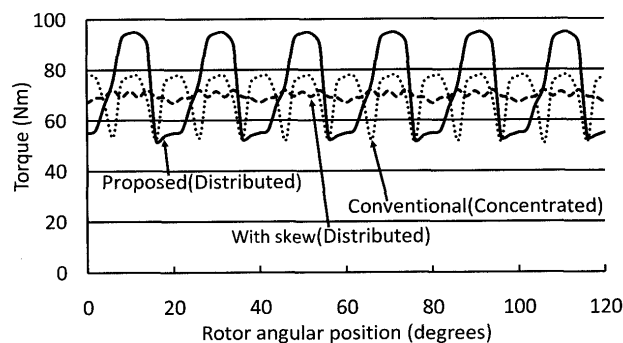


Fig. 8 Computed result of torques.

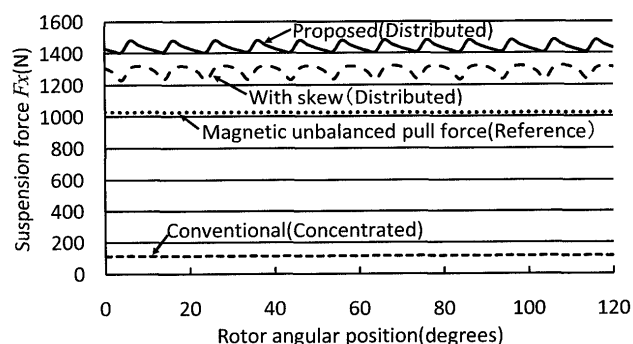


Fig. 9 Computed result of suspension forces.

液分離機の固定筒と回転筒の間にクリアランスが 1mm のタッチダウンベアリングを用いる予定である。すなわち、回転子が固液分離の工程のときに外乱により偏心しても不平衡吸引力と等しい支持力が出ていれば中心に復元するのに十分だと考えられ所望の値とした。よって、Fig. 9 中に不平衡吸引力も示した。 F_x は巻線方法を分布巻(重ね巻)に変更すると平均で約 112N から約 1400N まで増加した。不平衡吸引力は約 1000N であり、回転軸を安定に支持できる力が得られたと考えられる。 F_x が増加した理由は、電動機巻線の巻線方法を分布巻(重ね巻)に変更したことにより巻数が 61 ターンから 43 ターンに減少し、支持巻線が巻けるスロット領域が増加して F_x が増加したと考えられる。また、支持力リプルは集中巻と比べると約 2%から約 5%に増加したが、以前の試作機の実験結果より、安定に支持できる範囲以内であると考えられる。

4.2 スキューによるリプルの減少

電動機巻線の巻線方法を分布巻(重ね巻)に変更したことにより、電動機巻線の巻数を減らすことができ、その分、支持巻線の巻数が増加し、支持力は約 10 倍に増加して回転軸を安定に支持できる力が得られたと考えられる。しかし、Fig. 8 に示した結果よりトルクリ

プルが大きく、回転子を安定に回転させることが難しいと考えられる。そこで回転子にスキューをかけてトルクリプルの低減を図る。Fig. 8 中に電動機巻線を分布巻(重ね巻)に変更したベアリングレスモータの回転子を回転軸方向に5分割し全体で 16° のスキューをかけたときの回転角度に対するトルクを示した。トルクリプルはスキューをかけることで約58%から約7%に低減し、スキューの効果が十分見られ、固液分離の工程において悪影響を及ぼす程ではないと思われる。また、スキューをかけることによりトルクの平均値は約4%減少したが所望の値を満たしていた。

スキューをかけることにより支持力への影響が懸念される。Fig. 9 中に回転角度に対するスキューをかけたときの F_x を示した。スキューをかけることにより F_x も約10%減少した。しかし、不平衡吸引力よりも大きな F_x が発生しており、回転子を安定に支持できる力が得られたと考えられる。支持力リプルはスキューにより約5%から約7%に増加したが、すでに示したように以前の試作機の実験結果より、安定支持できる範囲以内であると考えられる。

以上の結果より、電動機巻線の巻線方法を分布巻(重ね巻)に変更することにより、所望のトルク、支持力を満たし、リプルも固液分離に影響を及ぼさない程度と考えられる。したがって、Fig. 7 に示したモータ形状、寸法は固液分離機用ベアリングレスモータとして十分であると考えられる。

5 あとがき

従来の固液分離機の駆動部の問題点の解決を図るためにベアリングレスモータが提案された。しかし、提案されたベアリングレスモータは回転軸を安定に支持できる力が発生していないという問題点があった。

そこで本論文では、支持力の増加を図るため、巻線方法の検討を行った。また、有限要素法解析を用いてトルクと支持力を求め、トルクリプルと支持力振動について評価、検討を行った。その結果より以下に結論をまとめる。

(1) 支持力の増加を図るため、固定子鉄心の外径は維持したまま電動機巻線の巻線方法を集中巻から分布巻(重ね巻)に変更した。巻線方法を変更したことで所望のトルクを満たす巻数が61ターンから43ターンに減少し、その分、支持巻線の巻数が4ターンから49ターンに増加したことで支持力は平均で約112N から約1400N に増加した。よって、不平衡吸引力よりも十分

に大きい支持力が発生していることが分かった。

(2) 巻線方法変更によりトルクリプルが約38%から約58%に増加した。トルクリプルの低減を図るため、一般的なモータにも用いられるリプルの低減方法の一つであるスキューを回転子にかけた。その結果、トルクリプルは約58%から約7%に低減できた。さらに所望のトルクを満たし、支持力と支持力リプルは回転軸を安定支持できる値であると考えられる。

以上の結果より、提案する巻線方法のベアリングレスモータは固液分離機への適用が可能であると考えられる。今後、本論文に示した有限要素法の解析結果をもとにして、試作機を製作し、実証試験を行っていく次第である。

(2010年9月29日受付, 2011年2月25日再受付)

参考文献

- [1]北田浩, 江森豊子, 斎藤健治, 立型遠心分離機を用いた新しい廃水処理法, 第3回超伝導リニアック研究会報告集, 高エネルギー加速研究機構, pp184-187, 2001.
- [2]M. Ooshima, H. Kitada, Development of an Axial Magnetic Bearing for Vertical-Type Centrifugal Separators, *Proceedings of 11th International Symposium on Magnetic Bearings*, pp.6-11, 2008.
- [3]富澤繁利, 大島政英, 北田浩, 固液遠心分離機用アキシシャル磁気軸受の原理と電磁界解析, 電気学会研究資料, SPC-08-191, LD-008-94, pp.103-108, 2008.
- [4]奥康弘, 富澤繁利, 大島政英, 北田浩, 固液遠心分離機用アキシシャル磁気軸受の永久磁石形状とその効果, 第21回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.155-160, 2009.
- [5]Akira Chiba, Tadashi Fukao, Osamu Ichikawa, Masahide Ooshima, Masatsugu Takemoto, and David G Dorrell, Newnes Publishers, *Magnetic Bearings and Bearingless Drive*, ISBN 0-7506-5727-8, 2005.
- [6]Masahide Ooshima, A Magnetic Suspension Control Strategy by 3-phase inverters in Bearingless Brushless DC Motors, *IEEE Power Engineering Society 2009 General Meeting*, Panel Session, 09GM0599, CDROM Calgary, 2009.
- [7]奥康弘, 大島政英, 北田浩, 固液分離機用ベアリングレスモータの構造とトルクと磁気支持力の解析, 第22回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.28-33, 2010.