

超電導リニアの技術を応用した ベアリングレスモータの可能性



まつえ ひとし

松江 仁

浮上式鉄道技術研究部（電磁路技術研究室 主任研究員）

はじめに

一般的に磁気軸受の機能も併せもつ電動モータはベアリングレスモータと呼ばれています。ベアリングレスモータは、非接触、無潤滑（オイルフリー）、無摩擦、低騒音、低振動、長寿命、メンテナンスフリーなどの利点が期待できる¹⁾ため、エネルギー貯蔵用フライホイールや医療機器、精密機器の製造設備用搬送機器への応用などを目指して研究開発が進められています。一方、超電導リニアも電磁力で浮上し、リニアモータにより推進するため、ベアリングレスモータの一種と考えることもできます。ここでは、超電導リニアが浮上する基本原理である電磁誘導現象を利用したベアリングレスモータの原理と特徴を紹介します。

ベアリングレスモータの構成

今回提案するベアリングレスモータ（以下では提案モータと呼びます）の構成を図1に示します。中心にある永久磁石ロータの周囲に2列に並んだコイルを配置するだけの、非常に簡単な構成となっています。各コイルは図2のように結線します。すべての結線を図示すると図が見づ

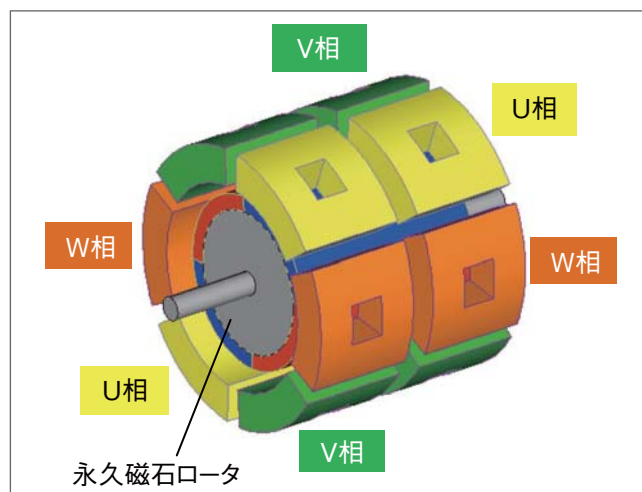


図1 提案モータの構成

らくなってしまうため、図2ではU相の結線のみを表示していますが、他のV相、W相も同じ結線になります。以下、説明のため、U相の4つのコイルの名前をU₁コイル、U₂コイル、U₃コイル、U₄コイルと呼ぶことにします。結線の特徴は、U₁コイルとU₂コイル、および、U₃コイルとU₄コイルをひねって接続している点にあります。単純なコイル配置ですが、コイル同士をつなぐ配線をこのようにちょっと工夫するだけで磁気軸受の機能も持つモータを構成できるようになります。

提案モータの原理

次に、どのようにして永久磁石ロータが浮上しながら回転するのか、その原理を説明します。リニアモータの原理は、通常回転モータを直線上に開いたものとして説明されますが、この提案モータの原理は、それとは逆に、図3のように超電導リニアの推進浮上案内兼用システム²⁾において、車上有る超電導磁石を永久磁石ロータに置き換え、リニアモータの地上コイルを回転モータのように回転形状に丸めたものと考えられます。

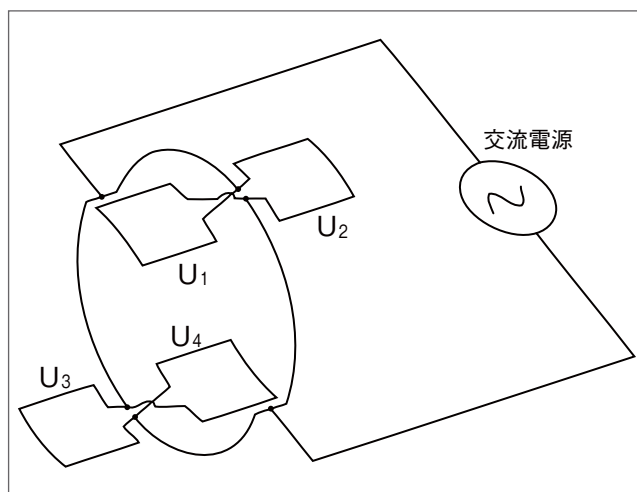


図2 提案モータの結線図

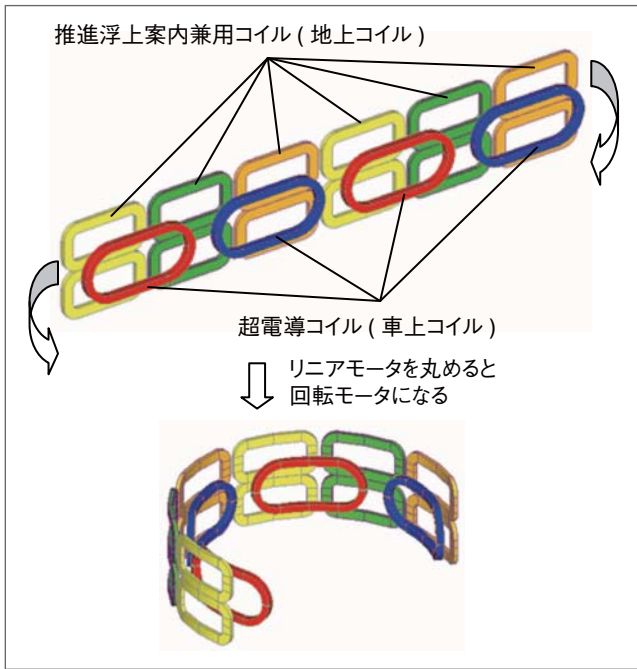


図3 超電導リアの推進浮上案内システムを丸めたイメージ

(1) スラスト力の発生原理

はじめに、磁気軸受としてスラスト力（回転軸と平行な方向の電磁力）を発生する原理について説明します。提案モータの磁気軸受としての力は電磁誘導の原理により発生します。なお、ここでは「永久磁石がコイルに囲まれた領域につくる磁束密度」と「コイルの窓面積」と「コイルの巻数」との積をそのコイルの「鎖交磁束」、その絶対値を「鎖交磁束量」と呼ぶことにします。NSNSと交互に着磁された永久磁石ロータが回転すると、永久磁石の周囲に配置された各コイルの鎖交磁束が時間的に変化するため、その鎖交磁束の時間変化率に比例した電圧が各コイルに誘導されます。例えば、図4のように永久磁石ロータが右側へずれた状態で回転している場合は、

U_2 コイルの鎖交磁束量 $>$ U_1 コイルの鎖交磁束量となるため、

U_2 コイルの誘導電圧 $>$ U_1 コイルの誘導電圧となります。この U_1 コイルと U_2 コイルとの誘導電圧の差により、図5の矢印で示したような電流が誘導されます（ $g \rightarrow p \rightarrow h \rightarrow n$ という流れ）。 U_3 コイル及び U_4 コイルでも同様の電流が誘導されますので、これらの誘導電流により、各コイルは図6のように励磁されます。同極同士（N極とN極、または、S極とS極）は反発し、異極（N極とS極）は引き付けますので、永久磁石ロータを中心に戻そうとする電磁力が、図6の黄矢印のようにスラスト力として働くこととなります。これが、提案モータのスラスト力発生原理です。なお、この誘導電流は、常に永久磁石からの鎖交

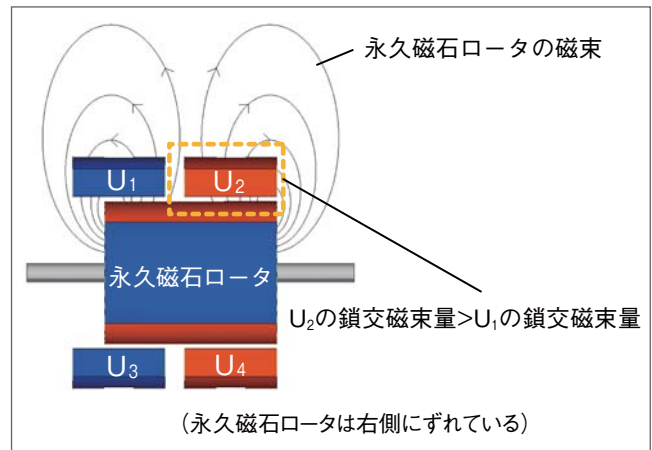


図4 コイルを鎖交する永久磁石の磁束のイメージ

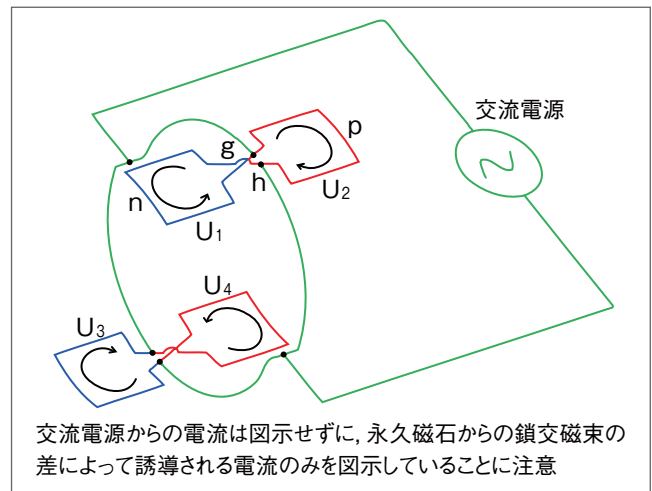


図5 スラスト力を発生する誘導電流の流れ

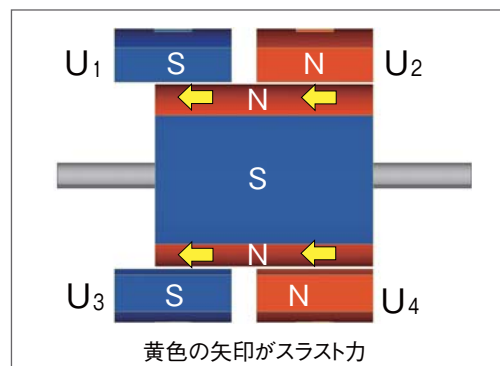


図6 スラスト力発生時の励磁状態

磁束量が多い方のコイル（図4の例では U_2 コイル）の鎖交磁束を打ち消すように誘導されていますので、誘導電流の向きは自然と永久磁石の回転速度と同期して交互に反転します。従って、永久磁石ロータを中心に戻そうとする電磁力（スラスト力）が常に働くようになります。また、永久磁石ロータが中心にある時は、図5のような誘導電流が流れないため、スラスト力はゼロになります。

(2) ラジアル力の発生原理

次に、永久磁石ロータのラジアル力（回転軸に垂直な方向の電磁力）を発生する原理を説明します。スラスト力と同じように、ラジアル力を発生させる原理も電磁誘導の原理によります。

スラスト力の発生原理の項では、鎖交磁束量が多くなる方のコイルの鎖交磁束を打ち消すように誘導電流が流れることを説明しました。ラジアル力の場合も同じです。例えば、図7のように、永久磁石ロータが下側にずれた状態で回転している場合、

U_3 コイルの鎖交磁束量 $>$ U_1 コイルの鎖交磁束量

U_4 コイルの鎖交磁束量 $>$ U_2 コイルの鎖交磁束量

となりますので、

U_3 コイルの誘導電圧 $>$ U_1 コイルの誘導電圧

U_4 コイルの誘導電圧 $>$ U_2 コイルの誘導電圧

となります。この電圧の差により、図8の矢印で示した

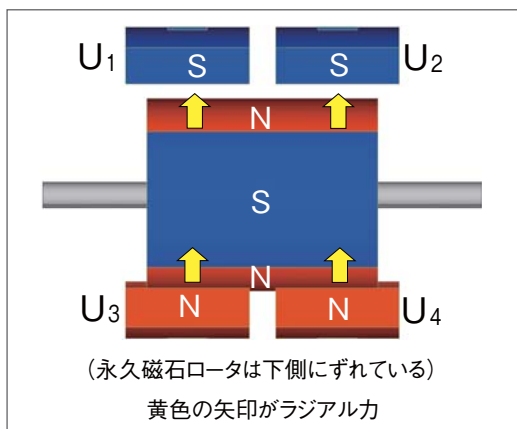


図7 ラジアル力発生時の励磁状態

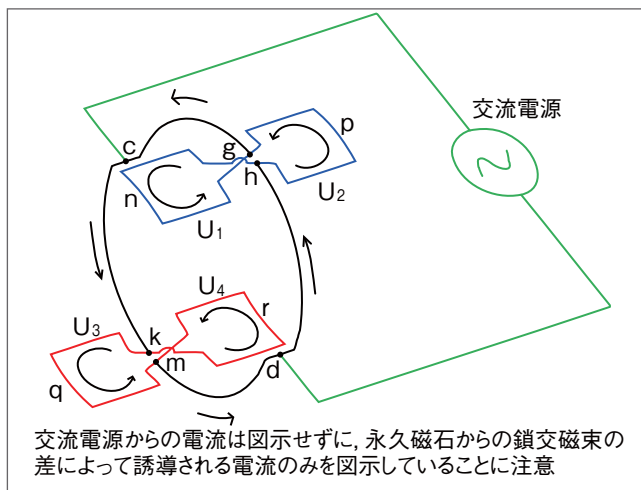


図8 ラジアル力を発生する誘導電流の流れ

ような電流が誘導されます ($c \rightarrow k \rightarrow q \rightarrow m \rightarrow d \rightarrow h \rightarrow n \rightarrow g \rightarrow c$ という流れと $c \rightarrow k \rightarrow r \rightarrow m \rightarrow d \rightarrow h \rightarrow p \rightarrow g \rightarrow c$ という流れ)。そして、これらの誘導電流により、コイルは図7のような励磁状態になり、永久磁石には中心に戻されるような電磁力（図7の黄矢印で表示）がラジアル力として働きます。以上が、ラジアル力の発生原理です。

(3) トルク発生原理

提案モータの永久磁石ロータには、電磁誘導の原理により、中心に戻される電磁力が自然に働くことを説明しました。提案モータのトルク発生原理は、スラスト力やラジアル力の発生原理とは異なります。提案モータのトルクは、電流を誘導させるのではなく、外部の交流電源から永久磁石ロータの回転に同期した交流電流を強制的に通電することにより発生します。すなわち、通常永久磁石同期モータと同じ原理でトルクを発生します。図9のように、4つのコイル U_1 , U_2 , U_3 , U_4 がひねって接続されている箇所に電源が繋がれていることが重要です。4つのコイルが電源に対して並列接続されていると考えていただければわかりやすいと思いますが、このように接続することにより、電源からの電流が図9の矢印のように強制的に流されます ($a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow g \rightarrow n \rightarrow h \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$ という流れと $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow g \rightarrow p \rightarrow h \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$ という流れと $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow k \rightarrow q \rightarrow m \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$ という流れと $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow k \rightarrow r \rightarrow m \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$ という流れ)。このように強制的に流される電流により、図10のように U_1 , U_2 , U_3 , U_4 の4つのコイルが同じ極性に励磁されます。従って、この電流の流れの向きを永久磁石の回転速度と同期させれば、常に一定回転方向のトルクを発生させることができることとなります。逆に言

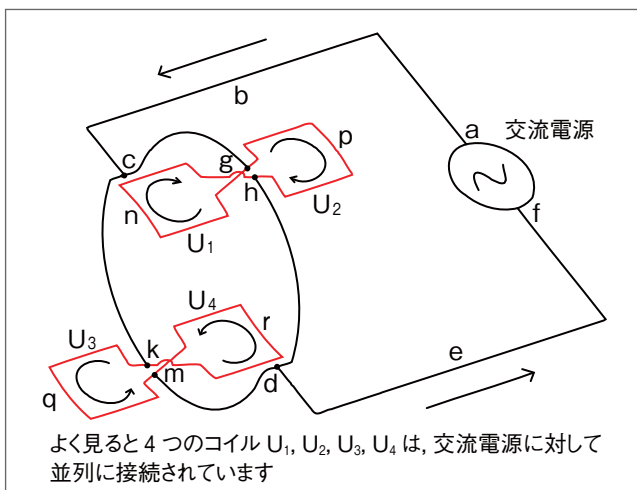


図9 トルクを発生する電流の流れ

えば、永久磁石ロータの回転速度に電流を同期させなければトルクを発生することはできません。

実際には、スラスト力を発生する誘導電流とラジアル力を発生する誘導電流とトルクを発生する強制電流を足し合わせた電流がコイルに流れることとなります。電磁力に関しても、これらを足し合わせた力が発生することとなります。

提案モータの特徴

他の一般的なベアリングレスモータの場合、ロータ位置をフィードバックする制御が必要となりますが、ここで提案しているベアリングレスモータでは、磁気軸受としての制御は必要ないため、以下のような長所を有します。

(1) 高速回転時に安定

ロータ位置をフィードバックして制御する磁気軸受では、高速回転になるほど制御が難しくなることが予想されます。それに対して、ここで提案しているベアリングレスモータは、むしろ高速で回転する方が効率よく安定して磁気軸受の力を発生します。

(2) 信頼性が高い

完全に受動的な磁気軸受なので、例えば、停電のような異常時においても、回転慣性で永久磁石ロータが回転している間は、磁気軸受としての電磁力が急激にゼロになるということはありません。従って、磁気軸受の制御がフェイルすることを心配する必要のない信頼性の高いベアリングレスモータとなります。

(3) 低コスト

他の一般的なベアリングレスモータの場合、トルク発生用のインバータだけでなく、磁気軸受としての電磁力を

制御するためのインバータが必要になります。一方、この提案モータの場合はトルク発生用のインバータ1台だけで済むため、その分、製作費用が安くなることが期待できます。

(4) コンパクト

他のベアリングレスモータでは、トルクを発生させるためのコイルと磁気軸受のためのコイルを別々に配置するのが一般的ですが、提案モータの場合は、図1のように2列に並んだコイルが、トルク発生用コイルと磁気軸受用コイルの機能を兼用しています。そのため、提案モータは、普通の永久磁石同期モータとほとんど変わらない大きさで構成できるものと考えられます。

以上が提案モータの長所ですが、他の一般的なベアリングレスモータと比較して、以下のような短所もあります。

(1) 補助支持機構が必要

提案モータの磁気軸受は純粋に電磁誘導原理に基づくため、低速回転時に発生できる磁気軸受の力は小さくなります。極端に言えば、永久磁石ロータが回転していない時は磁気軸受としての力を発生させることができません。従って、停止時および低速回転時に別途機械的な補助支持機構が必要となります。提案モータは、厳密にいうと、高速回転時限定のベアリングレスモータであると言えます。

(2) 電磁力が小さい

提案モータで発生できる磁気軸受の力は、永久磁石の磁場の強さに依存します。超電導磁石のような強力な磁場を使った場合には、大きな磁気軸受の力を発生させることができますが、永久磁石の場合には比較的小さな力しか発生できないと推定しています。永久磁石でもなるべく大きな磁気軸受の力を発生できるようにすることが今後の研究課題になります。

おわりに

このベアリングレスモータの研究は始まったばかりであり、まだ、机上での検討が中心です。これから、実験や解析を通して、本提案の効果を検証する予定です。RRR

文献

- 1) 竹本他：ベアリングレスドライブの構造と制御技術，平成17年電気学会産業応用部門大会，第1分冊，p.25
- 2) 饗庭雅之：日の字PLGコイルの開発，RRR，p.26，2005.3

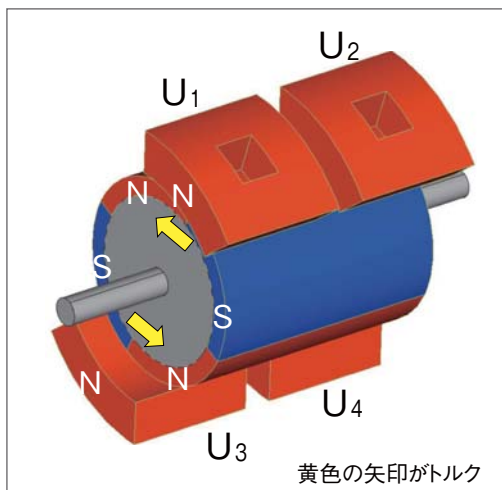


図10 トルク発生時のコイルの励磁状態