

論文の内容の要旨

論文題目 静電誘導給電型モータの構造と駆動特性に関する研究

氏名 山下 典理男

昨今の産業競争の激化や製品の多様化に伴い、アクチュエータに対して、高出力・高制御性といった性能以外に、軽量・省スペースを始めとする多くの機能性が望まれている。静電フィルムモータにおいても、これまでは高い制御性や出力性能を目指した研究が行われてきた。一方で、薄型・軽量・透明化可能であるという特徴を活かして、広告・インタフェースデバイスへの応用等の従来にない新しいアプリケーションを開拓しようとする動きがある。このような新しい応用に求められる特徴として、移動子配線の除去や同期駆動があげられる。従来、高出力を求めた静電モータでは、移動子側に給電線を配置し電圧を積極的に印加することで高い性能を得てきた。しかし、移動子への配線は、上記の広告・インタフェースデバイスとしての応用を考えた場合、望ましいものではない。移動子配線を必要としない静電モータ原理も誘導モータとして良く知られているが、同期式では無いため位置制御の点で困難がある。それに対し近年、移動子に無配線で同期駆動が可能なモータとして、静電誘導給電型モータが提案された。静電誘導給電型モータは、移動子・固定子上に誘導電極と呼ばれる電極を配置し、誘導電極を介した給電を行なうことで、移動子に無配線で動作する。「誘導」と称してはいるが、一般的な非同期の誘導モータとは異なり、その動作は同期式である。動作原理や推力性能は十分には明らかとなっていないが、移動子に無配線で同期駆動ができるという点は魅力的であり、本研究ではこのモータに着目した。本研究では、次の点を目的とする。

- ・任意相数の静電誘導給電型モータに対して、駆動原理および動作特性を明確化する。
- ・静電誘導給電型モータのモータ構造・電極構造・電極相数が誘導特性および駆動性能に与える影響を解明する。
- ・静電誘導給電型モータの新たな駆動手法として、パルス電圧による駆動手法とその特性を明らかにする。

本論文は序論、結論を含め全 7 章で構成される。第 2 章から第 4 章までは、静電誘導給電型モータの電極構造お

よびその特性に関する内容であり、様々な電極構造を持つモータに対して横断的に評価を行うための基礎理論の構築を目指す。第 5 章からは第 6 章では、モータの電極構造と特性を踏まえた上での駆動手法に関する検討であり、パルス電圧駆動による二相四相モータの特性について議論を行う。さらに電流量の制限を目指し、パルス電圧波形を鈍らせた状態での駆動特性について議論する。最後に第 7 章を本研究のまとめとする。

以下に各章の概要を述べる。

第 1 章は序論とする。これまでに開発されてきた様々な種類の静電モータの特徴について概説し、静電誘導給電型モータにおいてこれまでに明らかにされた点と現存する課題を指摘した上で、本研究の目的と概要を示した。

第 2 章では任意相 (m 相 n 相) の静電誘導給電型モータの解析により、その駆動特性を明らかとした。初めに駆動電極のみを評価するために、静電誘導の効果を除き、移動子に配線のある m 相 n 相モータに対して解析を行なった。二相電極 ($m=2$) の場合は、三相以上 ($m>2$) の場合と異なり、移動子上の電圧分布波が定在波になることを指摘した。それにより 2 つの周波数成分を持つ推力が発生し 2 つの同期速度が存在することを解析的に示した。この 2 つの理論的な同期速度は、モータの同期駆動を行なう際に互いに外乱要因となりモータの駆動の安定性を損なうことを指摘した。さらに、高周波電圧を用いることで一方の同期速度を事実上無効化出来ることを示し、結果として他方の同期速度による一定速度の滑らかな同期駆動が可能であることを示した。次に、静電誘導給電型モータに対しても任意相 (m 相 n 相) のモータに拡張し、様々な相数のモータを統一的に扱うことができる解析式を導出した。解析においては三相静電誘導給電型モータにおける解析手法を応用し、 m 相 n 相静電誘導給電型モータのキャパシタンスネットワークモデルおよびそれに基づく静電容量係数行列を提案した。モデルから得られた回路方程式に対して、その線形性および電極構造の周期性に基づき誘導電圧の解析解の形式を与えることで、回路方程式の解を得ることが可能であることを示し、 m 相 n 相モータの誘導電圧および推力の解析解を得た。得られた推力特性式から、移動子に配線があるときと同様に、移動子が二相電極 ($m=2$) であるときには三相以上 $m>2$ の場合と異なる特性を持つことを示した。さらに、高周波交流電圧を用いることで同期駆動を実現できることを理論的に示した。また、推力式に基づき、モータを交流電圧により同期駆動を行なったときの同期速度を導出した。

第 3 章では 2 章で得られた静電誘導給電型モータの二相電極特性について、プロトタイプによる実験検証を行なった。初めに、二相四相電極を持ち移動子に配線のあるプロトタイプを用いて、二相電極の特性を評価した。その結果、モータの推力に、二相電極に起因する二つの周波数成分が存在することを確認した。さらに、1000 Hz 付近の高周波電圧により駆動を行なうことで、一方の推力成分のみを利用した滑らかな同期駆動が行えることを示した。また、他方の推力成分はモータの変位に微小振動となって現れ、印加電圧周波数の上昇により振幅が減少することを示した。これらは理論と一致しており、理論の妥当性を示した。次に、二相四相静電誘導給電型モータにおいて、移動子に誘導される誘導電圧の測定を行い、理論値に近い値が得られることを確認した。また、変位の測定を通して、高周波電圧を用いることで二相四相静電誘導給電型モータの同期駆動が行えることを示した。それに対し、低周波電圧を用いた場合には変位が振動的になり、駆動が行える場合はあるものの安定性が損なわれることを示した。これらの実験検証を通して、前章の理論結果の妥当性を示した。

第 4 章では、電極相数および電極構造の最適化と、最適化状態における異なる電極構造のモータ間の性能比較を

行った。初めに誘導電極と駆動電極の面積割合について単位面積あたりの推力を最大化させるような最適な電極面積割合が存在することを指摘した。そこで、2章で得られた解析式を、電極面積割合をパラメータとする表現に改め、最適な電極面積割合の理論式およびそのときの推力式を導出した。次に、様々な電極構造を持つモータにおいて、性能の比較基準として、各モータの最適電極面積割合時の推力を用いることを提案した。また、各モータの性能評価に詳細な電極形状を反映させるために、有限要素法による静電容量解析を援用した。実際のフィルム断面形状に基づきモデル化を行ない、結果の妥当性はプロトタイプでの実測値との比較により行なった。得られた静電容量と最適面積割合時の推力式から様々な電極構成をもつモータの性能の定量化を行ない、電極形状やフィルム構造のモータ性能への影響を明らかにした。特に、移動子に配線のあるモータでは問題とならなかった電極厚みが、静電誘導給電型モータでは性能に無視できない影響を及ぼすことを明らかにした。また、同一のフィルム断面構造を持つ異なる相数のモータの比較を行ない、二相四相静電誘導給電型モータが最も良い性能を示すことを明らかとした。

第5章では、良好な性能が示された二相四相静電誘導給電型モータに対して推力のさらなる向上と駆動方式の拡充を目指し、パルス電圧駆動を提案した。初めに固定子電圧のみを順次スイッチングする単純なパルスシーケンスを提案し、解析により正弦波電圧駆動と比較して約2倍の推力が得られる可能性を指摘した。しかし、駆動実験では、固定子電圧のスイッチングのみでは1秒程度でモータが停止し、連続的なステップ駆動が行えないことを示した。この現象について、移動子電極が一定極性であることにより移動子フィルムが帯電し、駆動の阻害要因となっていることを指摘した。これを踏まえ、固定子電圧と同時に移動子電圧もスイッチングする修正パルスシーケンスを提案し、連続的なステップ駆動を実現した。加えて、新たに2つのパルスシーケンスを提示し、それぞれ連続的な駆動が実現できることを実証した。章後半では、誘導電圧測定から長周期スイッチング時の電圧の減衰および、それがフィルムの帯電効果による可能性について指摘した。さらに、それらの帯電は、電圧スイッチング後には逆に誘導電圧の増加をもたらし、推力向上が見込める点を指摘した。最後に、短周期および長周期スイッチング時の推力測定結果より、長周期スイッチング時ではスイッチング直後の推力が増大していることを示した。これらにより、静電誘導給電型モータのパルス電圧駆動の特性と有用性を明らかにした。

第6章では、パルス駆動時の電流量を抑制による安全性向上を目指し、電源出力に電流制限抵抗を接続する必要性を述べた。その際、接続した抵抗と容量性負荷である静電モータ間でRC回路が形成され、パルス電圧の立ち上がり立ち下がりに時定数をもつなまりが生じることを指摘した。そこで、パルス電圧になまりを有する場合の静電誘導給電型モータの駆動特性を評価した。初めに、抵抗接続状態を模擬し、時定数をもつパルス電圧を電源側で生成し、各駆動ステップにおける移動子の動き出しのタイミングや最大速度および駆動可能な時定数の範囲を明らかにした。さらに、実際に抵抗を電源とモータ間に接続し、モータの駆動および電流量の抑制効果を実証した。

最後に第7章では本論文の総括を行なった。本論文で得られた結果および今後の展望について述べた。