

博士（工学）山下道寛

学位論文題名

磁気エネルギー モデルに基づく誘導電動機の制御

学位論文内容の要旨

今日、電動機は実に様々な用途に用いられ、身の回りを見渡せば、電動機無しの生活は考えられなくなっている。その用途は多岐にわたっていて、我々の生活の大きな支えとなっている。

電動機は動作原理、構造などに応じて様々な種類があり、直流電動機、誘導電動機、同期電動機、ステッピングモータ、ブラシレスDCモータ、などに大別できる。これらのモータの使用形態も、コンピュータ機器の冷却用ファンに用いられる電動機のように、単純な動力源として用いられるものから、ロボットの駆動用電動機のように、指令に正確かつ迅速に追従することが要求される高度な制御用途まで様々である。

現在、操作性に優れ、トルクのコントロールが容易である直流電動機は、産業界において広く用いられてきた。特に、精度を要求される用途に対しては主流の座を占めている。しかし、直流電動機の唯一とも言える欠点は、整流子とブラシの接触機構があるために定期的な保守の必要や、使用環境上の制約、高速化の限界などが生じることである。そこで、それらの問題をクリアしている誘導電動機への代換が強く望まれているが、直流電動機ほど扱いは易しくはない。

誘導電動機（かご形）は、低価格、堅牢、軽量、さらに大きなメリットとして、基本的にメンテナンスフリーである。しかし、構造上、トルクをコントロールするのが容易でなく、運転速度が電源周波数により決まるため、主に定速度機用として用いられてきた。

従来、誘導電動機は定常特性に注目したV/f一定制御やすべり周波数制御を行っていた。これらの制御方法では定常特性を求ることはできたが、過渡特性や瞬時トルクを扱うことが困難であった。そのため1960年代後半から誘導電動機の過渡時の挙動について解析が進められた。その結果、ベクトル制御が登場し、誘導電動機の瞬時トルクの制御が初めて可能となった。近年においては、半導体デバイス、コンピュータの急速な進歩によって、PWMインバータ（可変周波数電源）を用いた誘導電動機のベクトル制御駆動方式の研究が盛んに行われている。

直流電動機では、励磁磁束となる電流（励磁電流）と励磁磁束と直交しトルク発生に寄与する電機子電流が構造的に分離されている。そのため、それぞれの電流を独立に操作することが可能であることから、優れたトルク応答を得ることが可能である。そこで、誘導電動機でも固定子側から入る電流（一次電流）を電機子電流に相当する電流（トルク成分電流）と励磁磁束を発生させる電流（励磁成分電流）に分けて、直流電動機と同様な方法で制御され

た。しかし、誘導電動機の場合、一次電流が励磁成分電流とトルク成分電流を含んでいるため、過渡状態では各成分電流同士が互いに干渉する。その結果トルク応答に悪影響を与えてしまう。

電流、電圧、磁束量を用いて誘導電動機の時間的振る舞いを記述すると、非線形モデルとして記述される。従来の誘導電動機のベクトル制御では、この非線形モデルを用いているため、状態方程式に非線形項を含む。そのため、線形制御理論への適用を考えたとき何らかの方法によって線形化しなければならない。そこで、通常用いられる方法としては、テイラー展開を行い2次以降の項を無視して線形近似モデルを得ていた。この手法の問題点は、大きく速度や負荷変動が起きたときに誘導電動機の動作の安定性が保証されていないことが挙げられる。たとえば、ある動作点で運転しているときの各値（電流、回転数、周波数など）を用いて制御システムを構成しているため、回転数やトルクの値が変わった場合には、誘導電動機を安定に運転できるかどうか保証できない。

そこで、本研究では、誘導電動機の磁気エネルギーの立場から現象を眺め、回転子側への磁気エネルギーの流れは線形状態方程式として表されることに注目し新しい制御系を構成した。提案する方式では、磁気エネルギーの立場から誘導電動機のモデルの構成を行い、誘導電動機を線形システムとして表現した。そして、電流を操作量とする電流形モデルと電圧を操作量とする電圧モデルを導出した。

電流形モデルは、二次側へ供給される磁気エネルギーがトルク発生に寄与しているとの観点から、誘導電動機の磁気エネルギーの振る舞いを時間変化の式として表現されている。そして、磁気エネルギー的な見地からトルク成分電流と励磁成分電流が非干渉となる線形モデルとなる。。この線形モデルではトルクを仮想入力として、システムが要求するトルクを直接出力することが可能である。電圧形モデルは、まずははじめに従来用いられてきた非線形方程式に変数変換を施すことにより、トルクや磁界の蓄積エネルギーなどで表現されたモデルを導出する。次に電流形と同様にこれら磁気エネルギーが互いに非干渉となるように線形化及び非干渉化フィードバックを用いて線形モデルとして記述している。

導出したこれら2つの線形モデルでは、状態変数を物理量として記述しているため、システムの動作をエネルギーの面から把握でき、様々な優れた線形制御理論を直接応用することが可能である。これにより、上述した非線形問題を解決しただけではなく、誘導電動機で直流電動機と同等の性能を得ることを可能とした。その有効性はシミュレーション及び、PWMインバータを用いた誘導電動機を駆動させる実験を行い確認した。

本モデルを用いた誘導電動機制御では、トルクを電流形モデルでは制御入力、電圧形モデルでは状態変数としているため、トルクをダイレクトに扱うことができる。これにより、ロボットマニピュレータなどトルクを操作量に選ぶような制御対象の場合、誘導電動機とロボットアームを一体化した制御系構成が可能となる。また、サーボモータとして用いる場合は、励磁成分電流は通常一定として制御されるが、軽負荷時にも定格の励磁分の電流を流すことになるため効率が悪い。そこで、励磁成分電流とトルク成分電流を非干渉に制御できることから、励磁成分電流を運転状態によって積極的に変化させることで、効率を最適にする制御法などへの応用が期待される。

学位論文審査の要旨

主査 教授 土谷武士
副査 教授 長谷川 淳
副査 教授 大西利只
副査 教授 島 公脩

学位論文題名

磁気エネルギー モデルに基づく誘導電動機の制御

今日、電動機は産業界並びに日常生活において必要不可欠な機器となっている。その用途は多岐にわたっていて、我々の生活の大きな支えとなっている。現在、操作性に優れ、トルクのコントロールが容易である直流電動機は、産業界において広く用いられてきた。特に、精度を要求される用途に対しては主流の座を占めている。しかし、直流電動機の唯一とも言える欠点は、整流子とブラシの接触機構があるために定期的な保守の必要や、使用環境上の制約、高速化の限界などが生じることである。そこで、それらの問題を持たない誘導電動機への代替が強く望まれているが、直流電動機ほど扱いは易しくはない。

誘導電動機（かご形）は、低価格、堅牢、軽量、さらに大きなメリットとして、基本的にメンテナンスフリーである。しかし、構造上、トルクをコントロールするのが容易でなく、運転速度が電源周波数により決まるため、主に定速度機として用いられてきた。近年においては、半導体デバイス、コンピュータの急速な進歩によって、現在 PWMインバータ（可変周波数電源）を用いたベクトル制御駆動方式が主流となっている。しかし、従来のベクトル制御を行う上で基本となる誘導電動機モデル（非線形モデル）では、トルク発生に関してモデルの非線形性の影響を受けるため、トルクの応答性が劣化する。

本論文では、誘導電動機の磁気エネルギーの立場から現象を眺め、回転子側への磁気エネルギーの流れは線形状態方程式として表されることに注目し、誘導電動機の線形モデルを導出した。そこで、電流を操作量とする電流入力形モデルと電圧を操作量とする電圧入力形モデルを提案している。導出した線形モデルでは、状態変数を物理量として記述しているため、システムの動作をエネルギーの面から把握でき、様々な優れた線形制御理論を直接応用することが可能である。これにより、非線形問題を解決しただけではなく、誘導電動機で直流電動機と同等の性能を得ることを可能とした。その有効性はシミュレーション及び、PWMインバータ駆動誘導電動機を用いた実験により確認している。

以上のことから、本論文は、誘導電動機の磁気エネルギーに着目することで、線形モデルを導出し、新しい制御方法を確立したものである。

これを要するに、著者は、従来にない磁気エネルギー モデルを用いることで高性能な誘導

電動機駆動を実現するための新知見を得たものであり、誘導電動機制御の進歩に貢献すると
ころ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。