

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

誘導電動機の慣性負荷駆動時のトルク制御性能向上
に関する研究

Study on high performance torque control of
induction motor drive system for inertial load

申請者

長瀧 仁貴

Masaki NAGATAKI

電気・情報生命専攻 電動モビリティシステム研究

2023年2月

誘導電動機可変速駆動システムは、高性能な速度制御やトルク制御が必要な産業機器や輸送機器で広く用いられている。現在、脱炭素社会に向け移動体の電動化が求められている。電動化の幅広い普及の促進には、安価な誘導電動機の可変速駆動技術が重要である。自動車や鉄道車両などの移動体は慣性が大きく車体の速度変化が比較的緩やかなので、一般には速度制御系は用いられず、運転者のアクセルやノッチ操作で決まるトルク指令値にしたがいトルク制御される。トルク制御性能を向上するには制御器のモータ定数調整や制御器設計作業が必要である。これらの作業はモータ、インバータ装置の工場出荷前に作業員により行われるが、高い専門性が必要であり煩雑な作業となる。本論文では、定常的なトルク制御性能を向上するためのモータ定数調整手法と、過渡的なトルク制御性能を向上するための制御器設計法に関する研究を実施している。

本論文は 5 つの章で構成されている。第 1 章は序論であり、本論文の背景と目的について説明している。

第 2 章では、定常的なトルク制御性能向上のためのモータ定数調整手法について提案している。誘導電動機は数学モデルが確立しているため、モータパラメータ調整の研究ではこの数学モデルに基づき種々の調整技術が提案されている。誘導電動機の電圧方程式の係数であるモータ定数を応答波形から同定することは数理モデルの逆問題を解くことに相当する。そこで、適応機構を持つ制御の応用や、最小二乗法の応用によりモータ定数を回帰的に同定する手法が提案されている。しかし、回帰的手法であるため、各モータ定数と応答波形の対応関係が明らかでない。各モータ定数と応答波形の 1 対 1 の対応関係が明らかにできれば、適応機構や複雑な計算アルゴリズムを必要としない簡易な自動調整の提案が可能となる。

誘導電動機の特徴的な応答からモータ定数を調整する手法として、電流ステップ応答時に、軸ずれによる電圧応答の過渡的な遅れから 2 次時定数を調整する手法が提案されている。しかし、応答波形に対するモータ定数の調整量が定量的に明らかにされていないため、繰り返し運転が必要である。応答波形に対するモータ定数補償量の定量的な関係が明らかにできれば、より短い時間で調整作業を完了することができる。その他の特徴的な応答として周波数応答があり、モータに高周波電圧を印加して誘導機の周波数応答をもとにモータ定数を同定する手法が提案されている。しかし、高周波電圧の印加では 2 次抵抗の表皮効果の影響により測定精度が下がることが指摘されている。したがって、定常的な加速運転時に基本波成分のみから調整できればより高い精度でのモータ定数同定が可能になる。

本研究では、PI 制御器が補償する電圧の 1 次角周波数変化率が磁束の誤差成分の補償量となっていることに着目し、この磁束補償量からモータ定数を調整する手法を提案している。まず、ベクトル制御系のフィードバック制御器である PI 制御器が補償する電圧と、電圧誤差の要因である各モータ定数誤差との関係を解析的に明らかにしている。それらの関係から、モータ定数調整の調整則と自動調

整のアルゴリズムを提案している。次に，調整則に用いる補正ゲインの大きさと自動調整の収束性を明らかにし，自動調整が収束するための補正ゲイン決定法を提案している。本提案手法は，電圧と1次周波数の比にもとづき調整する手法であるため，慣性負荷駆動の定常的な加減速運転時に基本波周波数成分のみを用いてモータ定数の調整が可能である。さらに，応答波形に対するモータ定数の補正量が定量的に明らかのため，少ない回数で調整作業を完了できる。数値計算と慣性負荷付き誘導電動機を用いた実験により，提案法の収束性と有効性を明らかにしている。

第3章では，過渡的なトルク制御性の向上のための制御器設計手法について提案している。誘導電動機は1次側2次側とdq軸を持つ4次のモデルであるため，dq軸間の干渉や1次側2次側間の干渉が生じる。すべり周波数形ベクトル制御でのトルク電流応答では，トルク電流指令値の変化によりすべり角周波数が変化し，これによってq軸2次磁束が変動し軸ずれと1次側への干渉が発生する。トルク電流指令値が急峻に変化する場合は，2次磁束の過渡的な変動量が大きくなり，トルク応答が劣化する。先行研究では，誘導電動機の1次側のdq軸間を非干渉化することで，電流応答を改善する手法が提案されている。しかし，1次側のdq軸間の非干渉化だけでは，すべり角周波数指令値が変化した時のq軸2次磁束の変動そのものは抑制できないため，トルク応答の劣化は避けられない。したがって，トルク応答の改善のためには，2次磁束の応答に着目した検討が必要である。

本研究では，過渡応答時のすべり角周波数の変動と2次磁束の応答の関係に着目し，すべり角周波数の1次遅れ制御により過渡応答時の2次磁束の変動を抑制する手法を提案している。まず，すべり角周波数と2次磁束応答のメカニズムを明らかにし，提案制御系の特性を明らかにしている。次に，1次遅れ制御器の時定数の設計法を示し，モータパラメータ変動に対する提案手法のロバスト性を示している。本提案手法は，過渡応答時の軸ずれを抑制することで，2次側回路の影響を無視し，1次側回路に対するPI制御のみで1次遅れ応答を実現できる。2次磁束の変動そのものを抑制して過渡応答時にもベクトル制御を達成する手法であるため，非干渉化制御などを追加する必要がなく制御器を極めてシンプルな構成にできる。数値計算と慣性負荷付き誘導電動機を用いた実験により，提案法の有効性を明らかにしている。

第4章では，回生時の不安定現象と安定化のための制御器設計指針について提案している。誘導電動機ベクトル制御には，回生時に電流制御の不安定現象が発生する問題がある。電気自動車や鉄道車両などの移動体は比較的長い時間回生動作を行うため，この不安定現象は問題となる。回生時の不安定現象は積分器の出力電圧の位相特性が適切でないために生じることが知られているが，実験波形にもとづく定性的な解釈である。不安定現象のメカニズムが定量的に明らかになれば，制御器設計の指針を提示することができる。一般的な安定性解析では不安

定極の解析などが行われるが，極の情報だけでは制御系のダイナミクスを把握することは難しい。制御器設計の指針を明らかにするため，制御系のダイナミクスを明らかにする必要がある。

本研究では，回生時不安定現象のメカニズムを明らかにし，安定な制御器設計の指針を提示している。制御系のダイナミクスの把握には，制御系のゲインと位相の周波数特性(ボード線図)を解析することが有効である。誘導電動機の1次側，2次側回路を切り分けて周波数特性を解析することで，回生時は力行時に対してすべり角周波数の極性が反転するために2次磁束応答の位相特性が180度変化し，これにより誘導電動機の位相特性が180度進むことを明らかにしている。この位相特性の誘導機に対してPI補償では制御系の位相を適切に補償できず不安定になることを示し，1次側回路のdq軸間の干渉によりこの位相特性が伝達されていることを明らかにしている。これらのメカニズムが明らかになったことで，安定化のための制御器設計の指針としてdq軸間の非干渉制御が有効であることを示し，慣性負荷付き誘導電動機を用いた実験により，安定化手法の有効性を明らかにしている。

第5章は結論であり，本論文で得られた成果と今後の課題をまとめている。

以上を要約するに，本論文は定常的なトルク制御性能向上のためのモータ定数調整手法と，過渡的なトルク制御性能向上のための制御器設計手法の技術的課題に対し，加速時の磁束補償量からモータ定数を自動調整する手法，すべり角周波数の1次遅れ制御により2次磁束変動を抑制する手法，回生時の不安定現象の安定化手法を提案し，実験を通して提案手法の有効性を明らかにしている。本論文で得られた成果は，誘導電動機のトルク制御性能を向上するための調整作業の省力化に貢献し，誘導電動機可変速駆動システムのさらなる普及に寄与するものである。よって，本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2023年1月

審査員

(主査) 早稲田大学教授 博士（工学） 早稲田大学 近藤 圭一郎
(署名)

(副査) 早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 石山 敦士
(署名)

早稲田大学教授 博士（工学） 早稲田大学 若尾 真治
(署名)

早稲田大学教授 博士（工学） 早稲田大学 林 泰弘
(署名)