

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文概要

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

2022年12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。高性能なトルク制御により、車輪の空転を抑制する空転制御や、直流電気鉄道システムにおいて回生時の負荷変動時に回生ブレーキ力を絞り込む軽負荷回生制御などが可能となる。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。誘導電動機可変速駆動システムのさらなる普及には、これらの作業の省力化が重要である。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た。

本論文は全 5 章で構成される。第 1 章は序論であり、本論文の背景と目的について説明する。

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述べる。モータ定数の調整は、測定が容易なモータの電流や電圧の波形をもとに行われる。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ため、誘導電動機の状態推定や回帰分析的手法が有効である。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、電流や電圧の実際値と推定値が一致するように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アルゴリズム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などが提案されている。しかし、回帰的な手法と比べて、定速運転状態や停止状態など特定の運転条件が必要である。また、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、誘導電動機の低すべり化に伴い、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、慣性負荷駆動の定常的な加減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する。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する。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する。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する。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かなため、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確認する。

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述べる。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、トルク電流のオーバーシュートが発生する。また、トルク電流のオーバーシュートと 2 次磁束の軸ずれによって、トルク応答が劣化する。PI 制御器は干渉に弱いいため、これを補償することができず、PI 制御器のゲイン調整のみではトルク応答の改善に限界がある。

電流応答の改善には非干渉化制御が有効である。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、電流応答は改善しても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不可欠である。

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し、高応答なトルク制御を実現する手法を提案する。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定量的に明らかにする。次に、1 次遅れ制御器の時定数の設計法を示す。また、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す。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。また、すべり角周波数制御に1次遅れフィルタを付加する簡易な制御構成であり、急峻なトルク電流の変化にも適用できる。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、提案法の有効性を確認する。

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述べる。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。産業機器などで比較的高速な速度制御を行う用途では、不安定動作領域を瞬間的に乗り越えることができる。しかし、電気自動車や鉄道車両などの移動体は比較的に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できれば、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する。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。単に制御系の入出力関係を解析するだけでは制御系内部で生じる現象を把握することは難しいため、制御系をいくつかのブロックに分割して解析することが考えられる。本研究では、回生時の誘導電動機ベクトル制御系の周波数応答を解析し、不安定現象のメカニズムを明らかにする。誘導電動機の1次側、2次側回路を切り分けた解析により、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する。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す。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する。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す。慣性負荷付き誘導電動機を用いた実験により、不安定現象と安定化手法の検証を行う。

第5章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べる。本研究により、誘導電動機の慣性負荷駆動時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への寄与が期待される。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名：長瀧 仁貴

印

(2022年 11月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
査読付き論文	<p>○ <u>Masaki Nagataki</u>, Keiichiro Kondo, Osamu Yamazaki, Kazuaki Yuki, Yosuke Nakazawa, "Online Auto-Tuning Method in Field-Orientation-Controlled Induction Motor Driving Inertial Load", IEEE Open Journal of Industry Applications, Vol. 3, pp. 125-140, Jul. 2022.</p> <p>○ 長瀧仁貴, 近藤圭一郎, 山崎修, 結城和明, 中沢洋介:「鉄道車両駆動用途の誘導電動機ベクトル制御系のオートチューニング」, 電気学会論文誌D, Vol. 141, No. 3, pp. 249-257, 2021年3月</p>
査読付き 国際学会	<p>○ <u>Masaki Nagataki</u>, Keiichiro Kondo, Osamu Yamazaki, Kazuaki Yuki, Yosuke Nakazawa, "Regenerating-Mode Stabilization of Indirect-Field-Orientation-Controlled Induction Motor for Inertial Load Drive", 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Expo, WEB, Oct. 2021.</p> <p>○ <u>Masaki Nagataki</u>, Keiichiro Kondo, Osamu Yamazaki, Kazuaki Yuki, Yosuke Nakazawa, "Auto Tuning Method to identify motor stator and rotor parameter in Field-Orientation-Controlled Induction Motor", 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Expo, WEB, Oct. 2020.</p>
国内学会	<p>長瀧仁貴, 近藤圭一郎, 山崎修, 結城和明, 中沢洋介:「鉄道車両駆動用途誘導電動機ベクトル制御系の磁気飽和特性のオートチューニング」, 令和4年電気学会産業応用部門大会, 東京, 2022年8月</p> <p>長瀧仁貴, 近藤圭一郎, 山崎修, 結城和明, 中沢洋介:「慣性負荷駆動時の1次抵抗値変動を考慮した誘導電動機ベクトル制御系のオートチューニング」, 電気学会産業応用部門モータドライブ/家電・民生合同研究会, 東京, 2020年3月</p> <p>長瀧仁貴, 近藤圭一郎, 山崎修, 結城和明, 中沢洋介:「鉄道車両駆動用途の誘導電動機ベクトル制御のオートチューニング-制御パラメータ調整則の検討-」, 第26回鉄道技術連合シンポジウム, 東京, 2019年12月</p>
その他	<p>(査読付き論文)</p> <p>Erina Izumi, <u>Masaki Nagataki</u>, Keiichiro Kondo, Shunsuke Tobayashi, and Suzuki Hiromitsu, "Evaluation of Start-Up Performance of Induction Motor Speed Sensorless Vector Control Using Adaptive Flux Observer Considering Inverter Voltage Error", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 12, No. 3, May. 2022. (掲載決定)</p> <p>Masahito Aihara, <u>Masaki Nagataki</u>, Keiichiro Kondo, Osamu Yamazaki, "Design Method of the Wheel Slip Speed Feedback Controller and Phase Lead Compensator in Locomotives", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 11, No. 5, pp. 686-695, Sept. 2022.</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名：長瀧 仁貴

印

(2022年 11月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	Naoki Kawamura, Keiichiro Kondo, <u>Masaki Nagataki</u> , "A Method to Design the Controller for Single Pulse Mode Torque Feedback Control System of IPMSM", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 11, No. 4, pp. 582-593, Jul. 2022.
	(査読付き国際学会)
	Erina Izumi, <u>Masaki Nagataki</u> , Keiichiro Kondo, Shunsuke Tobayashi, Hiromitsu Suzuki, "Improvement of Start-Up Performance at the Standstill Condition of Induction Motor Speed Sensorless Vector Using Adaptive Flux Observer", International Power Electronics Conference 2022, Hyogo, May 2022.
	Masahito Aihara, <u>Masaki Nagataki</u> , Keiichiro Kondo, Osamu Yamazaki, "Evaluation of the Wheel Slip Speed Feedback Control Performance with the Reference Speed Acquisition", The 9th International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems, WEB, Nov. 2021.
	Masahito Aihara, <u>Masaki Nagataki</u> , Keiichiro Kondo, Yoshiki Sakurazawa, Osamu Yamazaki, "A Method to Determine the Gain of the Wheel Slip Speed Feedback Controller for Locomotive", The 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems, WEB, Nov. 2020.
	(国内学会)
	小櫃歩美, 泉英里奈, <u>長瀧仁貴</u> , 近藤圭一郎:「誘導電動機の誘起電圧方式速度センサレスベクトル制御系の速度推定ゲインの設計」, 電気学会産業応用部門半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, 鹿児島, 2022年9月
	佐川夏柚, <u>長瀧仁貴</u> , 近藤圭一郎:「交流電気車用PETの架線側変換回路におけるデバイス損失の簡易計算法」, 令和4年電気学会全国大会, WEB, 2022年3月
	河村尚輝, 近藤圭一郎, <u>長瀧仁貴</u> :「1パルスモード駆動時におけるIPMSMのトルク応答を考慮したトルクフィードバック制御系設計方法」, 令和3年電気学会産業応用部門大会, WEB, 2021年8月
	泉英里奈, <u>長瀧仁貴</u> , 近藤圭一郎, 戸林俊介:「誘導電動機の速度センサレスベクトル制御における極低速域の高トルク出力」, 電気学会産業応用部門モータドライブ/家電・民生一般合同研究会, WEB, 2021年3月
	明比大典, 近藤圭一郎, <u>長瀧仁貴</u> , 小暮浩史, 篠宮健志, 石川勝美:「鉄道駆動用電力変換回路から発生する特定周波数の放射性ノイズに関する一考察」, 電気学会産業応用部門半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, 大阪, 2020年1月