

## 学位論文の要旨

氏名	清武博文
学位論文題目	高周波信号重畳方式誘導電動機速度センサレスベクトル制御の速度検出法の改善に関する研究

本論文は、産業用可変速駆動ドライブに幅広く活用されている誘導電動機速度センサレスベクトル制御方式の問題点である、低回転速度での不正確な速度・トルク制御に対処する高周波信号重畳方式の速度検出法の改善を提案したものであり、一次電流に含まれる逆相成分電流からスロット高調波を抽出し速度を推定する方法の工夫や、ルックアップテーブルを用いずにハイパスフィルタを使って飽和高調波を除去する方法について検討した。また、回転子のスキューの有無におけるインダクタンス変化の計算・実測も行い、スロット漏れインダクタンスの変化を利用した速度検出方法も検討した。以上、本論文での提案方式が誘導電動機速度センサレスベクトル制御の高性能化への一つの方式となり得ることを示したものである。

第1章は、本研究の背景及び、本論文の概要について述べている。

第2章は、高調波重畳方式の重要な要素であるインダクタンスの変化について、スキューあり回転子とスキューなし回転子の固定子歯と回転子歯の重なる面積の計算ならびに実際のインダクタンスの測定を行ない、比較検討した。結果より、スキューなし回転子の方がスキューあり回転子に比べてインダクタンスの変化が大きく、スロット高調波の検出が容易であることが分かった。

第3章は、標準のPWMパターンに短時間の大きさが同じで向きは反対の電圧ベクトルを印加し、固定子電流に含まれるスロット漏れインダクタンスを検出する方法について

検討した。電圧ベクトル重畳時の一次電流の微分値にスロット漏れインダクタンスの変化が含まれることを示し、実験ならびに解析結果から一次電流の微分値を角度として捉えることで速度推定が可能であることを示した。

第4章は、一次電流に含まれる逆相成分電流からスロット高調波を抽出して速度を推定する逆相成分電流検出法において、ハイパスフィルタを用いた飽和高調波の除去、ならびにスロット高調波をパルス化してカウントすることで速度推定を行なう方式について検討した。速度推定の課程を実測波形から明らかにし、速度センサ付きベクトル制御での実験におけるエンコーダ出力とスロット高調波をパルス化した波形との比較検討から、回転数に対するスロット高調波の正確性を検証した。また、スロット高調波の周波数成分を実測と解析から明らかにし、低速での正確なセンサレス運転が可能であることを実験結果から示した。

第5章は、本研究で得られた結果について総括した。

## 論文審査の要旨

報告番号	理工研 第265号	氏名	清武 博文
審査委員	主査	篠原 勝次	
	副査	柚木 謙一	田中 哲郎

## 学位論文題目

高周波信号重畳方式誘導電動機速度センサレスベクトル制御の速度検出法の改善に関する研究  
(Improvement of Rotor Speed Detection Method for Vector Control of  
Induction Motors without Speed Sensor by High Frequency Signal Injection)

## 審査要旨

提出された学位論文及び論文目録等を基に学位論文審査を実施した。本論文は、誘導電動機速度センサレスベクトル制御の低速度領域における制御性能の劣化を解決する高周波信号重畳方式において、スロット高調波を利用した速度検出法を提案し、これを実験により検証してまとめたものであり、全文5章より構成されている。

第1章は緒論であり、誘導電動機の歴史から高周波信号重畳方式誘導電動機速度センサレスベクトル制御までの研究背景について述べている。

第2章では、高周波信号重畳方式の基本原理解である固定子インダクタンスの変化について検討している。高周波信号重畳方式は回転子鉄心と回転子スロットの透磁率の違いから生じる磁束の変化を利用している。この磁束の変化は、インダクタンスの変化と考えることができる。そこで、スキューあり回転子とスキューなし回転子について固定子歯と回転子歯の重なる面積の計算ならびに実際のインダクタンスの測定から検討を行った。その結果、スキューなし回転子のインダクタンスの変化はスキューあり回転子の約6倍であることがわかった。

第3章では、第2章の結果より、標準のPWMパターンに電圧ベクトルを重畳する方式について、固定子電流に含まれるスロット漏れインダクタンスを検出する方法を述べたものである。筆者等の方法はロゴスキューコイルや高周波信号の重畳を必要とせず、PWMパターンの簡単な修正でスロット漏れインダクタンスを捉えられる点に利点がある。また、一次電流の微分値を電圧ベクトル重畳時の一次電流の変化する角度で検出するこの方法の有効性について検討している。

第4章では、第2章の結果より、インバータ電圧指令値に高周波信号を重畳し一次電流に含まれる逆相成分電流からスロット高調波を抽出して速度を推定する逆相成分電流検出法について検討し、スロット高調波をパルス化しカウントすることで速度を推定する方式ならびにハイパスフィルタを用いた飽和高調波の除去法について述べている。その結果、ルックアップテーブルを使わずに簡単な回路構成で飽和高調波を除去でき、かつ、PLLや $\tan^{-1}$ 関数を用いずに15[rpm]の低速運転でも実回転速度と一致した速度推定値が得られ、無負荷および全負荷における速度センサレスベクトル制御運転を確認した。

第5章は本研究の結論であり、その成果が総括されている。

以上本論文は、高周波信号重畳方式誘導電動機速度センサレスベクトル制御の速度検出法の改善に関する研究において、実験検討を行い、本提案手法が誘導電動機速度センサレスベクトル制御について極めて有効であることを実証した。

よって、審査委員会は博士（工学）の学位論文として合格と判定する。

## 最終試験結果の要旨

報告番号	理工研 第265号	氏名	清武 博文
審査委員	主査	篠原 勝次	
	副査	柚木 謙一	田中 哲郎

平成19年3月29日(木) 13時30分から約1時間30分にわたる博士論文発表会において、審査委員3名及び聴講者18名に対し、申請者は研究背景及び成果など論文内容について説明し、これに関する質疑応答が行われた。質疑応答の主要なものは以下の通りであった。

質問1：図2.2について、スキューなしの回転子では低速時にトルクリプルが大きくなるがそのあたりをどう考えているのか？

回答1：原理の確認のため、今回はスロット高調波の大きいスキューなし回転子を使ったが、将来的にはスキューあり回転子で本方式を実現する方向だろう。図2.2より、スロット高調波の大きさはスキューありだと1/6ぐらいなので小さな信号を如何に処理するかが肝心だ。

質問2：図4.1について、高調波信号はPWM化の前で加えているのか、後で加えているのか？

回答2：PWM化の前で加えている。スイッチング周波数は10kHzで行なっている。

質問3：図4.4について、高周波重畳方式は数学モデルに依存せずに電動機パラメータの変動の影響を受けないが、例えば $i_{ghs}$ の波形は時間が経っても変わらないのか？

回答3：変わらない。

質問4：論文の構成について、2章で高周波信号重畳方式の基本原理に触れているが、3章と4章のつながりはどうなっているのか？3章の結果を使って4章を構成しているのか？

回答4：3章と4章は高周波信号重畳を使った別々の方式を提案したものであり、構成は独立である。

質問5：図2.2について、上側は面積のグラフ、下側はインダクタンスのグラフだが、数的な関係は？

回答5：面積の平均値はインダクタンスの平均値と対応しており、面積の平均値からの変化の割合はインダクタンスの平均値からの変化の割合と対応している。従って、スキューなし回転子の場合、スキューあり回転子の2倍の変化が表れ、変化の割合の大きさは約6倍であることが分かった。

質問6：図2.2について、横軸の角度は $0^\circ$  から $180^\circ$  まで測っているが、実際に電動機を回転させて測定しているのか？

回答6：固定子と回転子の位置関係は原点を決めて、分度器の拡大コピーを固定子に貼り付け、回転子の軸に針金を巻き付けて角度を確認しながら手で回転させた。

質問7：図4.5について、 $\omega_r$ の脈動は速度制御部の比例ゲイン $K_q$ と積分時間 $\tau_q$ を調整すれば取り除かれるのか？

回答7：速度制御部の制御パラメータは一度も変更していないので、高速回転数用の設定のまま使用している。従って制御パラメータの調整で脈動は取り除かれると考える。

質問8：LPF2とHPFのカットオフ周波数は近いが何次のフィルタを使っているのか？不要な成分の除去は十分なのか？

回答8：フィルタは全て2次を使用している。確かに回転速度が上がってくると両フィルタ間の帯域が狭くなるが、元々LPF2は2kHzの正相成分電流除去用なのでLPF2のカットオフ周波数を高く取ること回避できると考える。

質問9：図4.8, 4.9について、速度制御精度のデータは実際の実験で測定したのか？

回答9：オシロスコープのmaxとminを設定して長時間測定することでデータ取りを行なった。

上記のように、質疑に対し明瞭で的確な回答が得られた。3名の審査委員は本人が大学院博士後期課程の修了者としての学力ならびに見識を有するものと判断し、博士(工学)の学位を与えるに足る資格を持つと認めた。