

誘導電動機 V/f 制御系の高性能化に関する研究

長崎大学大学院生産科学研究科
趙 曉丹

パワーエレクトロニクスすなわち電力用半導体素子を用いて電力の変換と制御を行う技術の応用によって、電動機駆動に技術革新をもたらしている。また、コンピュータによる情報処理技術を電動機駆動システムに応用することによって、システムの制御は高度に発展している。

誘導電動機は構造が丈夫で安価であり、電車、ポンプ、ファンをはじめ各種産業用として広く用いられ、インバータを用いた可変速運転を行って省エネルギーを図っている。誘導電動機の可変速駆動を行うには、いろいろな制御方式がある。この中で、ベクトル制御は磁束の方向に基づいて電流を制御し、瞬時にトルクを制御しようとする方法で、優れた特性を有するが、速度センサを必要とする。そこで速度センサを省き誘導電動機の状態方程式から速度を推定する速度センサレスベクトル制御が研究されている。しかし、この方法を用いる誘導電動機駆動システムは一般的に、オブザーバゲイン、PI 速度推定、PI 電流制御、PI 速度制御など制御パラメータを多く調整する必要があり、構成が複雑である。これに対し V/f 一定制御は、端子電圧と周波数の比を一定に保つ極めて簡単な制御方式であるが、精密な速度制御を行うことができず、また低速領域での運転が困難である。これまで V/f 一定制御の改善策として、低周波領域で一次抵抗による電圧降下の影響によりエアギャップ磁束が小さくなるので、電圧降下分を補正するため予め一定のパターンのブースト電圧を加えて補償することが行われている。しかし、一次電流によって電圧降下が変化するため、エアギャップ磁束を一定に保つことは困難である。そこでオートブースト電圧補償も行われているが、安定性に注意が必要と考える。

本研究は誘導電動機の V/f 一定制御の特性を改善し、低速から高速まで精密な速度制御を行い、速度センサレスベクトル制御に近い性能を実現することを目的としている。提案法は、ベクトル制御理論を応用し二次磁束を所定の値に保つ方式で、誘導機の等価回路から自然に構成され、制御パラメータが少なくかつ調整が容易である。提案した方法では一次インピーダンスにおける電圧降下分を補正するため、自動的にブースト電圧を演算して加えることで補償を行い、さらにすべり周波数を推定して負荷トルク分を補償することで、速度制御特性の改善を行う。さらにこれらの研究を踏まえて、制御方法をより単純化した新たな V/f 制御法の提案を行い、制御系の定常解析、線形モデルによる安定解析および実験より提案方式の有効性を検証している。

本論文は、第1章から第5章まで構成され、以下に各章の概要を示す。

第1章では、研究背景や本論文の内容について述べている。

第2章では高性能 V/f 制御法を述べている。まず、誘導電動機の二軸理論による数学的な表現の仕方について述べている。次に誘導電動機の T-I 型定常等価回路から、二次磁束を一定に保つためのブースト電圧とすべり周波数を求め、高性能 V/f 制御法を提案する。この制御系について誘導電動機及び制御系の解析モデルを導出する。このモデルは非線形微分方程式として表示されるが、微分を 0 とおくことで定まる定常解からの変動を考えた微小変位理論により線形モデルを導出する。さらに誘導電動機のすべり周波数と回転速度に関する 4 象限の運転領域を考え、端子電圧を一定とした場合の滑り周波数に対する二次誘導起電力、一次電流などのベクトル軌跡を導出し、それらの結果を示している。特に低速回生領域の運転においては、一次抵抗による電圧降下が大きくなって端子電圧に対し二次誘導起電力の位相が 90 度以上進むことから運転限界があることを定量的に明らかにした。

第3章では、まず実験システムの構成、ソフトウェアの使用法や制御プログラムの構成、インバータにおける出力電圧誤差補償の方法について述べている。次に、提案方式と従来の V/f 一定制御方式を理論解析と実験により比較検討した。定常特性について従来方式は負荷トルクが増加すると速度誤差が大きくなるが、提案方式は負荷に関係なくほぼ指令値通りの速度で運転できた。また従来方式では停止した低速運転でも提案方式は運転が可能であった。また過渡応答のシミュレーションにより線形モデルと非線形モデルを比較して、線形モデルの妥当性を立証している。線形モデルの系行列の固有値の実部が全て負であれば系は安定であり、根軌跡により安定性改善に必要な一次ローパスフィルタの時定数を設計した。また速度指令に対するステップ応答の実験結果により各種運転状態での安定性を確認した。さらに温度により一次抵抗が変化するが、その同定法を提案した。以上の理論と実験で提案方式は従来方式に比べて大幅に速度特性が改善できることを実証した。

第4章では高性能 V/f 制御の簡易方式を提案している。誘導電動機の d - q 回転座標系で d 軸磁束を一定、 q 軸磁束を 0 とし、ベクトル制御が行われる。この関係式を用いて直接一次電圧を演算して電動機に加え、すべり角周波数の補償を行って速度誤差をなくす方式である。このとき系の安定化のために、 q 軸電流はローパスフィルタを通して利用する必要がある。この解析を行うため制御系の非線形微分方程式と線形モデルを導出した。いずれも遮断角周波数を高く選んで q 軸電流の補償を行うと系は不安定となることが判明した。さらに一次抵抗変動については、 d 軸磁束を利用して、その同定法を提案した。更に、実機で実験を行い、種々の遮断角周波数に対する実験結果はシミュレーション結果とほぼ一致し、理論を実証した。以上により提案方式の有効性を示した。

第5章で本論文における結論を述べている。