

## 交流電動機駆動用電流形GTOインバータに関する研究

## 学位論文内容の要旨

近年、産業システム、電車、エレベータなどの輸送システムのアクチュエータとしての交流電動機可変速駆動システムの適用が活発化している。各種プラントで生産される製品の高品質化、歩留り向上や、省エネルギー、高速輸送といったニーズによりその応用分野はパワーエレクトロニクス技術の進歩とともに益々拡大してきている。特に、誘導電動機はその構造上の堅牢さと保守の容易さから、幅広く使用されている。このように交流電動機可変速駆動システムが発展した技術的背景としては、大容量半導体スイッチング素子の開発、制御技術およびマイクロエレクトロニクス技術の進歩が挙げられる。しかしながら、その現状を見ると、スイッチング周波数が高々2~3kHz程度というパルス幅変調(PWM: Pulse Width Modulation)制御の電圧形インバータでは、入力および出力の電圧、電流に多くの高調波成分が含まれており、このため、駆動される電動機の損失や騒音が大きくなり、更には低い周波数のトルク脈動が発生するという問題があった。これらの問題を解決するためには出力電圧、電流波形に含まれる高調波成分を大幅に低減し、究極的には波形を正弦波にすることが理想であり、簡単な回路構成で出力電圧、電流波形をとともにほぼ正弦波化できるインバータの出現が強く望まれていた。

本研究は、現状のこういった可変周波インバータの問題に関して電圧、電流をとともにほぼ正弦波にできる電流形GTOインバータシステムを提案し、その回路方式、制御方式およびこの解析手法を提示している。

はじめに、誘導電動機駆動用として一般に使用される2種類のタイプのインバータの特徴を比較する。インバータ方式としては、電源の性質として、電圧源特性を有する電圧形インバータと電流源特性を有する電流形インバータに大別できる。前者の電圧形インバータについては、使用する半導体スイッチング素子としては早くからサイリスタに代わってGTOに代表される自己消弧素子が適用されている。一方、電流形インバータでは、単に自己消弧素子に置き換えるだけでは負荷の無効電力処理上、その回路上のメリットが少ないとされていた。このような中で、出力端にコンデンサを接続した簡単な回路構成で転流時の無効電力処理が可能となり、自己消弧素子を適用するメリットを活かせる電流形インバータを提案している。サイリスタをGTOへ置換する際の回路上の変更点について、無効電力処理という観点から詳細に検討し、自己消弧素子適用のメリットを明らかにしている。

次に、PWM制御適用により電圧形インバータ方式を凌ぐ出力特性が得られることを示している。このためにまず、インバータの出力電圧、電流に含まれる高調波解析法としてフーリエ級数を利用した算出方法について述べ、得られた高調波解析結果を利用して電動機特性解析を行っている。基本波と高調波成分ごとに、しかも各成分を電流源入力とする誘導電動機の等価回路を導いている。さらに、各成分の等価回路から誘導電動機特性算定式を導き、得られた特性結果を合成しての最終的な電動機の駆動特性としている。この際に、電動機の二次抵抗および二次漏れインダクタンスが、回転子である二次導体の表皮効

果の影響を受け、周波数に依存して大きく変化するため、この点を考慮する方法についても述べ、解析の精度を向上させている。

次に、誘導電動機の端子電圧および入力電流の瞬時波形を解析的に求める手法について述べている。高調波成分に分解したインバータのPWM制御電流を入力とし、各成分ごと等価回路を利用して誘導電動機の端子電圧および電流の振幅と位相を算出する。各成分ごとに計算した瞬時値を時間軸を共通にして重ね合わせていくことで、合成した瞬時電圧、電流波形を求めることができることを示している。

次に、15 kV A G T Oインバータで11 kW供試誘導電動機を駆動するシステムを実際に製作し、各種条件下での高調波分析と電動機駆動特性評価を実施している。まず、出力電圧、電流波形については、計算により求めた波形と実測波形が非常によく一致することを確認している。電動機の負荷状態を変えた場合、インバータ出力周波数を変えた場合にも、インバータ出力電圧電流とともに正弦波に近い波形にできることを明らかにしている。高調波分析の結果、電圧、電流ともにひずみ率で10%以下に抑制できることを確認している。また、電動機駆動特性としても解析結果とほぼ一致するとともに商用電源駆動時に近い良好な特性が得られることを示している。

以上のようにして、解析手法が妥当であることが示され、インバータの出力特性が良好であることを明らかにしている。

次に、応用先として一層の大容量化も必要であることから、2台の電流形G T Oインバータを多重化するための回路方式およびP W M制御方式についても新たに提案している。1台のコンバータから、直流端子を相間リアクトルで結合した2台のユニットインバータへ直流電力を供給し、直結した2台のインバータの出力端子から誘導電動機へ交流電力を供給する、主回路構成を非常に簡単化できる構成を提案している。また、2台のインバータ間で、パルス幅変調の期間が180度と120度となる2通りのP W Mパルスパターンをインバータ動作の1周期ごとに入れ替えるP W M制御法を提案している。この手法により、インバータ容量を2倍にでき、しかも等価スイッチング周波数を2倍にできるため高調波をさらに低減できること、さらには、相間リアクトルに印加される電圧の直流成分を零にでき、これにより、相間リアクトルの小形化できることを示している。また、このP W M制御法では、各単位インバータ間の電流バランスを良好に保つことができることも確認している。

次に、2.5 k V Aのインバータで1.5 kW誘導電動機を駆動するシステムを実際に製作し、理論通りの動作および波形であることを確認している。また、P W M制御を適用した場合と適用しない120度通流方式、インバータ1台の場合と2台多重の場合について含まれる高調波成分を解析により比較している。多重方式では第5次、第7次という低次高調波を大幅に低減でき、P W M制御を適用することでさらに高調波を減らせることを明らかにしている。また、G T Oが同じスイッチング周波数でもインバータ1台の場合と比較し、多重化により高次高調波成分をほぼ2倍の周波数に高くでき、多重化により許容スイッチング周波数が比較的低いG T Oを使用した場合でも十分に高調波低減が可能であり、大容量化に適した回路であることを示している。インバータ出力周波数、電動機負荷トルク、G T Oスイッチング周波数、出力端コンデンサ容量を変えて出力電圧、電流のひずみ率を評価した結果、G T Oのスイッチング周波数としては1.2 k H z程度で、ひずみ率として電圧10%、電流5%という非常に良好な結果が得られることを確認している。

以上で述べたように、正弦波出力電流形G T Oインバータは低高調波という特長を有することが明らかとなった。また、大容量化のための多重化についてもその方式を確立することができた。今後、中容量から大容量に至るまで交流電動機可変速システムを適用した幅広い用途に応用されていくことが期待される。

# 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

## 学 位 論 文 題 名

### 交流電動機駆動用電流形GTOインバータに関する研究

近年、産業用制御システム、電車、エレベータなどの輸送システムのアクチュエータとしての交流電動機可変速駆動システムの適用が活発化している。各種プラントで生産される製品の高品質化、歩留り向上や、省エネルギー、高速輸送といったニーズによりその応用分野はパワーエレクトロニクス技術の進歩とともに益々拡大してきている。しかしながら、その現状を見ると、アクチュエータとしての交流電動機を駆動するためのインバータは高調波を多く含んだ電源であり、このため、電動機の損失やトルク脈動が大きくなるなど各応用分野のニーズを十分に満足する性能が得られているとは言えない。

本論文は、現状のこういった可変周波インバータの不十分な点を補い、さらに高性能なシステムを構築するための電力変換システムに関するものである。交流電動機にとって理想的な可変周波電源になりうる電力変換器とその制御方式を新たに提案した点、また電動機駆動特性としてどのような特性が得られるかを解析的に明確にした点、さらには応用先として一層の大容量システムへの適用を可能にする回路方式を提案した点など極めて興味深いものがある。

特に、インバータ方式については従来の電圧源タイプ（電圧形）のインバータに対して、電流源タイプ（電流形）のインバータを用い、従来のサイリスタに代わって自己消弧形素子を用いることで出力特性を良好にできる主回路方式およびPWM変調方式を提案している。さらに誘導電動機を駆動した場合の運転諸特性として商用電源駆動時と遜色ないことを詳細な解析により明らかにしている。また、実験によって解析の妥当性を証明し、具体的な制御回路構成についても検討しており、実用化上問題のないことを示している。さらに用途によっては大容量化も必要であることから、2台のインバータを多重化するための回路方式およびPWM制御方式についても提案し、実験によって誘導電動機の駆動特性として良好な駆動特性が得られることを実証している。

以上のことから、本論文は、交流電動機駆動用インバータを体系的に捉え、出力波形をほぼ正弦波にできる新たなインバータの主回路方式および制御方式を提案し、これに伴った解析手法を確立したと言える。

これを要するに、著者は、電力変換工学の一つの応用先である交流電動機駆動用インバータについて、高品質運転を実現するための新知見を得たものであり、電力変換工学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。