

大出力インバータシステムの開発

Development of Large Capacity Inverter System

高砂製作所 河島 裕*¹ 佐藤 達哉*²

杉本 志郎*²

MHIさがみハイテック株式会社 飯島 克彦*³

ターボ機械の高性能、高機能化に重要な技術として可変速制御がある。従来の変速方法は機械式であり大きな滑り損失を伴い制御能力にも不十分な点があるため改善が望まれていた。当社では、近年の半導体技術の進歩に伴い高電圧・大容量のGTOサイリスタが開発されたことにより、大型ターボ機械の可変速駆動に最適な小型で低価格の大容量インバータシステムの開発を実施した。当社の風力機械試験設備向けとして1500 kVA、108.3 Hzのインバータシステムを高速電動機と組合せ実負荷試験の上完成させ供用中である。

One of the important technologies to achieve a superior performance and / or functioning of a turbomachine is variable speed operation. The ordinary method of varying speed is mechanical with large slipping loss and sluggish control, so an improvement can be expected. We have carried out the development of a large capacity inverter system which features compact size and low cost making it most suitable for use as the driver of a large turbomachine, through the development of high voltage and capacity GTO thyristor. We manufactured the 1500 kVA, 108.3 Hz system with a high-speed motor for testing the compressor facility and confirmed the performance with full loaded testing.

1. ま え が き

パワーエレクトロニクス分野の技術及び製品は、近年目覚ましい進歩を遂げているが、当社においてもプロワ、ポンプ、ターボ冷凍機等の大型ターボ機械の可変速駆動による高性能・高機能化を目指し、高電圧・大電流のGTO (Gate Turn Off) サイリスタを用いた大容量インバータシステムの開発及び商品化を行っている。

大容量インバータの動向としては、参考文献(1)に示すように、GTOインバータが主流になりつつあり、その技術課題は、GTO素子の冷却や実装技術の改善による小型軽量化である。

本インバータシステムの開発では、当社の保有する機械及び電気関係の多方面の技術を構造、冷却方法、高電圧大電流回路及び制御装置の設計及び製作に集約させ小型、軽量、低価格化を行い、従来にない特長ある製品とした。

このたび、当社風力機械試験設備用として1500 kVA×108.3 Hzの出力にて、高速電動機と組合せ、高速で可変速の駆動装置として増速装置や蒸気タービンを使わないシステムの開発に取り組む、実負荷試験を行い計画どおりの性能を確認し完成させた。

本設備は、ブラジルのペトロプラス社向けコンプレッサの工場試験に供用し、客先検査会社の立会を無事終了し、関係者の好評を得た後継続工事に適用中である。

2. GTOインバータシステムの概要

本インバータシステムは、自己転流型であるGTOサイリスタ素子を用いた電圧型インバータであり、インバータ部でのPWM (Pulse Width Modulation) スイッチングにより交流電動機の可変速運動に必要な3相の可変周波数、可変電圧を同時に得ている。本インバータの主回路接続を図1に示す。

GTOサイリスタ素子は、ゲートの制御で、自己転流ができることにより電圧型インバータに適しており、同期電動機の逆起電圧などによる外部転流の必要な一般サイリスタ素子を用いた電流型インバータに比較し、表1に示すとおり、小型、低価格、軽量、高効率、高力率、高速制御応答等の多数の特長を有している。また、電圧と周波数を直接制御できることにより、構造が簡単で安価であり、かつ滑りによるトルク発生により制御特性が安定な誘導電動機の駆動が容易に実施できる。

図1及び図2に示すインバータモジュール1台当たりの出力は

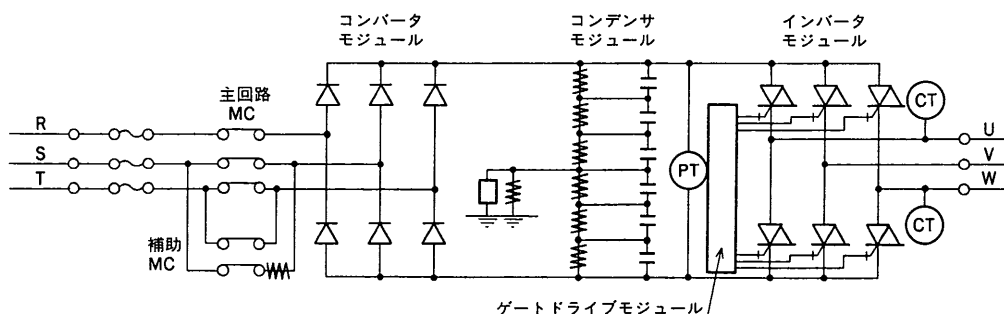


図1 GTOインバータ主回路図 GTOインバータの高電圧主回路の構成部品及び結線内容を示す。
Main circuit diagram of GTO inverter

*1 新製品新事業開発プロジェクト室主務

*2 水車・ポンプ部開発・メカロググループ

*3 システム技術部主管

表1 インバータの仕様及び特徴比較

Comparison for specifications and features of inverter

種別 項目	GTOサイリスタ	一般サイリスタ	GTOサイリスタ 方式の特長
形式	電圧型	電流型	高効率、高力率、 高速制御
コンバータ部	ダイオード整流	サイリスタ整流	小型、低価格、 低電源高周波
直流平滑	フィルタコンデンサ バンクユニット	直流リアクトル	小型、軽量、低価格
インバータ部	GTOサイリスタ 自己転流スイッチング	一般サイリスタ 外部転流スイッチング	PWM制御が可能
対応電動機	誘導機又は同期機	同期機	誘導機の駆動可、 万能型
電圧制御	インバータ部での PWM制御	コンバータ部での 位相制御	高速、高性能、 制御対応
周波数制御	同上	インバータ部での 全電圧スイッチング	

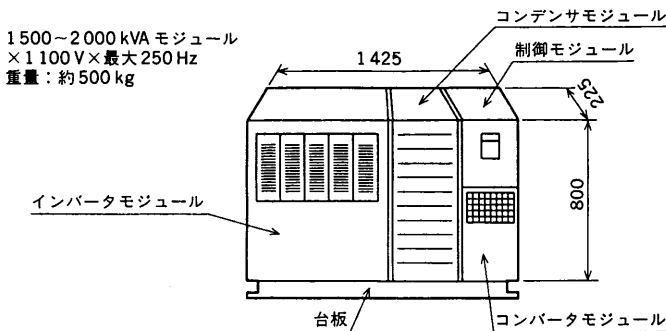


図2 GTOインバータ外観図(1モジュール時)
構成要素、外形寸法及び重量を示す。
Outline drawing of GTO inverter

最大2000 kVAであり、更に大容量が必要な場合は、トランスにより複数インバータモジュールの出力を合成したり、多相化を行い、最大18000 kVAまでを対応範囲としている。

トランスによる出力の合成及び多相化のほか、トランスを用いずにインバータモジュール2台分の出力を合成したり、高電圧出力化を行うため、3レベル型インバータの開発を進めている。さらに低スナバ容量のGTO素子によるインバータモジュールの高電圧、大容量化により、3レベル型インバータ1台で3300 V、4000 kVAまでの対応準備を進めている。

今回開発したGTOインバータは、外部転流を必要とせず、後述のとおり、インバータ自身の保護系を除き、マイクロプロセッサ主体のデジタル制御を実施したことにより、様々な用途に対し制御装置も含め、ハードウェアの変更を行わずに対応できるようにしている。

この事は、複数の制御プログラムの準備及び切替使用により、1台のインバータ装置を複数の用途に対し、切替使用できることを意味する。

例えば、船舶向けのインバータシステムにおいて、1台のインバータを主推進用、パウスラスタ用、カーゴポンプ駆動用の3通りに使うことにより、設備費の低減を提案している。

インバータは特化された用途を除き、ハードウェアの標準化及び大量生産による価格の低減が望めるものであり、今回開発のGTOインバータにより、大容量インバータの分野においても適用拡大の加速化に対し期待が持たれる。

本システムの開発により、当社から納入するターボ機械、駆動用電動機、電気設備及び制御装置と組合せての総合エンジニアリ

ングに基づく、計画、設計、製造、性能保証、アフタサービスの実施により、高品質のインバータ駆動ターボ機械システムが実現される。

3. GTOインバータ装置の開発

当社のGTOインバータの最大の特長は以下に詳細を述べるインバータ装置の部品構成及び冷却方法にあり、図2に示すように従来他社の1/2以下の装置の小型化、軽量化、低価格化を各々に実現させている。

インバータ本体の部品構成は、個々に標準化を実施したモジュールの組合せ構造を採用しており、インバータモジュール、コンバータモジュール(整流器)、コンデンサモジュール、制御モジュールにより構成される。

各モジュールは分離した状態で、組立、検査が実施されモジュール間の結合及び最終組立後総合試験を実施して完成される。モジュール化構造を採用することにより、全体をまとめて収納する盤を用いずにインバータが構成でき、小型化及び低価格化を図っている。

また、最終組立及び総合試験を除き、モジュール単位の個別の製作及び保守が可能なことにより、製造の合理化及び保守や点検の容易化が図れた。

本インバータの冷却方法は、従来のインバータがスイッチング素子のみを浸漬沸騰又はヒートパイプにより冷却していることに対し、本開発品では図3に示すように発熱の大きいスナバ抵抗、スナバダイオード、ゲートドライブモジュール、スナバコンデンサを共に一括して無公害冷媒($n-C_6F_{14}$)を用いた沸騰冷却タンクに組込んでいる。

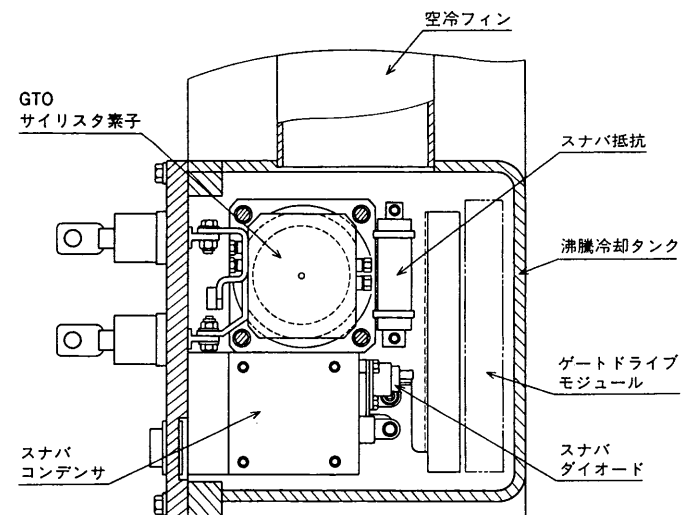


図3 インバータタンク縦断面図 インバータモジュールの沸騰冷却タンク内の部品配置を示す。
Cross sectional drawing of inverter module tank

周辺回路及び部品を沸騰冷却タンクに組込むことにより効率の良い沸騰冷却が可能となり、従来インバータと比較し、大幅な冷却機構の簡略化、スナバ抵抗やゲートドライブモジュール上の抵抗器、トランス等の部品サイズの小型化が実現できた。

さらに、上記に示す主回路周りの部品がすべて沸騰冷却タンク内で隣接配置され、また無公害冷媒は物性的に空気に比較し高絶縁のため、配線の距離や間隔を最短にできたことにより、過渡的に発生する過大電圧の抑制や回路の安定動作が達成できた。

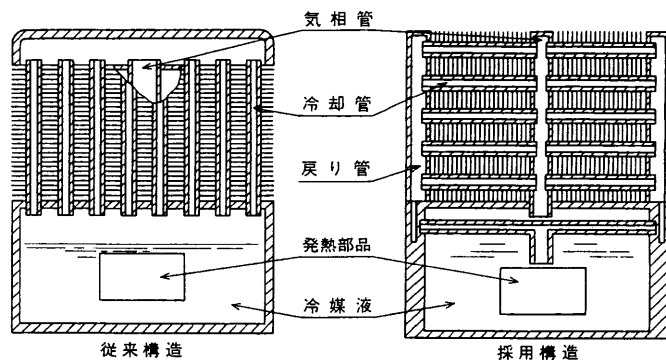


図4 沸騰冷却用凝縮器比較図 インバータモジュールの冷却タンク上部に設置の凝縮部の構造比較を示す。
Comparison drawing of condenser

沸騰冷却タンクの外部への熱回収は、タンク上部に設けた凝縮器の冷却フィンファン冷却することにより実施している。図4に今回採用の凝縮器と従来のものととの構造比較を示す。冷却時にGTO素子や付属回路部品の冷却により気化した冷媒が凝縮器に取付けられた冷却管内で凝縮し液体となった後、凝縮のため送られてくる気化冷媒の流れと干渉した場合、冷却能力の低下を生ずる。これに対し冷却管へ気化冷媒を送るための気相管を設け、冷却管を横方向に配置し、凝縮後の冷媒が気化冷媒層を通らず直接冷媒中へ戻すことにより、従来構造に比較し、限られた配置スペースでも高い冷却能力が得られるようにしている。

また、冷却管の出入口が冷却タンクの中央部で沸騰冷却タンクの傾きによる冷媒液面変動の影響を受けにくい構造としていることにより、車両や船舶のような移動体への積載に適した構造となっている。以上により、インバータモジュール全体について、従来のインバータに比較し大幅な小型化が達成できた。

GTOサイリスタ素子は、インバータを構成する素子の数や配線を極力少なくするため電圧型インバータで必要なフリーホイーリングダイオードと一体化された逆導通型を採用した。

素子の仕様は、大容量化のため4500V、3000Aのものを選定した。

逆導通型素子の採用によりインバータモジュールの沸騰冷却タンク1台に対し、3相出力用6個と再生制動抵抗用1個の合計7個のスイッチング素子が収納でき、タンクの台数減によるインバータ全体の大幅な小型化を達成した。

GTOサイリスタ素子のOff動作時に発生する過電圧やその変化を抑制するため設置のスナバコンデンサは、外形寸法の小型化、リード線インダクタンスの最小化のため従来使用されてきた大型のオイルコンデンサに代えてポリプロピレンフィルムコンデンサを採用し、無公害冷媒の侵入に対しても耐圧や保持容量の点で劣

化がなく問題ないことを試験で事前確認している。

GTOサイリスタ素子のゲート駆動回路は、小型化及び消費電力最小化のため、On及びOffのスイッチング及び保持動作回路を分離し、それぞれの状況に応じた最適制御を実施している。

GTOサイリスタ素子のOn及びOff動作エネルギー供給を行うスイッチング用コンデンサもスナバコンデンサと同様の理由でフィルムコンデンサを採用している。

スイッチングコンデンサへのエネルギー供給を含むゲート駆動回路の電源は高電圧域での使用であり、電力も比較的大きいことから、高周波のパルス電源をトランスにてアイソレーションの上供給するようにしている。

本インバータの制御装置は、制御モジュール内に収納されており、他モジュール間の接続は、背面の多極コネクタ及び端子台で実施している。

本インバータの制御ブロックを図5に示す。

制御モジュールは、マイクロプロセッサ部とハードロジック部の二つに大きく分かれる。マイクロプロセッサ部はプロセス制御、インバータ制御、回転数・位相検出回路及びスイッチング信号発生回路に分かれ、マイクロプロセッサを中心とし、その周辺IC及び入出力信号処理ICを組合せ標準化したハードウェアにインバータの使用目的ごとに必要なソフトウェアを組み込み、所定の性能、機能を得るようにしている。

ハードロジック部は、スイッチング信号に対する制約条件の賦与回路及び過電圧・過電流に対する保護を実施している。GTO素子に対する保護は、いかなる場合も高速で確実な動作が要求されるため、ソフトウェアの介在を避け、ハードウェアのみによる回路を採用している。

保護系の動作情報は発生順にメモリに記憶され、後で読み出し確認することにより、異常発生の原因究明及び確実な対策実施に役立つようにしている。

スイッチング信号に対する制約条件賦与回路は、GTOサイリスタ素子のOn、Off動作の最小継続時間及びスイッチングコンデンサの充電時間の確保や、正極側及び負極側素子の同時Onによる短絡防止のためのデッドタイム設定を行う。

基本的には、スイッチング信号発生回路から出力される時点で上記制約条件を満足させた上で制御のこととしているが、保護系作動時に上記制約条件を確実に守った上で、スイッチング信号に必要な保護動作を組込むようにしている。

当社の風力機械試験設備向けに製作したインバータ装置の外観を図6に示す。

インバータ装置は、2台のインバータ本体により構成され、下部に主回路用断路器及び補助制御回路を収納している。

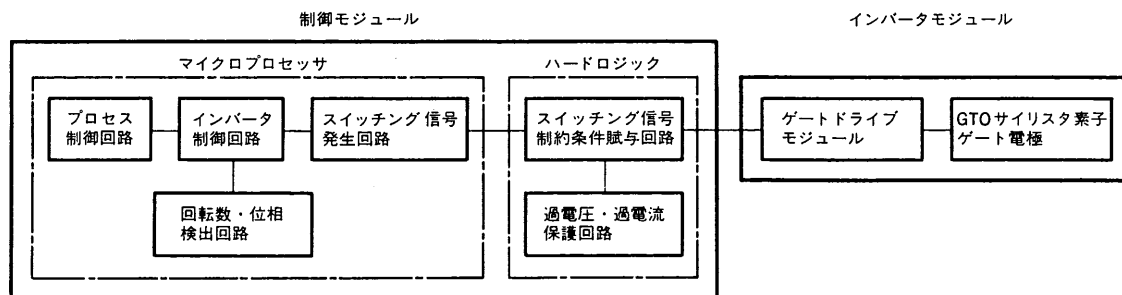


図5 制御ブロック図 制御装置の回路構成ブロックを示す。
Block diagram of controller



図6 風力機械試験設備向け GTO インバータ外観 風力機械試験設備向け 2 モジュール構成の GTO インバータ外観写真。
GTO inverter for compressor testing facility

4. 実負荷検証試験

開発した GTO インバータシステムは、高速電動機と組合せ実負荷試験を実施の上完成させた。

負荷となった高速電動機の仕様は表 2 のとおりであり、2 台のインバータ本体出力は電動機に二重 3 相方式を採用し、電動機内部で各組の位相を 30° ずらした 2 巻線方式により合成を行っている。

実負荷検証は、負荷用の発電機が低速仕様のため高速電動機の出力軸に減速装置を設置の上実施した。

高速電動機の出力 330 kW 及び 1 200 kW 時のインバータの出力電流波形を図 7 に示す。

今回のインバータの可変周波数制御は高調波の発生や相間電流アンバランスの少ない同期制御方式を採用しており 2 940 rpm 時は出力周波数がキャリア周波数の $1/5$ となり、6 500 rpm 時はキャリア周波数と出力周波数が同じになる制御としている。

インバータの出力電圧は、キャリア周波数と出力周波数が同じになり、一定電圧出力となる 83.3 Hz まではインバータ部での PWM 制御により可変制御を行っている。

インバータ効率は 1 200 kW 出力時 98 % であり、高速電動機各部の温度上昇も計画値内であり、高調波の影響も少なく良好であった。

5. ま と め

インバータは、100 kW 以下の小出力機分野では既にその採用が急拡大しているが、大出力機分野では、高価格及び電機側と機械側システムの担当部署が異なることによる総合エンジニアリング不足により普及が遅れていた。

今回の機械本体及びプラント取りまとめメーカーである当社自身

表 2 高速電動機の仕様

Specification of high speed electric motor

形 式	かご形誘導機	極 数	2 極
出 力	1 200 kW	最高回転数	6 500 rpm

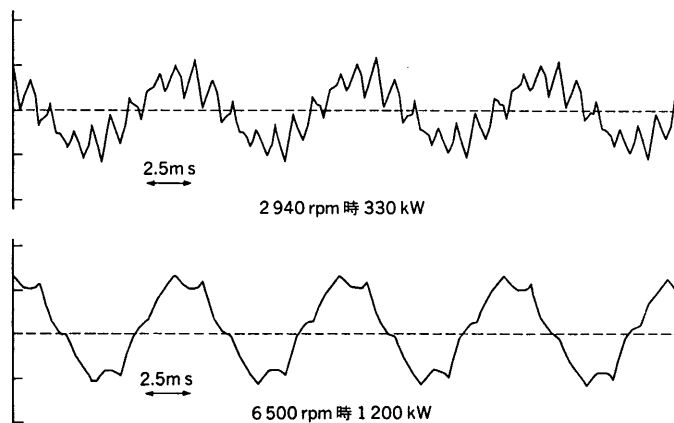


図7 インバータ出力電流波形 風力機械試験設備用 GTO インバータ
負荷試験時の電流波形を示す。

Electric current diagram of inverter for full load test

の手による GTO インバータ本体及びシステムの開発により、当社にて製作の多数の機械製品の高性能、高機能化が実現可能となる。インバータの特長は、低損失、高効率の可変速駆動システムが構築できるだけでなく、高い制御精度、応答性、安定性が得られるほか、制動制御や逆転運転が容易に可能となることにより、プロワ等のターボ機械の可変速駆動用のほか、ガスタービン始動装置、船舶用推進・荷役システム、大型クレーン等への採用が検討されている。このほか当社工場設備として大容量の試験用周波数変換及び低周波電源装置や大容量バランサ等への採用も計画途上にあり、その適用範囲は急速な広がりを見せている。

今回の大出力インバータシステムの開発により、従来高性能、高機能化から取残されていた大型機械やプラントシステム分野においてもインバータの導入が進むものと考えられる。

さらに、機械メーカーによる大容量インバータ事業分野への本格的な取組により、従来商用周波数電源による一定速運転の前提が崩れ、インバータの採用を前提とした任意回転数でかつ可変速運転を前提としたターボ機械や高性能制御を十分に生かしたプラントシステムの開発及び設計が実施され、従来にない高性能、高機能、低価格の製品が生み出されることが期待される。

インバータを用いた様々なシステムは、エネルギー損失の最小化や有効活用により地球環境の保全に役立ち、社会に貢献するものと確信する。

参 考 文 献

- (1) 神山健三, AC ドライブの現状と将来展望, 省エネルギー Vol.45 No.9 (1993) p.18