

電源回生高圧インバータ後継機種 開発

田中賢一郎 Ken'ichiro Tanaka
犀藤 基 Hajime Saito

キーワード マルチレベルインバータ、高圧インバータ、電源回生、高効率、入力高調波対策、コンバータ制御

概要



電源回生高圧インバータ THYFREC VT732P

近年、地球環境問題を背景に省エネルギー化への関心が高まっており、エネルギーの有効活用の必要性や可変速駆動システムの高効率化が求められている。例えば、国際電気標準会議（IEC）は、可変速駆動システムの効率についての規格 IEC61800-9-2 を2023年に発行しており、電動機のみならずインバータの高効率化に対する重要性が世界的に高まっていることが分かる。

当社は、電源回生機能を備えた高効率高圧インバータサイフレック THYFREC VT732P を開発し、製品化した。ファン・ポンプなどの二乗低減トルク負荷の設備に適用して可変速運転することで、大幅な省エネルギー効果が期待できる。また、新たな電源回生方式を採用することで、低損失でかつ電源電圧変動に強い電源回生が行えることが最大の特長である。

1 まえがき

様々なインフラ設備に使用される大容量のファン・ポンプ向けモータは、高電圧を出力できる高圧インバータで回転速度を制御している。当社は、2005年からセル直列多重方式の高圧インバータを発売し、2007年には電源回生機能を搭載したサイフレック THYFREC VT710P（以下、VT710P）を製品化し多数の実績を積んできた。電源回生機能は、モータ減速時に発生する回生エネルギーを電源に戻すことができ、大きな省エネ効果が期待できる。近年、カーボンニュートラルという目標が掲げられ、省CO₂、省エネに対する注目度が高まっている。

本稿では、カーボンニュートラルに貢献するためにVT710Pの後継機種として開発し、国内の重要インフラ設備向けにリリースした電源回生高圧インバータ THYFREC VT732P（以下、

VT732P）の仕様及び特長などを紹介する。

2 VT732P

2.1 製品仕様

第1表にVT732Pの製品仕様を、第2表に共通制御仕様を示す。VT732Pの定格出力容量は、6kV系1300kWである。過負荷耐量は、標準過負荷120%1分間と重過負荷150%1分間の二重定格とし、使用する用途に応じてどちらか一方を選択する。回路構成はセル直列多重方式で、インバータ制御に正弦波PWM（Pulse Width Modulation）方式、コンバータ制御に矩形波方式を採用している。

VT732Pでは、永久磁石電動機（PM）速度センサ付きベクトル制御と誘導電動機（IM）速度センサ付きベクトル制御、IM-V/f制御を備えている。出力周波数範囲は0.1～120Hzで、デジタル周波数設

第 1 表 VT732P 製品仕様

6kV系モーター容量 1300kW に対応し、過負荷耐量は、標準過負荷 120% 1 分間と重過負荷 150% 1 分間の二重定格となる。

項目	仕様	
形式	VT732P-1300H	
定格容量*1	1657kVA	
定格電流*2	145A	
適用電動機*3	1300kW	
過負荷耐量	120% 1 分間	
重過負荷	定格容量*1	1326kVA
	定格電流*2	116A
	適用電動機*3	1040kW
	過負荷耐量	150% 1 分間
電源	主回路	6000/6600V ± 10% 50/60Hz ± 5%
	制御回路	200/220V ± 10% 50/60Hz ± 5% (標準) 400/440V ± 10% 50/60Hz ± 5% (オプション)
出力	定格出力電圧	6000/6600V
	出力周波数範囲	0.1 ~ 120Hz の範囲で任意設定
変換効率*4	97.0% (サージ電圧抑制フィルタ無し) 96.9% (サージ電圧抑制フィルタ有り)	
構造一般仕様	保護構造	IP20 (標準) IP40 (オプション)
	取り付け	自立盤構造
	冷却方式	強制空冷
	保守性	前面保守 (標準) 前背面保守 (オプション)
	表面色	マンセル 5Y 7/1 半つや (標準)
	騒音	盤面から 1.5m の地点で 85dB(A)
	質量	6500kg 以下
使用環境	設置	屋内
	周囲温度	0° ~ 40°C 年平均 25°C 以下
	相対湿度	85% 以下 ただし、結露が無いこと
	耐振動	輸送時: 0.5G 運転時: 0.1G
	雰囲気	腐食性ガス・爆発性ガス・金属粉・蒸気・じんあい・オイルミスト・風綿などが無いこと
	標高	1000m 以下
製品寿命	15年	
規格・法令	JIS	JEC-24453-2008 高電圧交流可変速駆動システム
		JEC-2440-2013 自冷半導体電力変換装置
	PL法	準拠
	入力高調波	IEEE519-2014
高調波抑制対策ガイドライン (経済産業省)		

注. ※ 1. 出力電圧が 6600 V における出力容量を示す。
 ※ 2. 高調波を含む全実効値を示す。
 ※ 3. 出力電圧が 6600 V における当社標準の 4 極かご形三相誘導電動機の場合を示す。
 ※ 4. IEC61800-4 に示される損失分離法によって算出した製品の保証効率を示す。

第 2 表 VT732P 共通制御仕様

セル直列多重方式電圧形 PWM 制御を採用することで、全ての制御モードで周波数/速度制御精度 ± 0.01% 以内 (デジタル)、出力電圧精度 ± 3% 以内を達成した。

項目	PM 速度センサ付きベクトル制御	IM 速度センサ付きベクトル制御	IM V/f 制御
回路方式	セル直列多重方式		
制御方式	オールデジタル制御マルチレベル PWM		
周波数/速度精度	± 0.01% FS (デジタル設定 25 ± 10°C において) ± 0.5% FS (アナログ設定 25 ± 10°C において)		
出力電圧精度	± 3.0% (デジタル設定 25 ± 10°C において)		
主な機能	クッション処理 (直線・S 字・自由・パス)		
	連動比率		
	プログラム周波数設定		
保護機能	高効率制御	瞬時再始動	
	電圧飽和防止	商用同期	
保護機能	過電流制限・過電圧制限・過負荷故障・過電流・過電圧・ヒューズ断線・不足電圧・短絡故障・温度異常・地絡・MC アンサ異常・通信異常・CPU 自己診断		
故障履歴	過去 8 回分を記憶 内容: 1 次要因, 2 次要因, 遮断時の出力周波数と電流及び時刻		

定では ± 0.01% の周波数制御ができる。また出力電圧は、セル直列多重方式によるマルチレベル出力のため、出力電圧精度はデジタル設定に対し ± 3% 以内を達成した。IM-V/f 制御には拾い上げ機能を標準で搭載し、瞬時停電発生時でもモータが空転した状態から再始動できる。さらに商用同期機能を備えており、対象モータへの電源供給を VT732P から商用電源、又は商用電源から VT732P へシームレスに切り替えることができる。

2.2 安全性・保護機能

VT732P の保護構造は IP20 で、オプションによって IP40 に対応できる。故障及び事故発生時には、非常停止信号や外部機器の故障信号をインバータのメインコントロールユニットで受け、パワーモジュールを駆動するゲート信号を強制的に遮断することでモータを安全に停止させる機能を標準搭載している。同様に、モータ及びインバータの過負荷故障・出力過電流検出・地絡欠相故障・過電圧検出・電圧低下検出・オーバヒートなどのインバータ内部故障も、モータを安全に停止させることができる。さら

にモータの絶縁劣化防止のため、オプションでサージ電圧抑制用出力フィルタを用意しており、出力ケーブル150mまで対応している。なお、出力ケーブル150m以下で当社製モータと組み合わせる場合、サージ電圧抑制用出力フィルタは不要である。

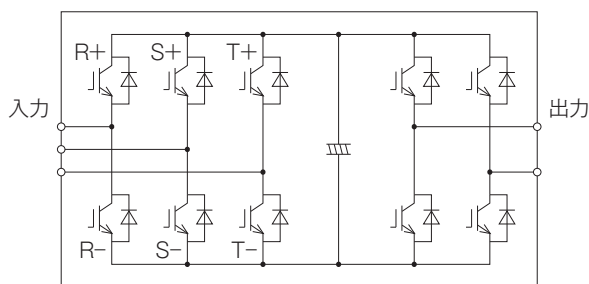
2.3 特長

VT732Pは、定格出力容量に対して各コンポーネントを最適に設計することで、小形・高効率化を達成した。さらに、セル直列多重方式とすることで入力高調波を抑制し、コンバータ制御に矩形波制御を採用して回生時のモジュール損失を低減した。製品の主な特長は、以下のとおりである。

2.3.1 高効率駆動

VT732Pは、入力変圧器と18個の単相出力インバータ（セルユニット）で構成する。第1図に単体回路図を示す。今回、セルユニットを構成する各コンポーネントの選定や組み合わせをインバータの定格出力容量に対して最適化することで、定格運転時におけるインバータ装置変換効率97.0%を実現した（入力変圧器・サージ電圧抑制用出力フィルタを含む）。第2図にVT732Pの効率マップを示す。定格周波数50Hz、負荷率50%以上の全ての運転範囲で変換効率97%以上を達成した。

また、セル直列多重方式とすることでマルチレベルの電圧出力となるため、電圧ひずみを抑制できる。これにより、出力電流の高調波は低減し、定格運転時では出力電流の全高調波ひずみ（THD）3.2%を達成した。電流高調波の低減は、モータの鉄損低減の要因となるため、ドライブシステム全体の効率改



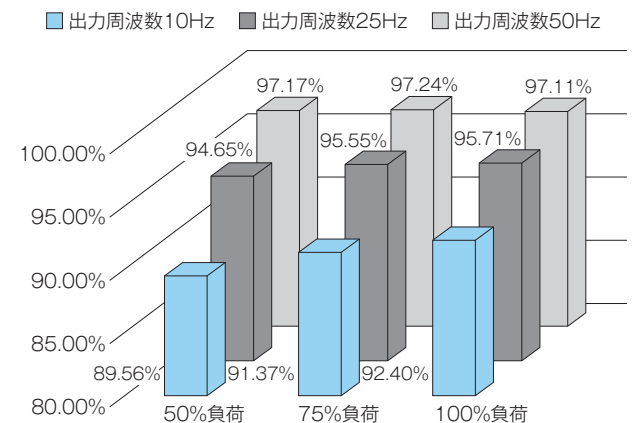
第1図 セルユニット単体回路図

セルユニットの回路図を示す。

善が期待できる。

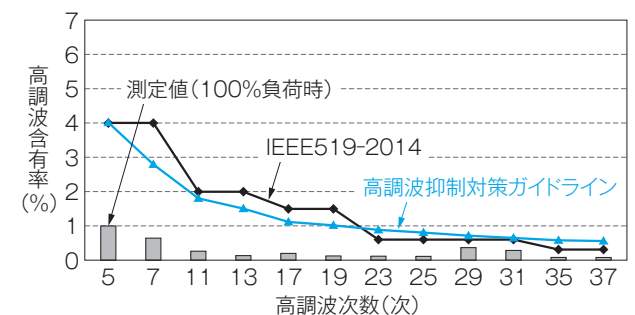
2.3.2 入力高調波抑制

一般的に、インバータは電力系統に高調波電流を流出し、電力系統の電圧ひずみを発生させることが知られている。これに対し、経済産業省は「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」（以下、高調波抑制対策ガイドライン）を示しており、電力系統に流出する高調波電流の上限を定めている。また米国電気電子学会は、IEEE519-2014で、最大需要電流に対する各次高調波電流含有率の上限と契約電流に対する高調波電流比率（TDD）を定めている。第3図に高調波抑制対策ガイドライン及びIEEE519-2014の基準値と比較したVT732Pの入力電流高調波含有率を示す。VT732Pでは、入力変圧器の二次側巻線を36パルスの多相整流とすることで、入力電流の高調波を低減



第2図 VT732Pの効率マップ

効率値は、代表値である。



第3図 VT732Pの入力高調波含有率

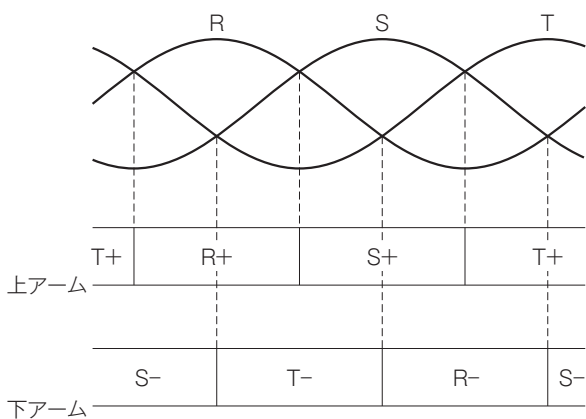
高調波抑制対策ガイドライン及びIEEE519の基準値を十分にクリアしていることを確認した。

し、各基準値を十分にクリアしている。また、TDDは最大3.5%（契約電流は需要家によるため、システムの定格電流を用いて算出）で、IEEE519-2014が定める5.0%以下を実現した。なお、前述のTHD、TDDは代表値である。

2.3.3 通流幅可変矩形波制御

一般的に、コンバータ制御にはPWM制御方式と矩形波制御方式（主に120°通電制御）が用いられる。第4図に120°通電制御方式の原理を示す。矩形波制御の代表的な120°通電制御方式では、上アームR+、S+、T+の各相電圧が最大となる相の半導体スイッチングデバイスをONとし、下アームR-、S-、T-の各相電圧が最小となる相の半導体スイッチングデバイスをOFFとして120°ごとに半導体スイッチングデバイスを制御している。120°通電制御方式では、半導体スイッチングデバイスに発生する損失を低減できる一方、任意のタイミングで半導体スイッチングデバイスを制御できないことから、系統電源電圧低下時にインバータ直流電圧部から系統電源に過大な電流が流れることがあり、装置の安定性が低下する。これに対して、PWM制御方式では、任意のタイミングで半導体スイッチングデバイスを制御することで、系統電源へ流れる電流を抑制できる一方、半導体スイッチング回数が増加し、デバイスの発生損失が大きくなる。

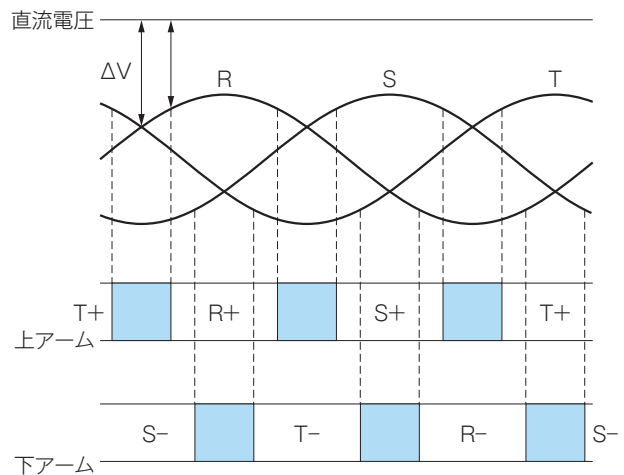
そこで、VT732Pでは半導体スイッチングデバイスのスイッチング回数を最小限に抑え、入力交流電



第4図 120°通電制御方式の原理

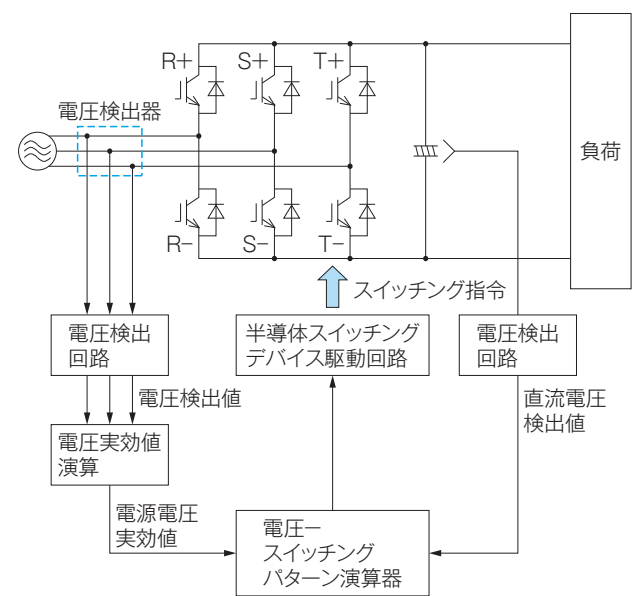
120°ごとにコンバータの半導体スイッチングデバイスを制御する。

圧の変動に強い電源回生方式（通流幅可変制御方式）を新たに採用した。第5図に通流幅可変制御方式の原理を、第6図に制御ブロック図を示す。通流幅可変制御方式では、直流電圧部と系統電源電圧の電位差によって半導体スイッチングデバイスの通流幅をリアルタイムに決定することで、系統電源電圧低下時に流れる電流を抑制できる。これにより、不要な停止を避け、安定した装置駆動を実現した。



第5図 通流幅可変制御方式の原理

直流電圧と系統交流電圧の差分（ ΔV ）によって半導体スイッチングデバイスのスイッチング幅を制御することで、回生電流の増加を抑制する。青色の着色部は、全相スイッチングOFF期間となる。



第6図 通流幅可変制御方式の制御ブロック図

直流電圧検出値と電源電圧実効値から半導体スイッチングデバイスのスイッチング幅を制御する

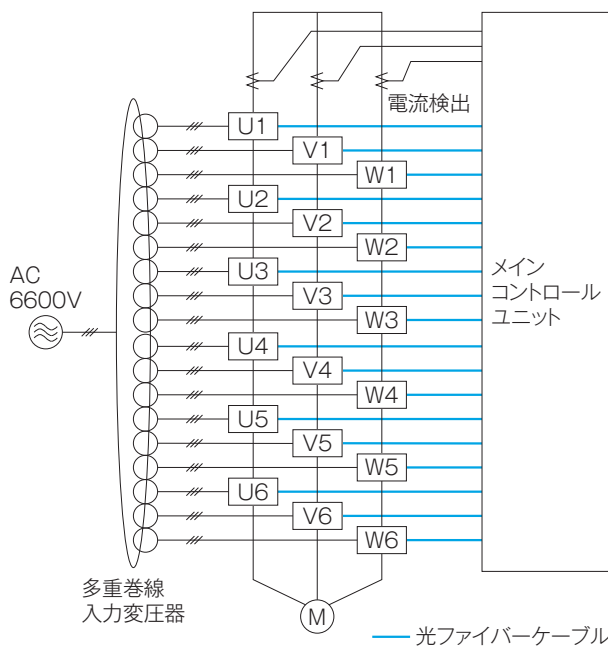
3 回路構成

3.1 主回路構成

第7図にVT732Pの主回路システム構成を示す。三相入力電圧は多重巻線変圧器を介して各セルユニット (U1, U2…, U6, V1, V2…, V6, W1, W2…, W6) に入力される。セルユニットの回路構成は、三相交流入力単相交流出力である。各相のセルユニットは直列に接続され、セルユニットの出力を多重化した相電圧がモータに印加される。第5図の6多重構成では、各相-6レベル~+6レベルの出力となり、各相電圧は最大13レベルとなる。各セルユニットとメインコントロールユニット (MCU) は光ファイバーケーブルで接続され、MCUは各セルユニットのゲートコントロールと装置保護のための故障出力を担う。

3.2 外形

第8図にVT732Pの外形寸法の一例を示す。VT732Pは、入力変圧器盤・セルユニット盤・自動制御盤の3面構成となる。入力変圧器盤には、多重巻線変圧器を格納し、セルユニット盤は、各相6個のセルユニットを三相合計で18個格納する。また、



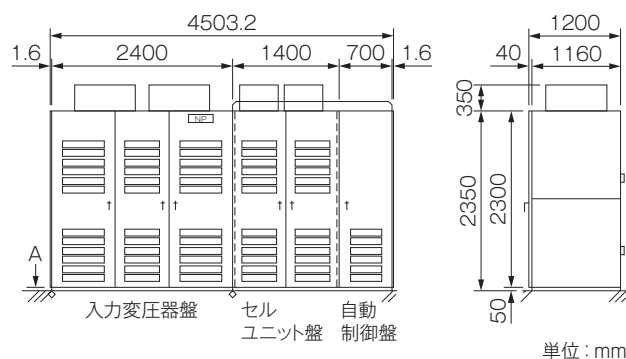
第7図 VT732Pの主回路システム構成

各相でセルユニットが6直列に接続され、相電圧は最大13レベルとなる。

自動制御盤にはMCUを含む制御回路・その他補器を格納する。

3.3 制御回路構成

第3表に制御端子機能を示す。シーケンス入力端子は、機能固定3点「運転指令 (RUN)・非常停止 (EMS)・故障復帰 (RST)」に加え、汎用シーケンス入力13点を備えている。次にシーケンス出力端子は、機能固定4点「運転状態 (RUN)・冷却ファン (FAN)・入力遮断器 (VCBEN)・入力遮断器トリップ (VCBTRIP)」に加え、汎用シーケンス出力12点を備えている。汎用シーケンス入出力は、操作パネルによって任意の機能を設定できる。また、アナログ入出力機能を有しており、制御端子台からア



第8図 VT732P 盤外形寸法例

VT732P 盤の標準外形寸法を示す。

第3表 VT732P 制御端子機能

VT732Pの制御端子は、入力3点・出力4点の固定制御端子のほかに、シーケンス入出力とアナログ入出力を自由に設定できる制御端子を有している。

名称	機能
シーケンス入力	固定3点 運転指令 (RUN)・非常停止 (EMS)・故障復帰 (RST) 汎用13点 任意設定
シーケンス出力	固定4点 運転状態 (RUN)・冷却ファン (FAN)・入力遮断器 (VCBEN)・入力遮断器トリップ (VCBTRIP) 汎用12点 任意設定
アナログ入力	3点 (速度・周波数など任意割り付けが可能)
アナログ出力	4点 (出力周波数・出力電流など任意割り付けが可能)
伝送機能	Modbus/RTU PROFIBUS-DP (オプション)

ナログ信号を入出力できる。アナログ入出力は、電圧範囲±10Vで3点の入力端子と4点の出力端子を備えている。入力端子は、速度指令やトルク指令などを設定でき、出力端子は、操作パネルから任意の信号を設定できる。各端子にゲインとオフセットの設定機能を備えているため、入出力の信号処理の自由度が非常に高い設計となっている。

4 むすび

電源回生高圧インバータ VT732Pを紹介した。回生エネルギーの有効利用や高調波電流抑制技術、ドライブシステムの高効率運転は、カーボンニュートラルを実現するための重要な要素である。本製品が持つ特長を生かすことで、地球環境問題をはじめとする社会的課題の解決に貢献できると考える。

今後もお客様の要求に応え、更なる高機能化・高性能化を実現するとともに、持続可能な社会の実現

に向けて環境配慮型製品の開発・設計に努め、これからも「より豊かな未来をひらく」ために既存製品の進化と新領域への挑戦を続けていく所存である。

- ・ Modbus は、Schneider Electric USA Inc. の登録商標である。
- ・ PROFIBUS-DP は、PROFIBUS User Organization の登録商標である。
- ・ 本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



田中賢一郎
Ken'ichiro Tanaka
開発部インバータ開発部
インバータに関する研究開発に従事



犀藤 基
Hajime Saito
技術部社会システム技術部
電動応用製品のエンジニアリング業務に従事