

# 環境に優しく，省メンテナンスを実現した 電気鉄道用ハイブリッドインバータ・コンバータ

Hybrid Inverter and Converter for Electric Railways

片岡 秋久 稲垣 克久 野村 純一

■ KATAOKA Akihisa

■ INAGAKI Katsuhisa

■ NOMURA Junichi

直流電源で走行する電車の変電所では，交流から直流に変換する整流器設備のほかに，電車の減速時に発生する制動エネルギーを交流に変換する回生インバータ装置を設けることにより，駅設備などのエスカレータやエレベータの電源として電力を有効に活用している。

今回開発した直流電気鉄道用ハイブリッドインバータは IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子を採用することで，力行(りっこう)と回生の両方向 (1,000 kW) の変換を可能とした。更に，ハイブリッドコンバータでは，整流器とハイブリッドインバータを組み合わせることで変圧器と遮断器の共通化が図れ，力行電力については 3,000 kW 又は 4,000 kW を出力できる両方向変換装置とした。

Electric power has recently been more effectively utilized by applying inverter equipment, which converts DC power to AC power, to electricity substations for DC traction service where rectifier equipment is installed. The inverter equipment regenerates AC power from the energy obtained from decelerating trains, and the power is used for station services such as elevators and escalators.

Toshiba has developed a hybrid inverter and converter system utilizing insulated gate bipolar transistors (IGBTs) and diode cells. This system realizes the combined function of converting AC to DC and DC to AC. This report provides an outline of the system and describes some of its features.

## 1 まえがき

電気鉄道の車両は，き電線から取り込んだ電力でモータを回して走行し，この状態を力行(りっこう)と言う。き電線に直流電力を供給する直流き電方式が広く採用されており，整流器には大容量の整流用ダイオードを用いたシリコン整流器が主に使われている。

一方，車両が減速・停止する際には，ブレーキシューなどの機械式ブレーキや，モータを発電機として使用する回生ブレーキが使われている。

回生ブレーキは，ブレーキシューのような摩耗する要素がないためメンテナンスを省力化でき，また，回生したエネルギーを力行車両が利用することで省エネルギー化できるといった利点がある。

しかし，回生車両が多く，回生した電気エネルギーを消費しきれない場合には，き電線の電圧が上昇して回生ブレーキが使えなくなり機械式ブレーキに切り替わる，いわゆる回生失効の状態になってしまう。

そこで従来から，余剰電力を有効活用するため，回生インバータによって直流電力を交流電力に変換し，駅設備の稼働用などに供給されている。この回生インバータには，主にサイリスタ変換器が使われてきた。

今回，回生インバータに IGBT (Insulated Gate Bipolar

Transistor) 変換器を適用したハイブリッドインバータと，シリコン整流器と回生インバータ用 IGBT 変換器を組み合わせたハイブリッドコンバータを製品化した。この装置により高調波電流の低減と力率の改善が図れ，環境負荷の低減と省メンテナンスを実現した。

## 2 ハイブリッドインバータ

### 2.1 ハイブリッドインバータシステムの構成

ハイブリッドインバータシステムの構成を図1に示す。

従来のシリコン整流器+サイリスタ変換器の回生インバータシステムに対して，ハイブリッドインバータは，サイリスタ変換器を IGBT 変換器に置き換えたシステムなので基本的なシステム構成は同じであり，シリコン整流器と IGBT 変換器が別々の変圧器に接続した構成となっている。

ハイブリッドインバータ用 IGBT 変換器の外観を図2に，ハイブリッドインバータの定格仕様を表1に，それぞれ示す。

### 2.2 ハイブリッドインバータの特徴

ハイブリッドインバータではスイッチング素子として，自己消弧型素子である IGBT を使用している。

そのため，従来のサイリスタ変換器の回生インバータに比べて力率が高く，高調波の発生量が少ないといった特長がある。発生する高調波が少ないので，サイリスタの回生イン

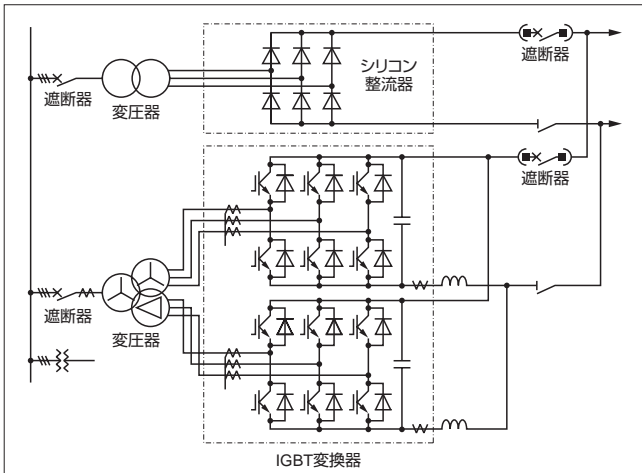


図1. ハイブリッドインバータシステムの構成 — 直流変電所にハイブリッドインバータを設けた場合の主回路構成である。図は整流器系統の電源に回生しているが、高圧配電系統に戻すこともできる。

Configuration of hybrid inverter system

表1. ハイブリッドインバータの定格仕様

Ratings of hybrid inverter

項目	定格	備考
定格容量	力行/回生: 1,000 kW連続	
定格過負荷	回生: 300% - 1分間又は 450% - 30秒間	
定格直流電圧	力行: 1,500 V 回生: 1,650 V	レギュレーションあり 任意に設定可
定格交流電圧	1,250 V	
冷却方式	自冷(ヒートパイプ自冷)	純水ヒートパイプ
制御方式	固定5パルス位相制御方式	
適用素子	IGBT(モジュール型) 定格: 3,300 V - 1,200 A 素子構成: 1 S × 2 P × 6 A × 2ブリッジ	
盤外形	IGBT変換器本体: 幅2,700 × 奥行き2,100 × 高さ3,000 mm 制御盤: 幅800 × 奥行き1,000 × 高さ2,300 mm	

S: 直列 P: 並列 A: アーム

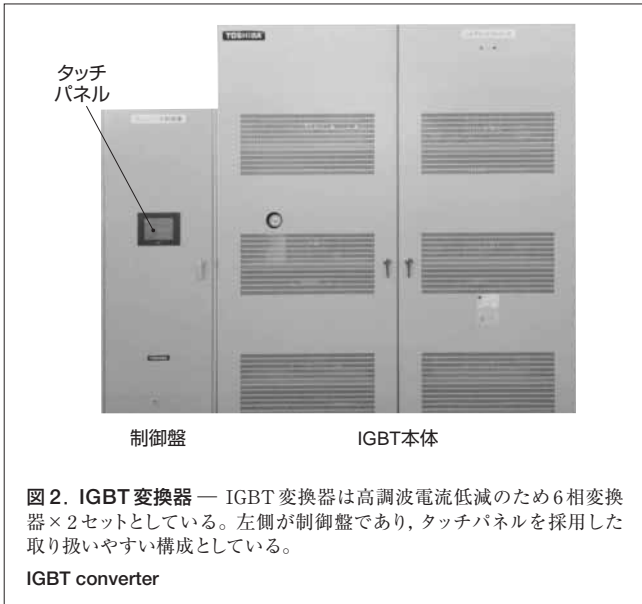


図2. IGBT変換器 — IGBT変換器は高調波電流低減のため6相変換器×2セットとしている。左側が制御盤であり、タッチパネルを採用した取り扱いやすい構成としている。

IGBT converter

バータでは必要であったフィルタ設備が不要になり、変電設備をコンパクトにすることができる。

また、直流から交流、及び交流から直流の、双方向の電力変換ができるので、ハイブリッドインバータは回生負荷だけでなく、力行負荷も負担することができる。

制御方式には固定パルス位相制御方式を採用している。この制御方式では、広幅パルスと狭幅パルスを組み合わせたパルスパターンを採用している。

電流が大きい期間は広幅パルスになっているためスイッチングは行われず、電流の小さい期間でスイッチングが行われる。小さな電流をスイッチングするので、スイッチング損失を抑えることができる。

発生高調波量はパルスパターンによって変化する。適切なパターンを選ぶことで、高調波ガイドラインをクリア可能なレベルまで発生高調波を抑制している。

ハイブリッドインバータは、交流出力電圧と系統電圧との位相差を制御することで出力電力を制御しており、回生電力だけでなく力行電力も出力できる。回生側は4,500 kW、力行側は1,000 kWまで出力できる。

ハイブリッドインバータの電圧レギュレーションの例を図3に示す。図3では、力行側が6%電圧レギュレーション、回生側が定電圧特性になっているが、これらの電圧レギュレーション特性や定電圧レベルは、制御盤のタッチパネルで任意に設定できる。

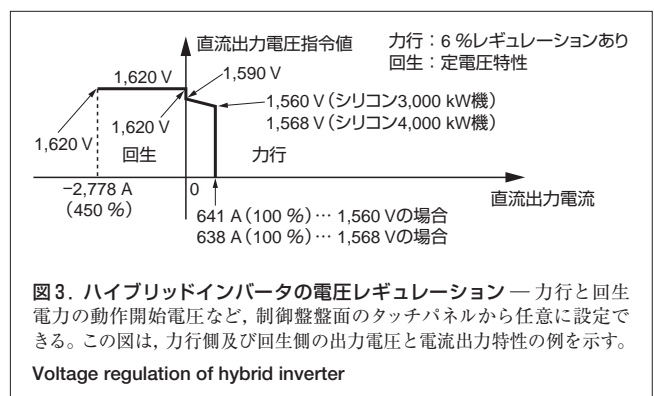


図3. ハイブリッドインバータの電圧レギュレーション — 力行と回生電力の動作開始電圧など、制御盤盤面のタッチパネルから任意に設定できる。この図は、力行側及び回生側の出力電圧と電流出力特性の例を示す。

Voltage regulation of hybrid inverter

### 3 ハイブリッドコンバータ

#### 3.1 ハイブリッドコンバータシステムの構成

ハイブリッドコンバータシステムの構成を図4に、定格仕様を表2にそれぞれ示す。

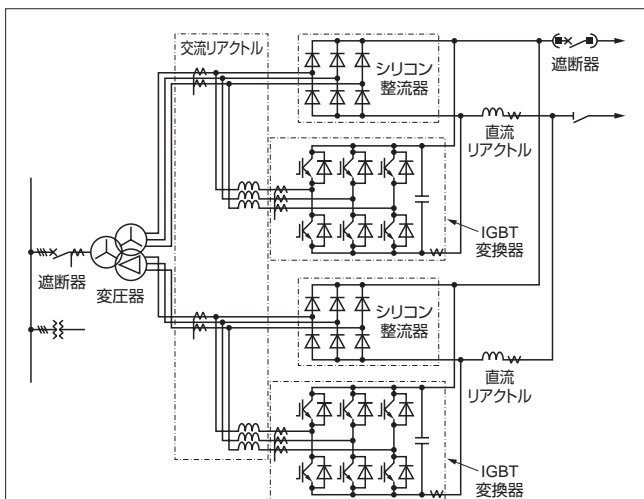


図4. ハイブリッドコンバータシステムの構成 — 整流器及び回生インバータを組み合わせるハイブリッドコンバータとした主回路構成である。力行電力はシリコン整流器から供給され、回生電力はインバータを通して電源側に供給される。

Configuration of hybrid converter system

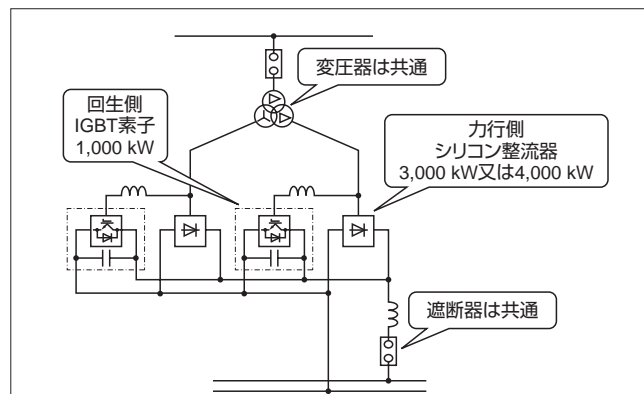


図5. ハイブリッドコンバータシステムの特徴 — ハイブリッドコンバータとすることで、変圧器及び遮断器の共通化と、変電所の省スペース化が図れる。

Overview of hybrid converter system

表2. ハイブリッドコンバータの定格仕様

Ratings of hybrid converter

項目	定格	備考
定格容量	力行：3,000 kW又は4,000 kW連続 回生：1,000 kW連続	
定格過負荷	力行：150% - 2時間, 300% - 1分間 回生：3,000 kW - 1分間又は 4,500 kW - 30秒間	力行：D種 回生：S種
定格直流電圧	力行：1,500 V 回生：1,650 V	レギュレーションあり 任意に設定可
定格交流電圧	1,200 V	
冷却方式	自冷(ヒートパイプ自冷)	純水ヒートパイプ
制御方式	固定3パルス位相制御方式	
適用素子	整流器ダイオード(圧接型) 定格：5 kV - 3,480 A 素子構成：2S × 1P × 6A × 2ブリッジ IGBT(モジュール型) 定格：3,300 V - 1,200 A 素子構成：1S × 2P × 6A × 2ブリッジ	

ハイブリッドコンバータは、シリコン整流器と回生インバータ用のIGBT変換器を、並列に接続したシステム構成となっている。

### 3.2 ハイブリッドコンバータの特徴

ハイブリッドコンバータでは、ハイブリッドインバータと同様にフィルタ設備が不要であるのに加えて、図5に示すとおり、シリコン整流器と回生インバータ(IGBT変換器)が遮断器や変圧器を共有しているため、回生インバータ用の遮断器や変圧器が不要であり、ハイブリッドインバータ以上に省スペース化できる。

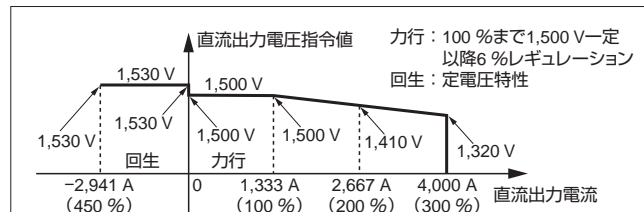


図6. ハイブリッドコンバータの電圧レギュレーション — 力行、回生電力の動作開始電圧など、制御盤面のタッチパネルから任意に設定ができる。力行側は定電圧制御が可能となり、回生効率の向上が期待できる。この図は出力電圧と電流出力特性の例を示す。

Voltage regulation of hybrid converter

ハイブリッドコンバータでは、力行負荷は主にシリコン整流器が負担し、回生負荷はIGBT変換器が負担する。ハイブリッドコンバータの電圧レギュレーションの例を図6に示す。

回生側は4,500 kW、力行側はシリコン整流器の定格出力の300%まで出力できる。また、力行側も定電圧制御をすることができる。

## 4 ヒューマンインタフェースの充実

IGBT制御盤にはタッチパネルを取り付け、ヒューマンインタフェースの充実を図っている。画面の機能について以下に述べる。

- (1) 運用状態の表示画面 運用状態の画面を図7に示す。この画面では、機器状態及び各部の電圧と電流を表示する。機器の状態表示は、停止あるいは開放で緑、運転あるいは投入で赤となる。また、各部の電圧と電流は数値で表示される。この画面を見ることで、装置の状態をすべて把握することができる。
- (2) 直流出力電圧レギュレーション特性の設定画面 直流出力電圧を任意に設定する画面を図8に示す。この

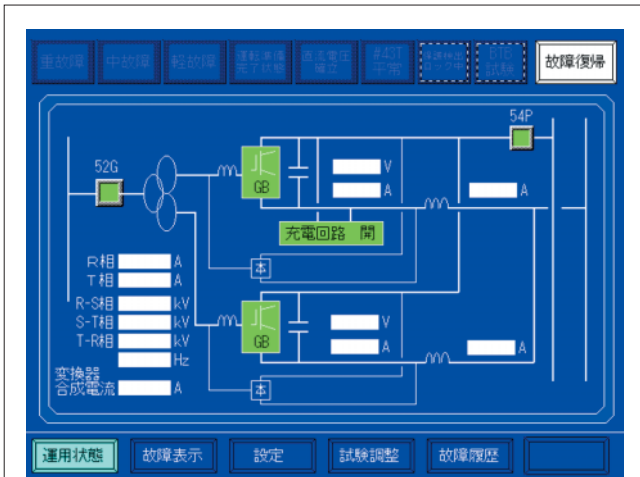


図7. 運用状態の表示画面 — 装置内の運転状態を表示するとともに、各種の電圧・電流値も表示でき、装置全体の状態を把握できる。

Operating status display



図9. 故障表示画面 — 装置に異常が発生した場合、故障内容を表示するとともに故障履歴を残す。

Failure indication display



図8. 直流出力電圧レギュレーション特性の設定画面 — 力行側と回生側それぞれの動作開始電圧と電流をタッチパネルから入力できる。

Display for setting DC output voltage regulation properties

画面から任意のレギュレーション特性を設定することができる。直流出力電圧と直流出力電流を5点設定できるので、定電圧制御、6%及び8%レギュレーション、回生段制御など、ほとんどの要求に対応可能となっている。

- (3) 故障表示画面 故障表示画面を図9に示す。故障発生時には該当の故障項目を表示する。平常時は各項目が白地となっているが、故障が発生すると該当枠が赤色又は黄色となる。赤は重故障項目を、黄色は中故障又は軽故障を示す。この画面を確認することにより、故障発生時の原因究明を早急に行うことができる。

## 5 あとがき

この装置により列車の回生電力を有効に活用でき、また、回生効率の向上も期待できる。更に、従来のインバータに比べ、高調波電流の低減と力率の改善を図ることができる。環境面では、素子の冷却に自冷式の純水ヒートパイプを採用することで、環境負荷の低減と省メンテナンスを実現した。

この装置は環境調和型の変換器であり、地球環境保全に貢献できるものと期待される。

## 文献

- (1) 片岡秋久, ほか. “ハイブリッドコンバータ”. 第42回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 東京, 2005-12, 日本鉄道サイバネティクス協議会, No.622. (CD-ROM).



片岡 秋久 KATAOKA Akihisa

産業システム社 交通システム事業部 交通電力システム技術部長。電鉄用受変電システムエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。

Transportation Systems Div.



稲垣 克久 INAGAKI Katsuhisa

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 社会システム開発部主務。パワーエレクトロニクス関連製品の研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



野村 純一 NOMURA Junichi

東芝三菱電機産業システム(株) パワーエレクトロニクス部。電気学会会員。

Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corp.