

# IEGT適用による産業用ドライブ装置及び電力用変換装置の省エネと小型・高効率化

IEGT Devices to Realize Energy-Saving, Small, and High-Efficiency Industrial Drive Equipment and Power Converters

吉川 忠光

大串 恒二

野村 純一

■ YOSHIKAWA Tamamitsu

■ OGUSHI Koji

■ NOMURA Junichi

近年、BRICs<sup>(注1)</sup>を中心とした経済発展に伴い基礎的な産業材料である鉄鋼の需要が急増し、これに対応するために大型製鉄所の建設ラッシュが続いている。鉄鋼圧延プラントの生産性を向上させるため、モータを可変速制御するドライブ装置には、省エネと容易なメンテナンス性が求められている。また、電気鉄道においても、電力エネルギーの省エネ化が求められており、モータを発電機として使用する回生ブレーキの小型化が重要課題になっている。

東芝三菱電機産業システム(株)は、このような要望や課題に対応するため、高電圧大容量のパワーデバイスIEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)を適用した産業プラント用ドライブ装置TMdrive<sup>TM</sup>シリーズ、自励式無効電力補償装置SVCS<sup>TM</sup>を用いた瞬時電圧変動を抑えるフリッカ抑制装置、及び電車の回生ブレーキ用ハイブリッドインバータ・コンバータを開発した。特に産業プラント用ドライブ装置では、99%を超える効率を実現し、更に、部品点数を減らした主回路部分のユニット化や高度なトレースバックシステムの拡充で、故障修理に要する時間も短縮化している。

With the increasing global demand for steel as a basic industrial material in recent years, especially in Brazil, Russia, India, and China (collectively referred to as the BRICs), the construction of large-scale steel mills continues. In order to improve the productivity of steel rolling plants, lower energy consumption and easy maintenance are required for industrial drive equipment for motor control.

Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corporation has applied injection enhanced gate transistors (IEGTs) to industrial drive equipment and flicker compensation equipment in power systems. In particular, we achieved high efficiency exceeding 99% and shortened the time required for troubleshooting by reducing the number of parts in the main control unit.

## 1 まえがき

高電圧大容量パワーデバイスであるIEGTは、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)と同様に電圧信号で大電力をオン/オフでき、スイッチング損失が小さく高効率で、周辺部品が少ないことから装置のコンパクト化が図れ、高電圧大容量の変換器に適している。既に多くの適用実績があり、その小型で高効率と高い信頼性が実証されている。

ここでは、高電圧大容量IEGTを適用した産業プラント用ドライブ装置及びフリッカ抑制装置と、電気鉄道変電所用のハイブリッドインバータ及びハイブリッドコンバータの概要と特長について述べる。

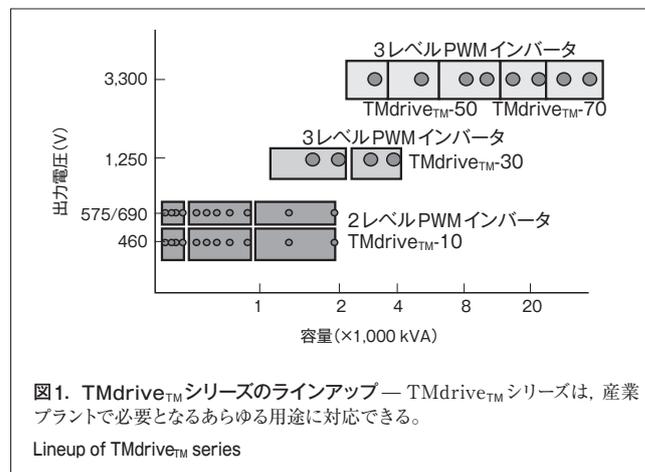


図1. TMdrive<sup>TM</sup>シリーズのラインアップ — TMdrive<sup>TM</sup>シリーズは、産業プラントで必要となるあらゆる用途に対応できる。

Lineup of TMdrive<sup>TM</sup> series

## 2 産業プラント用ドライブ装置

### 2.1 TMdrive<sup>TM</sup>の容量と機種構成

熱間圧延に代表される鉄鋼圧延プラントは、産業用ドライブ装置TMdrive<sup>TM</sup>の最大の適用分野であり、主要なアクチュエータとして数kWから10,000kWを超える大容量のAC(交流)モータが使用されている。これらのモータを可変速駆動するドライブ装置の選定は、プラントの生産性向上、省エネ、

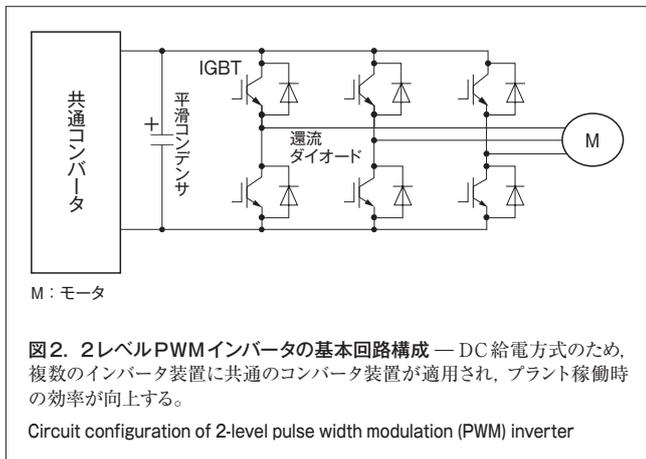
省メンテナンスの実現のためには極めて重要である。

東芝三菱電機産業システム(株)は、あらゆる用途に適応できるようにラインアップを充実させ、TMdrive<sup>TM</sup>シリーズとして産業プラント用ドライブ装置を提供している(図1)。数kVAから千数百kVA以下の補機ドライブ、プロセスライン駆動用には2レベルPWM(Pulse Width Modulation)インバータTMdrive<sup>TM</sup>-10

(注1) ブラジル、ロシア、インド、及び中国の4か国の総称。

が適用される。この装置は、各市場の特質を考慮し出力電圧460, 575, 690 Vが用意されている。小規模冷間圧延や棒綱・線材設備向けドライブ装置としては、容量が2,000～4,000 kVA程度の3レベルPWMインバータTMdrive<sub>TM</sub>-30が適用される。これ以上の大容量主機ドライブとしては、水冷式3レベルPWMインバータTMdrive<sub>TM</sub>-50及びTMdrive<sub>TM</sub>-70が適用される。このように、プラント構成上で必要となるあらゆる領域を、一連の製品シリーズで構成できる。

**2.1.1 2レベルPWMインバータ** 2レベルPWMインバータの基本回路構成を図2に示す。460 V出力用としては1,200 V定格のIGBTが、575 Vと690 V出力用としては1,700 V定格のIGBTが用いられている。この装置はDC（直流）給電方式となっており、複数のインバータ装置に対して共通のコンバータ装置が適用され、プラント稼働時の効率向上が図られている。



**2.1.2 3レベルPWMインバータ** 3レベルPWMインバータの基本回路構成を図3に示す。出力電圧と出力容量に応じて、IGBT又はIEGTが用いられている。また、同一主回路構成をコンバータ側にも適用することで、電源力率の改善と高調波の低減ができる。

IEGTインバータの1相分の詳細回路及び外観を図4に示す。各アームには速断ヒューズによる保護、クラumpsナバ回路を装備している。

## 2.2 TMdrive<sub>TM</sub>-70装置の定格と特長

圧延主機モータ駆動に用いられるTMdrive<sub>TM</sub>-70について述べる。これは、プレーナゲート構造のST2100GXH24Aとトレンチゲート構造のST2600GXH25Aの2種類のマルチチップ圧接形IEGT素子を採用しており、それぞれ3レベルPWMインバータを構成して、単機容量8 MVA及び10 MVAの装置を実現している。各装置の仕様を表1に示す。

**2.2.1 小型化** 装置の大きさは、プラント建設時の電気室を確保するうえで重要な要素であり、プラント建設のイニ

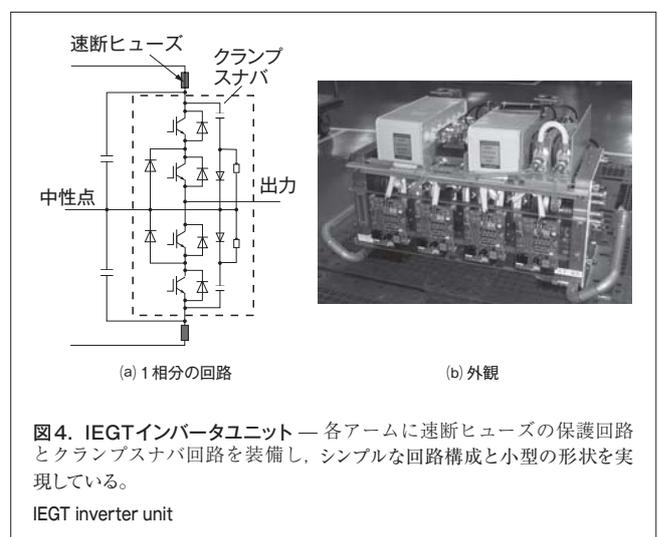
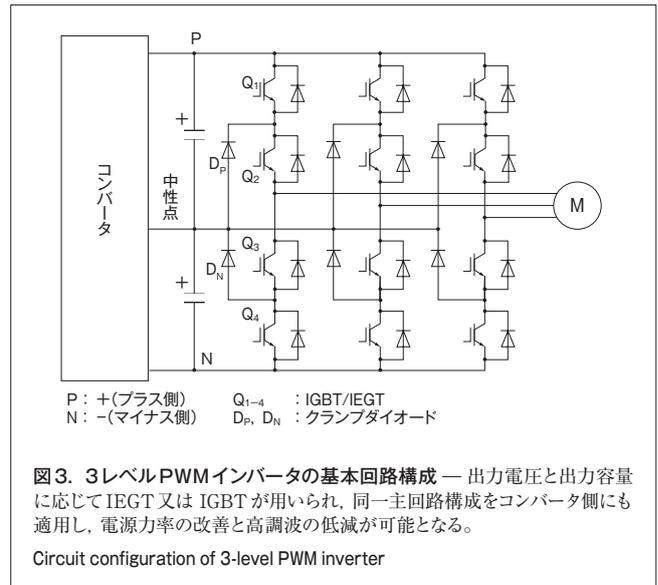


表1. TMdrive<sub>TM</sub>-70装置の主な仕様

Main specification of TMdrive<sub>TM</sub>-70

| 定格容量   | 仕様   |   |   |
|--------|--|---|---|
|        | IEGT素子   | コンバータ部  | インバータ部  |
| 8 MVA  | 構造:プレーナゲート<br>形名:ST2100GXH24A<br>定格:4.5 kV-2,100 A | 容量:8.3 MVA<br>入力電圧:3,550 V (交流)<br>入力電流:1,360 A (連続)<br>2,040 A (60 s)  | 容量:8 MVA<br>出力電圧:3,400 V (交流)<br>出力電流:1,360 A (連続)<br>2,040 A (60 s)  |
| 10 MVA | 構造:トレンチゲート<br>形名:ST2600GXH25A<br>定格:4.5 kV-2,600 A | 容量:10.4 MVA<br>入力電圧:3,550 V (交流)<br>入力電流:1,700 A (連続)<br>2,550 A (60 s) | 容量:10 MVA<br>出力電圧:3,400 V (交流)<br>出力電流:1,700 A (連続)<br>2,550 A (60 s) |

シャルコストに大きく影響する。また、既存設備の更新では、プラントの生産性向上を狙ってモータ容量を大きくする場合が多く、既設電気品の撤去スペースや余剰スペースに新しい装置を設置する必要があり、装置の大きさは更新計画の実現可否



図5. TMdrive™-70 10 MVA装置 — 自動制御盤(左), コンバータ(中央), インバータ(右)の3面で構成され、業界一小型の装置を実現している。  
TMdrive™-70 10MVA

の決め手となる場合がある。

単機容量10 MVA装置の外観を図5に示す。変換器部分は1.1 MVA/m<sup>3</sup>のパワー密度となっており、業界一<sup>(注2)</sup>小型の装置を実現している。

**2.2.2 高効率** 大規模圧延プラントでは、主機及び準主機モータの容量は総計100 MWにも達する。したがって、これらのドライブ装置の効率はプラントランニングコストに大きな影響を及ぼす。TMdrive™-70は、IEGTの優れた特性とその特性を最大限に生かす装置設計で、コンバータとインバータをスルーして99%を超える効率を達成している。これは、GTO (Gate Turn-off Thyristor) を用いた従来機種<sup>(注2)</sup>の効率96.5%に比較して、損失を1/3以下に改善している。IEGTインバータは2000年の1号機以来、350セットが稼働中であり、装置総容量は3,000 MVA (モータ容量ベースで1,500 MW) に達し、省エネ効果は年間300 GWhに達しており、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 削減に寄与している。

**2.2.3 容量拡張性** 鉄鋼圧延主機モータの単機容量は10,000 kWを超過し、過負荷耐量は175~250%になる。このような大容量モータを駆動するにはインバータの単機容量では不足するため、図6に示すような多重化手法を用いて8~40 MVAのドライブ装置容量を実現している。

**2.2.4 高信頼性及びメンテナンス性** プラントの安定稼働には主機ドライブ装置の信頼性確保が欠かせない。IEGTインバータは回路構成が極めてシンプルであり、主回路部品点数は従来比で60%減となっており、本質的に信頼性が向上している。当社の主機ドライブにおいていっそうの信頼性向上を図るため、すべての装置の出荷試験に定格電圧と最大電流の通電試験を導入して、ユーザーサイトでの初期不良要因の撲滅を徹底している。また、主回路部分の徹底したユニット化や、高度なトレースバックシステムの装備で、MTTR

(注2) 2008年10月現在、当社調べ。

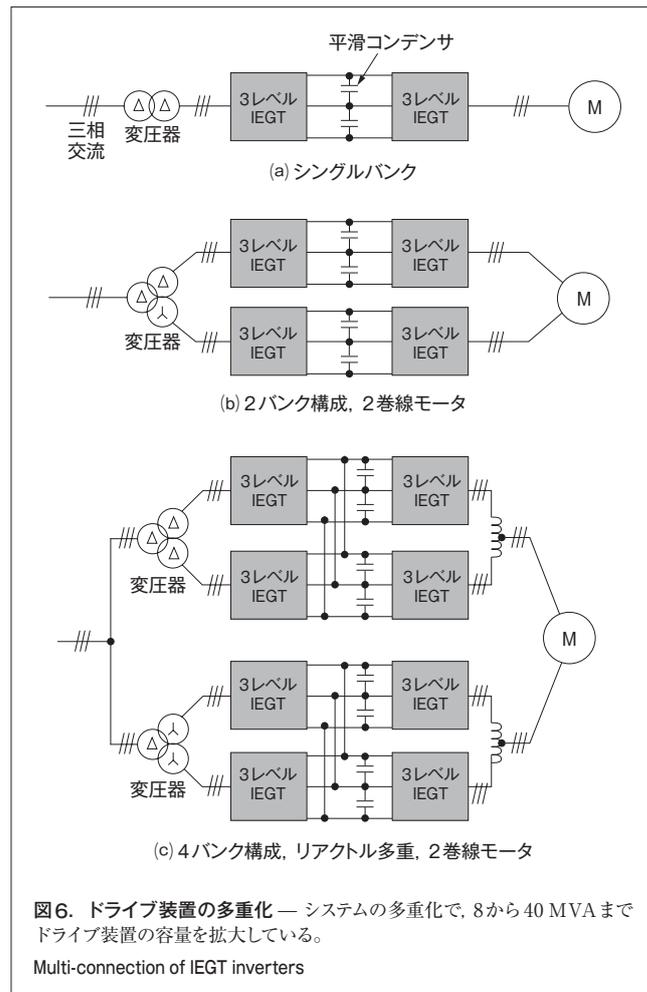


図6. ドライブ装置の多重化 — システムの多重化で、8から40 MVAまでドライブ装置の容量を拡大している。  
Multi-connection of IEGT inverters

(Mean Time to Repair: 平均故障修理時間)を短縮している。これらにより、市場で良好な稼働実績を上げている。

### 3 産業プラント用フリッカ抑制装置

製鉄所向けに開発された瞬時の電圧変動を抑えるフリッカ抑制装置は、電力系統の品質改善効果が大きく広い分野で適用されている。開発した大容量のフリッカ抑制装置は、小型で、フリッカ抑制と無効電力補償効果に優れている。

#### 3.1 フリッカ抑制装置の適用拡大

1987年に自励式無効電力補償装置SVCS™を用いたフリッカ抑制装置を開発して以来、SVCS™の納入実績容量は累計で700 MVAを超えている(図7)。主に、ACアーク炉用のフリッカ抑制装置として適用を重ね、DCアーク炉用のフリッカ抑制装置や系統安定化の無効電力変動(電圧変動)抑制にも適用している。

納入実績は、国内鉄鋼会社向けが累計で443 MVA、海外鉄鋼会社向けが83 MVA、国内電力及び鉄道会社向けが208 MVAになる。

近年の鉄鋼需要増加への対応と生産効率向上のため、従

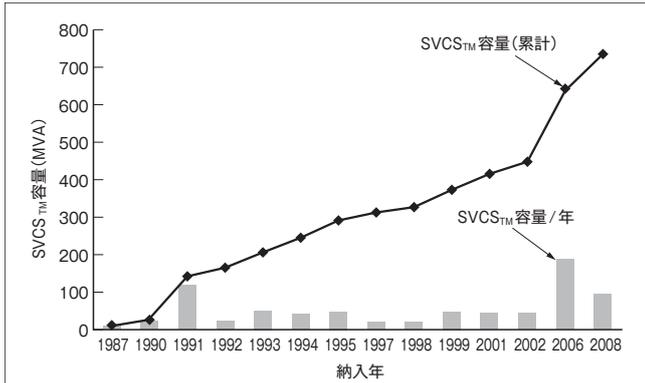


図7. SVCS<sub>TM</sub>の納入実績容量 — 1987年にSVCS<sub>TM</sub>を用いたフリッカ抑制装置を開発して以来, SVCS<sub>TM</sub>の納入実績は現時点で累計で700 MVAを超えている。

Deliveries of static var compensator system (SVCS<sub>TM</sub>) on capacity basis

来に比べより大容量のアーク炉が多く建設されている。一方, 発生フリッカも大きくなるので, その補償装置であるSVCS<sub>TM</sub>も併せて大容量化する必要がある。当社は, 高電圧大容量パワーデバイスIEGTを適用した21 MVA自動式SVCS<sub>TM</sub>を製作しているが, 更に大容量化した31.5 MVA自動式SVCS<sub>TM</sub>を開発し納入した。

### 3.2 31.5MVA 自動式SVCS<sub>TM</sub>の構成

31.5 MVA自動式SVCS<sub>TM</sub>の主回路構成を図8に, 外観を図9に示す。このSVCS<sub>TM</sub>は, 高電圧大容量4,500 V・2,100 A プレーナゲートIEGTを採用し, 単相ブリッジを1ユニットとして構成している。1ユニットは, IEGTと還流ダイオード, 及びク

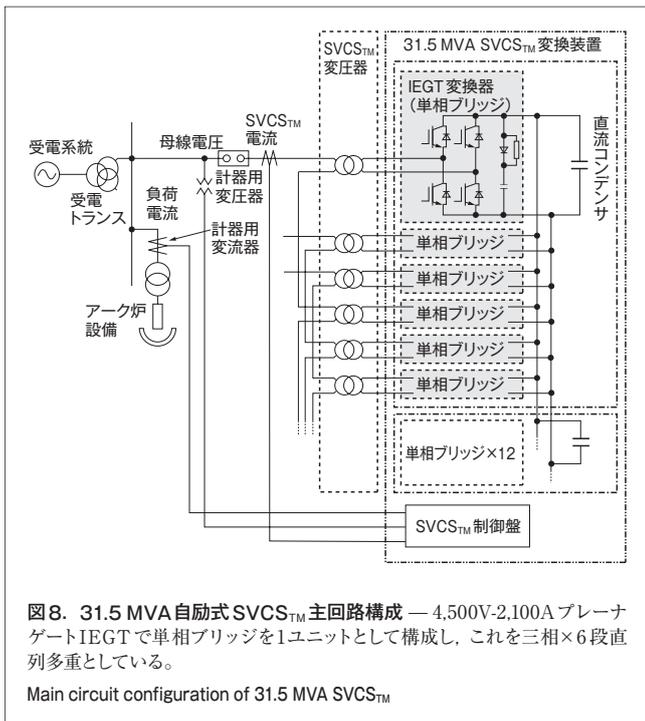


図8. 31.5 MVA自動式SVCS<sub>TM</sub>主回路構成 — 4,500V・2,100A プレーナゲートIEGTで単相ブリッジを1ユニットとして構成し, これを三相×6段直列多重としている。

Main circuit configuration of 31.5 MVA SVCS<sub>TM</sub>



図9. 31.5 MVA 自動式SVCS<sub>TM</sub> — 1990年代のSVCS<sub>TM</sub>と比較して, 外形寸法で68%, 据付面積で53%小型化できた。

31.5 MVA SVCS<sub>TM</sub>

ランプスナバから構成され, これを三相×6段直列多重としている。図9の左側は, 10.5 MVAのIEGT変換器と直流コンデンサであり, これを三つ連ねて31.5 MVAを構成する。

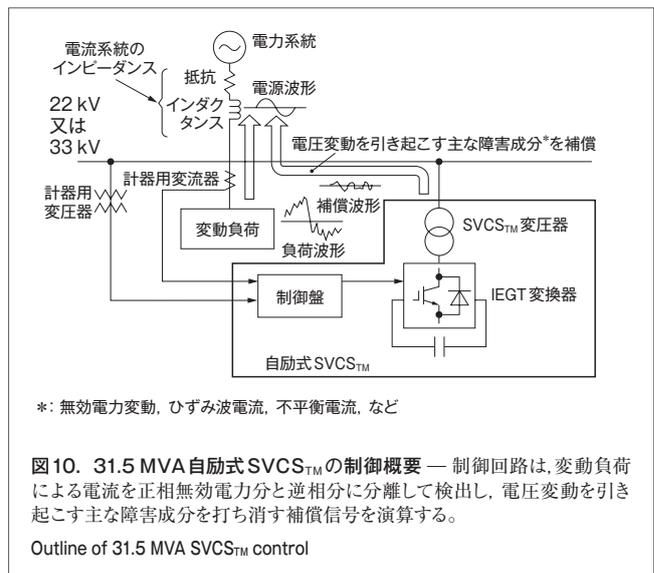
IEGTは個別スナバの回路が不要, ターンオン時の電流変化率(di/dt)抑制用アノードリアクトルが不要, 及びゲート回路が小型などの特長があり, 装置はシンプルな回路構成である。1990年代のSVCS<sub>TM</sub>と比較して, 外形寸法で68%, 据付面積で53%の小型化を実現している。

### 3.3 制御概要とフリッカ抑制効果

31.5 MVA自動式SVCS<sub>TM</sub>では, アーク炉など変動負荷による電流を正相無効電力分と逆相分に分離して検出し, 電圧変動を起こす主な障害成分を打ち消す補償信号を演算する(図10)。

得られた補償信号を合成して, 装置定格容量を超えないように補償ゲインを調整し, 定電流制御, 変圧器の偏磁抑制制御, 及びPWM制御の結果でIEGTをスイッチングする。

SVCS<sub>TM</sub>による改善前と改善後の実測したフリッカ電圧を図11に, 無効電力の測定波形を図12に示す。SVCS<sub>TM</sub>の装置容量の範囲内で無効電力が良好に補償されているようすがわかる。



\*: 無効電力変動, ひずみ波電流, 不平衡電流, など

図10. 31.5 MVA自動式SVCS<sub>TM</sub>の制御概要 — 制御回路は, 変動負荷による電流を正相無効電力分と逆相分に分離して検出し, 電圧変動を引き起こす主な障害成分を打ち消す補償信号を演算する。

Outline of 31.5 MVA SVCS<sub>TM</sub> control

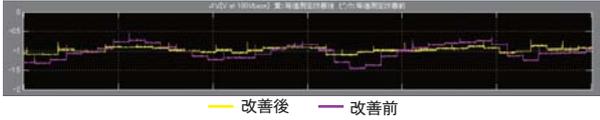


図11. フリックの測定結果 — SVCS™の導入によりフリッカが改善されている。  
Results of on-site flicker measurement

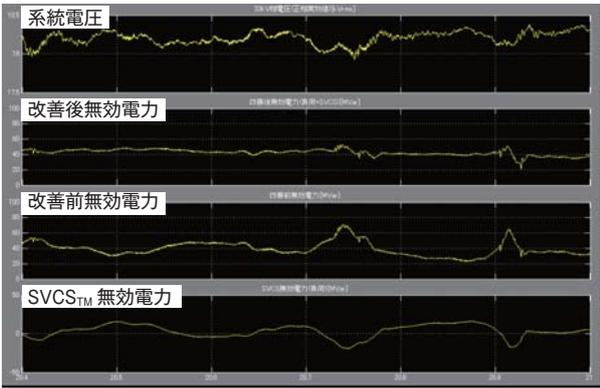


図12. 無効電力の測定結果 — 無効電力が良好に補償されている。  
Results of on-site reactive power measurement

## 4 電気鉄道用変電所ハイブリッドインバータ及びハイブリッドコンバータ

### 4.1 回生ブレーキ<sup>(注3)</sup>と電力エネルギー

電気鉄道の車両(電車)は、き電線から電力を取り込み、モータを回して走行する。この状態を力行(りきこう)と呼ぶ。在来線をはじめとする多くの路線では、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、電気鉄道の変電所では、主に大容量の整流用ダイオードを用いたシリコン整流器によって交流電力を直流電力に変換している。

電車が減速や停止するときに使われる回生ブレーキは、機械式でのブレーキシューのような磨耗する要素がないためメンテナンスを省力化でき、また、回生した電力エネルギーを力行車両が利用することで省エネ化できる。しかし、回生車両が多い場合には回生された電力を消費し切れず、き電線の電圧が上昇して回生ブレーキが使えない状態になってしまう。

従来から直流電力を交流電力に変換する回生インバータによって、き電線の直流電力を電力システムに戻すことが行われており、回生インバータとしては主にサイリスタ変換器が使われてきた。しかし、スナバ回路やリアクトルなどで周辺回路が大きくなる問題があった。

当社がIEGTを適用して開発したハイブリッドインバータと

(注3) 通常は駆動力として用いているモータを発電機として作動させ、運動エネルギーを電気エネルギーに変換して回収することで制動をかける電気ブレーキ。

ハイブリッドコンバータは、変電設備の小型化が可能であるばかりでなく、エネルギー回生が可能で、純水ヒートパイプを使用した環境調和型の変換器となっており、地球環境保全にも貢献できる。

### 4.2 ハイブリッドインバータ

#### 4.2.1 ハイブリッドインバータのシステム構成

ハイブリッドインバータのシステム構成を図13に示す。ハイブリッドインバータは、従来のシステムと同様に、シリコン整流器とIEGT変換器が別々の遮断器や変圧器に接続した構成となっており、既設の変電所に回生インバータを導入する場合に適している。

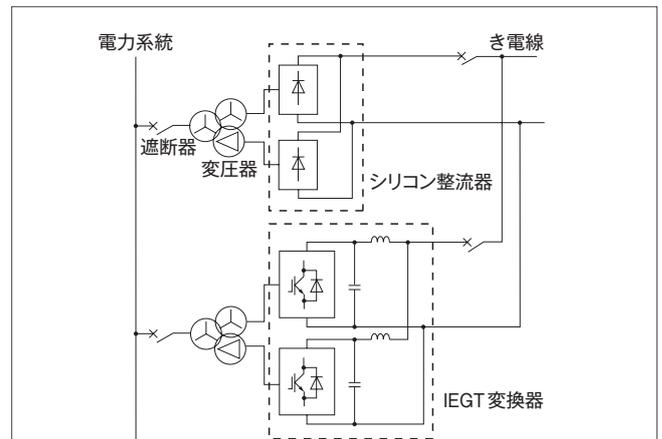


図13. ハイブリッドインバータのシステム構成 — シリコン整流器とIEGT変換器は別々の遮断器や変圧器に接続しており、既設の変電所に回生インバータを導入する場合に適した構成としている。

Configuration of hybrid inverter system

#### 4.2.2 ハイブリッドインバータの特長

回生インバータにIEGT変換器を適用したハイブリッドインバータの外観を図14に、主な仕様を表2に示す。

回生インバータ用IEGT変換器は次のような特長がある。



図14. ハイブリッドインバータ — 主回路を収めた本体盤と、制御回路を収めた制御盤で構成されている。

Hybrid inverter system

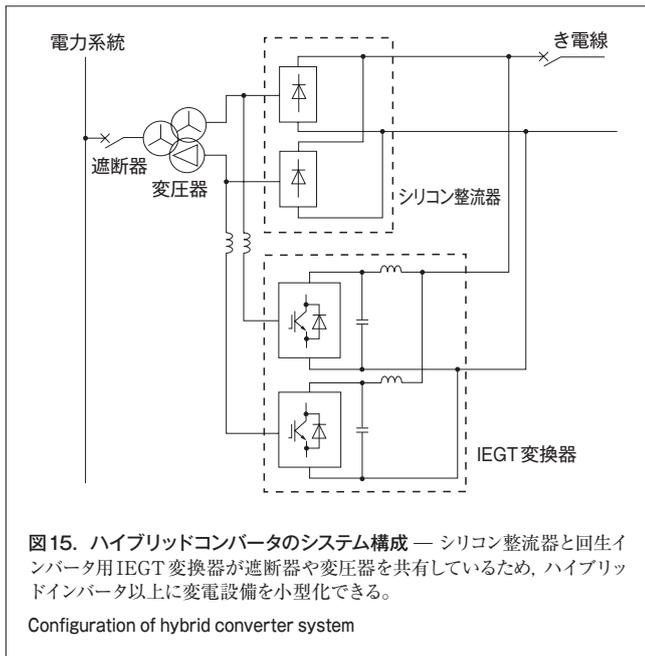
表2. ハイブリッドインバータの主な仕様

Main specification of hybrid inverter

| 項目     | 仕様   |                                     |
|--------|--|-------------------------------------|
| 定格容量   | 力行/回生 1,000 kW連続                                     |                                     |
| 定格過負荷  | 回生 300% - 1min 又は 450% - 30 s                        |                                     |
| 定格直流電圧 | 力行 1,500 V<br>回生 1,650 V<br>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 (純水ヒートパイプ)  |                                     |
| 制御方式   | 固定5パルス位相制御方式   |                                     |
| 素子の構成  | IEGT: 3,300 V - 1,200 A (モジュール型)<br>1S×2P×6A×2ブリッジ*1 |                                     |
| 外形     | IEGT変換器本体  | 2,700 (幅)×2,100 (奥行き)×3,000 (高さ) mm |
|        | 制御盤  | 800 (幅)×1,000 (奥行き)×2,300 (高さ) mm   |

\* 1: それぞれ六つのアームを持つ二つの三相ブリッジの各アームが、1直列2並列のIEGTとなっている。

- (1) 高効率及び低高調波 サイリスタ変換器で必要だったフィルタ設備が不要になり、変電設備が小型になる。
- (2) 固定パルス位相制御方式による低損失 広幅パルスと狭幅パルスを組み合わせた固定パルスパターンで、IEGTは小さな電流の期間だけスイッチングするので、スイッチング損失を抑えられる。
- (3) 純水ヒートパイプの適用による環境負荷の低減 IEGTを冷却するヒートパイプの冷媒が、従来のフロン系の物質ではなく純水であるため、製品廃棄時の環境負荷を低減できる。
- (4) 双方向の電力制御 IEGT変換器は、直流→交流及び交流→直流の双方向に電力変換ができるため、回生負荷だけでなく力行負荷も負担できる。



### 4.3 ハイブリッドコンバータ

**4.3.1 ハイブリッドコンバータのシステム構成** ハイブリッドコンバータのシステム構成を図15に示す。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IEGT変換器を直結したシステム構成となっており、新設の変電所に導入する場合に適している。

**4.3.2 ハイブリッドコンバータの特長** ハイブリッドコンバータでは、シリコン整流器と回生インバータ用IEGT変換器が遮断器や変圧器を共有しているため、ハイブリッドインバータ以上に変電設備を小型化できる。

## 5 あとがき

IEGTを適用した産業プラント用ドライブ装置TMdrive™シリーズは、小型、高効率、及び高信頼性でユーザーから高い評価を得ており、鉄鋼圧延プラントの建設や更新が拡大しているため、2010年までに累計1,000台の需要が見込まれる。

今後これらの実績をベースに、オイル、ガス、及び一般産業分野での大容量可変速ドライブの適用を拡大し、産業プラント用ドライブ装置や電力用変換装置において、省エネと二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の削減に貢献していく。

## 文献

- (1) 市川耕作, ほか. IEGTを適用した産業用大容量インバータ. 東芝レビュー. 55, 7, 2000, p.23-26.
- (2) 細田博美, ほか. 新パワーデバイスと新制御で進化するパワーエレクトロニクス. 東芝レビュー. 57, 8, 2002, p.27-31.
- (3) 秀瀬浩一, ほか. “31.5 MVA自励式無効電力補償装置およびフリッカ評価装置デジタル化の開発” 平成19年電気学会産業応用部門大会. 大阪, 2007-08, 電気学会. p.I-611-I-614.
- (4) 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. 2006, No.622.
- (5) 野村純一, ほか. “電気鉄道用ハイブリッドインバータ/ハイブリッドコンバータの開発”. 平成18年電気学会産業応用部門大会. 名古屋, 2006-08, 電気学会. p.II-221-III-224.



吉川 忠光 YOSHIKAWA Tadamitsu

東芝三菱電機産業システム(株) パワーエレクトロニクスシステム事業部 ドライブシステム部主査。産業プラント用ドライブ装置の設計業務に従事。

Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial System Corp.



大串 恒二 OGUSHI Koji

東芝三菱電機産業システム(株) パワーエレクトロニクスシステム事業部 パワーエレクトロニクス部。産業用変換器の設計業務に従事。

Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial System Corp.



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システム事業部 パワーエレクトロニクス部。産業用変換器の設計業務に従事。

Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial System Corp.