

# 電気鉄道用地上設備におけるパワーエレクトロニクス 応用システム

牧野 喜郎（まきの よしろう）

小高 英明（おだか ひであき）

山本 光俊（やまもと みつとし）

## ① まえがき

電気鉄道の直流電化においては水銀整流器に代わって、半導体を適用したシリコン整流器が登場して以降、地上設備に対してさまざまなパワーエレクトロニクスを応用した装置が導入されている。

電気鉄道用変電所の電源側や負荷（き電）側の各系統で発生する諸現象に対する対策機器としてもパワーエレクトロニクス応用装置は今やなくてはならない状況にある。

本稿では「高調波」「回生電力」「電圧変動・三相不平衡」対応として富士電機が納入した各種装置の概要とフィールドでの導入効果を紹介する。

## ② 12 パルス整流器

1994年9月に制定され、通商産業省資源エネルギー庁から通達された「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」を遵守するために、直流変電所においては整流装置の多パルス化による抑制対策が新設や更新などのタイミングで順次行われている。

変電設備における多パルス化の手段としては、変電所内

図1 直列12パルス整流器（6,000kW, DC1,500V）の外観



または変電所間での位相差30度の6パルス整流器×2台を組み合わせる方法（等価12パルス化）と、12パルス整流器を適用する方法（単器12パルス化）がある。

フッ化炭素を冷媒とした沸騰冷却式直列12パルス整流器（6,000 kW, DC1,500 V）の外観を図1に示す。

等価12パルス化の一例として自営送電系を介しての変電所間多パルス化構成を図2に、当系統での高調波電流の測定例を表1に示す。

単器12パルス化の適用例として変電所受電電圧 66 kV, 4,000 kW, DC1,500 V の整流器を納入した現地での 100 % 負荷時の受電電流高調波スペクトル測定例を図3に示す。第5次はガイドライン上限電流値（826 mA）に対し 110 mA, 第7次は同電流値（588 mA）に対し 166 mA となっている。なお、11次・13次高調波については12パルス化では低減しない。

いずれの場合も高調波低減効果が顕著に表れていること

図2 変電所間の多パルス化構成例

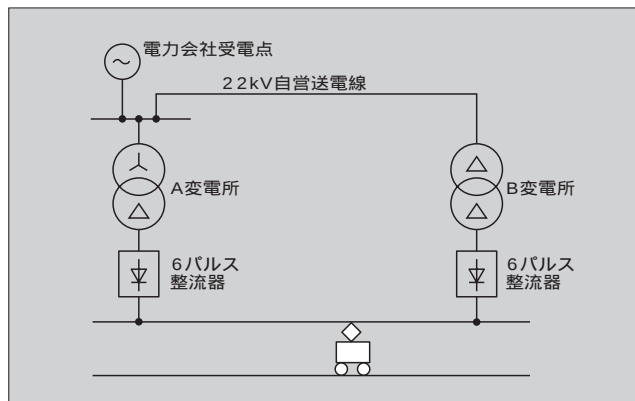


表1 変電所間の多パルス化構成による高調波電流測定例

| 区 分<br>条 件        | 受電電流の高調波含有率（％） |      |     |     |      |
|-------------------|----------------|------|-----|-----|------|
|                   | 5次             | 7次   | 11次 | 13次 | 総合   |
| A 変 電 所 単 独 時     | 17.7           | 10.7 | 6.2 | 3.9 | 23.0 |
| A 変 電 所 + B 変 電 所 | 7.7            | 4.9  | 5.9 | 3.8 | 12.9 |

測定条件：同一季節、曜日および同一時間帯の30分平均値。



牧野 喜郎

電気鉄道用変電・制御システムの技術企画業務に従事。現在、システム事業本部交通・特機事業部交通技術第一部主席。



小高 英明

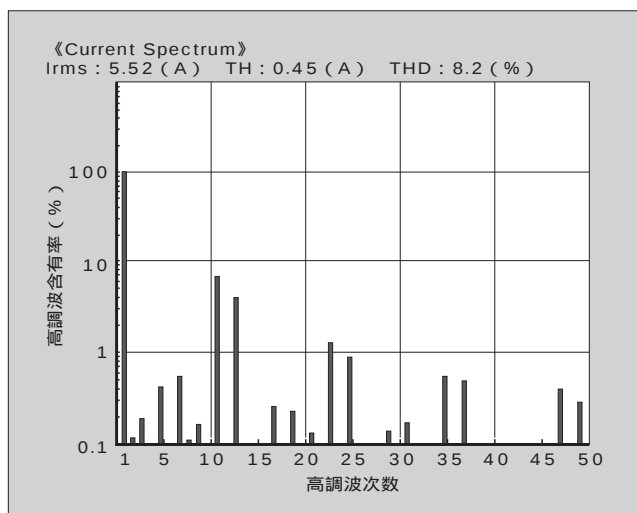
電気鉄道用変電・制御システムの技術企画業務に従事。現在、システム事業本部交通・特機事業部交通技術第一部。



山本 光俊

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所ハイパワーシステムグループ主任技師。

図3 12パルス整流器による高調波電流測定例



が分かる。

### ③ 電力回生インバータとアクティブフィルタ

京都市地下鉄東西線新設工事の一環として、日本鉄道建設公団が施工した京都高速鉄道(株)の東山変電所に、電力回生インバータとアクティブフィルタを適用したパワーエレクトロニクス応用システムを納入した。図4にシステム構成を、表2に各装置の仕様を示す。

#### 3.1 電力回生インバータの必要性

電気鉄道における電力回生車両は、減速・停止の際、その運動エネルギーを電気エネルギーに変換すべく、主電動機を発電機として運転する。その時、力行する電車が近辺に存在する場合、電力回生されたエネルギーが、運動エネルギーとして活用される。しかし、力行車が不在の場合、回生エネルギーは行き場を失い、電車線の電圧を上昇させ、回生車両は回生失効の状態となり、空気ブレーキによる制動を余儀なくされる。電力回生インバータは、直流電気車回生時の電車線電圧上昇に応じ、回生電力を交流に逆変換し、高圧配電用負荷に供給する装置である。電力回生インバータの導入で、回生失効を抑制することにより、回生電力の有効利用に加え、自動列車運転装置(ATO)運転時の定位置停止、ブレーキシュー摩耗量の低減が可能となる。特に地下鉄では、一定量の配電用交流負荷が定常的に存在すること、トンネル内温度上昇抑制などの観点から、回生車両対策の設備として、電力回生インバータが適している。

#### 3.2 電力回生インバータの適用効果

電車運転状況において、電力回生インバータの性能試験を行った際の測定チャートを図5に示す。インバータの回生動作により、直流側電圧上昇が一定値(1,650V)以下に抑制されている。また、1日あたり約1,000kWhの電力量を高圧配電系統に回生し、省電力化に寄与していることを確認した。

図4 京都高速鉄道(株)東山変電所のシステム構成

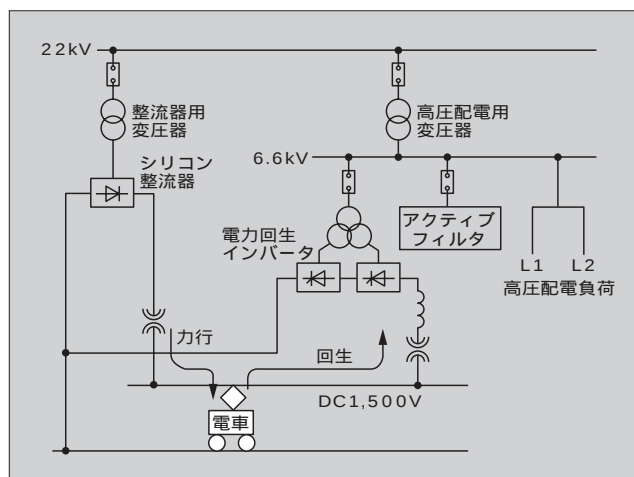


表2 電力回生インバータとアクティブフィルタの仕様

|           |         |                 |
|-----------|---------|-----------------|
| 電力回生インバータ | 方 式     | 他励式サイリスタインバータ   |
|           | 結 線     | 三相ブリッジ直列12相     |
|           | 定 格 出 力 | 500 kW          |
|           | 定格直流電圧  | 1,650 V         |
|           | 冷 却 方 式 | ヒートパイプ自冷式       |
| アクティブフィルタ | 方 式     | IGBT式電圧形インバータ   |
|           | 相 数     | 三相3線            |
|           | 定格補償容量  | 300 kVA         |
|           | 定 格 電 圧 | 440 V (昇圧変圧器付属) |
|           | 冷 却 方 式 | 強制風冷            |

#### 3.3 アクティブフィルタの必要性

電力回生インバータは、12パルス変換装置に相当するため、交流側電流に $(12n \pm 1)$ 次 $[n$ は正の整数]の理論高調波、および回路条件に応じて発生する非理論高調波成分を含有する。この高調波成分に起因して、交流側高圧配電系統に接続されるインダクタンスやキャパシタンスによって共振を誘発し、過熱・異常音など機器の障害に至る場合がある。これを防止する設備として、東山変電所ではアクティブフィルタを採用した。受動形フィルタの場合、補償対象次数が限定されるのに対し、アクティブフィルタは、不特定多数の高調波を一括補償することが可能である。また、実運用上の電力回生インバータの動作は、図5のチャートに示すように、間欠的である。したがって、受動形フィルタのように機能が高調波補償に限定される場合、回生動作時の間欠的な装置利用にとどまる。これに対し、アクティブフィルタは、無効電力補償機能を兼用できるため、進相コンデンサ設備の省略、装置の利用率向上を実現できる。図6にアクティブフィルタの補償出力の相関関係を示す。回生動作のないモードでは、無効電力補償装置として機能する。一方、回生動作時は、高調波を優先的に補償し、無効電力は余力容量分で補償する制御を行っている。

図5 電力回生インバータ性能試験結果

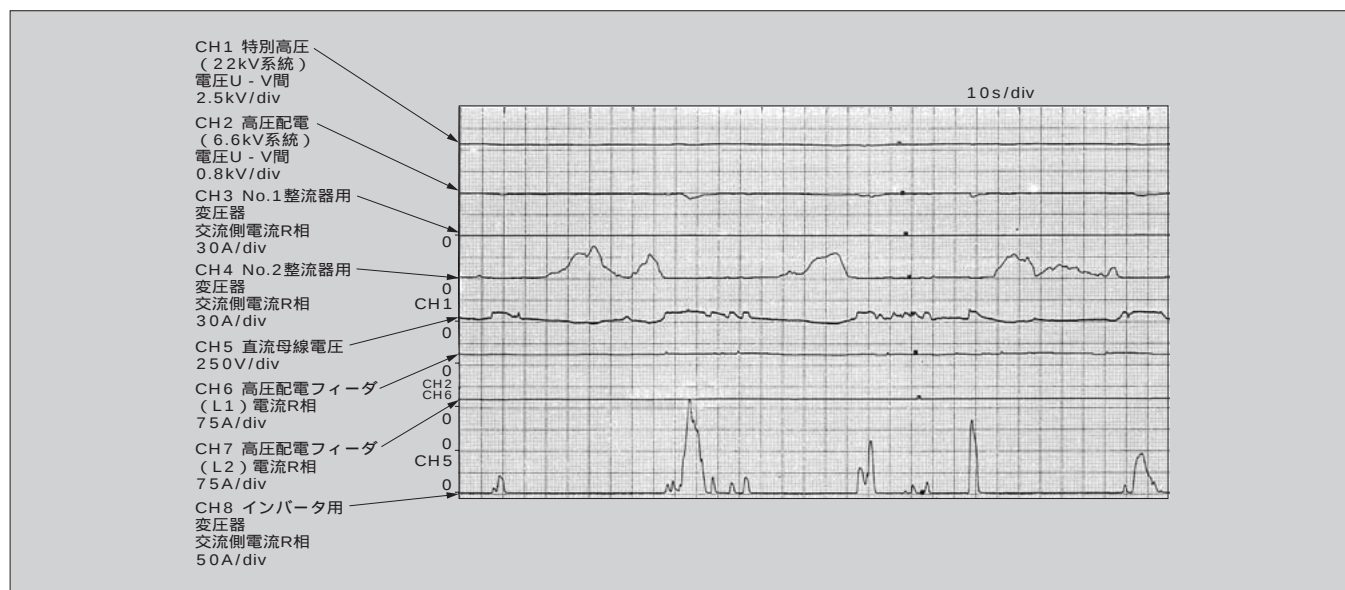


図6 アクティブフィルタの補償特性の相関

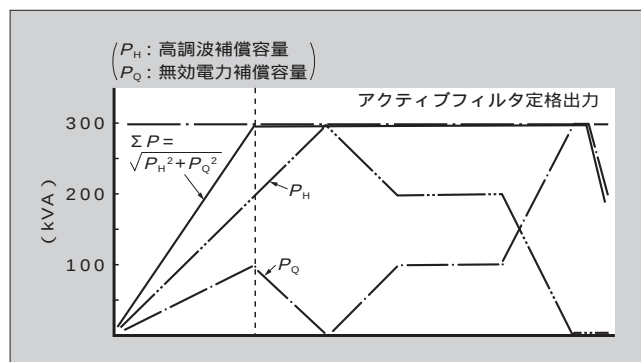


図7 回生電力吸収装置の外観



### 3.4 アクティブフィルタの適用効果

変電所実運用条件下で、アクティブフィルタの性能試験を行い、以下の効果を確認した。

### (1) 無効電力補償

高圧配電用変圧器一次側の力率が、アクティブフィルタ停止状態で約 92 %のところ、フィルタ運転時は約 99 %に改善されていることを確認した。

## (2) 高調波補償

アクティブフィルタ停止状態では、高圧配電負荷電流が共振性の波形となり、交流側回生電流約 150 A の条件で総合電流ひずみ率が約 58 %に達する。これに対し、フィルタ運転時には、総合電流ひずみ率が約 21 %まで低減し、共振抑制効果を果たしていることを確認した。

#### 4 回生電力吸収装置

回生失効の防止を目的とし、簡易に適用でき、変電所以外の場所でも設置が可能な回生電力吸収装置は各所で長年の運転実績を積んでいる。

図 7 に装置の外観を，図 8 に主回路構成を，表 3 に仕様

図 8 回生電力吸収装置主回路結線

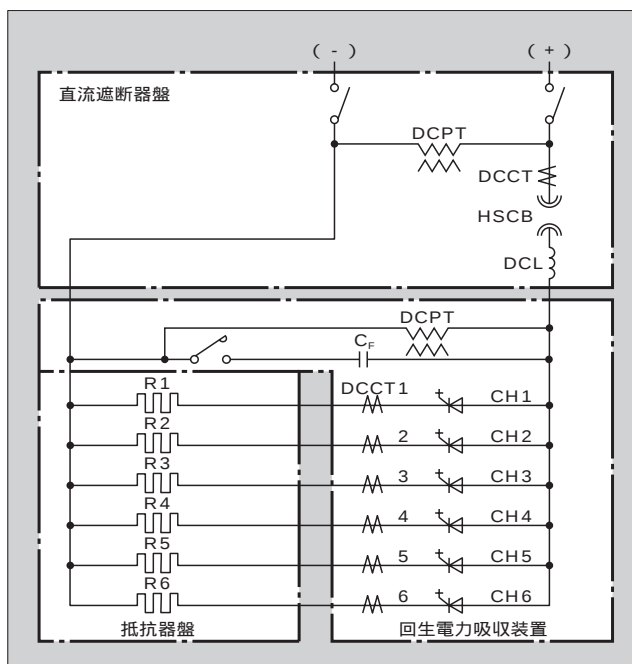
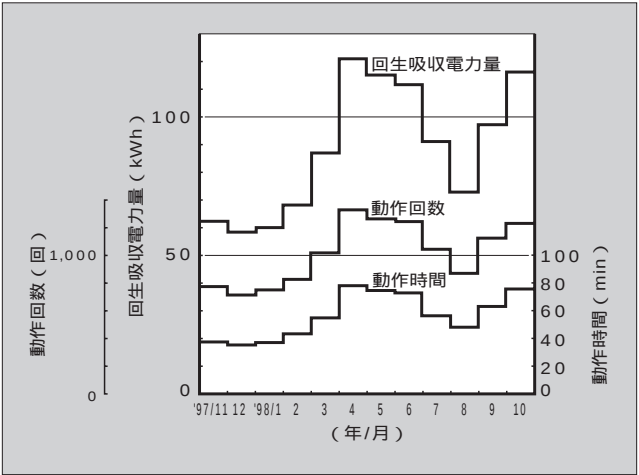


表 3 回生電力吸収装置の仕様例

| 項 目         | 内 容                   |
|-------------|-----------------------|
| 定 格 電 圧     | DC1,650 V             |
| 定 格 電 流     | DC 3,000 A 15秒 (8分周期) |
| チ ョ ッ パ 相 数 | 6相                    |
| 出力リップル周波数   | 360 Hz                |
| 制 御 方 式     | 定電圧制御方式 (電流制限付き)      |
| 冷 却 方 式     | ヒートパイプ自然冷却式           |

図 9 1日あたりの吸収電力量、動作回数および動作時間



例を示す。

図 9 に 1996年に京阪電気鉄道(株)浜大津き電区分所に納入した装置の最近の1日あたりの回生吸収電力量、動作回数および動作時間の推移を示す。1997年11月中旬から AVR 設定電圧を 1,650 V から 1,625 V に変更しての運転状況である。

設定電圧を最適値にすることにより無負荷時に不要な電力吸収を行うことなく回生電力の吸収ができる。

⑤ 単相 SVC , 三相自励式 SVC

東海旅客鉄道(株)では、1964年の新幹線開業以来、逐次輸送力の増強 (列車本数の増加、編成車両数の増加、新形車両による高速化) を行っており、これに対応する電源設備の増強策の一環として、変電所間隔の長い区間での変電所の新設、き電方式の更新や電源電圧降下対策を行ってきた。き電電圧変動対策として納入した焼津変電所向け単相 SVC (大容量静止形無効電力補償装置) と三相側の電圧不平衡と電圧変動対策として納入した新米原変電所向け自励式 SVC の概要について紹介する。

5.1 単相 SVC

本 SVC は、き電電圧変動補償の目的で設置された光直接点弧サイリスタ式 SVC (単相 30 MVA × 2 セット) であり、従来の光間接点弧式装置に比べ点弧回路の削減などにより大幅に小形・高信頼度の装置となっている。図10に

図 10 単相 SVC 全体システム構成

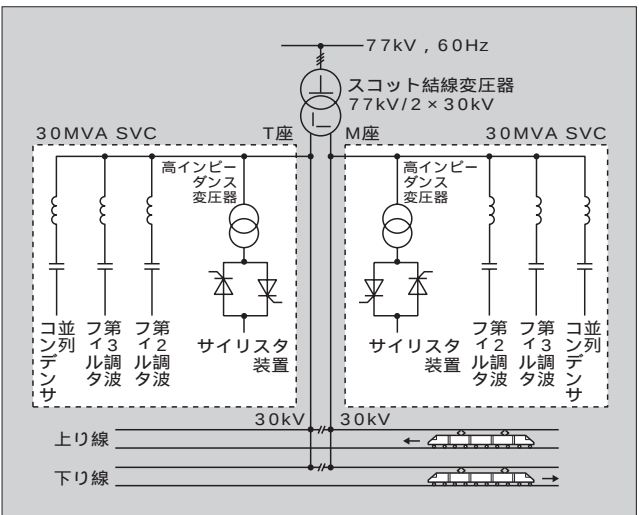
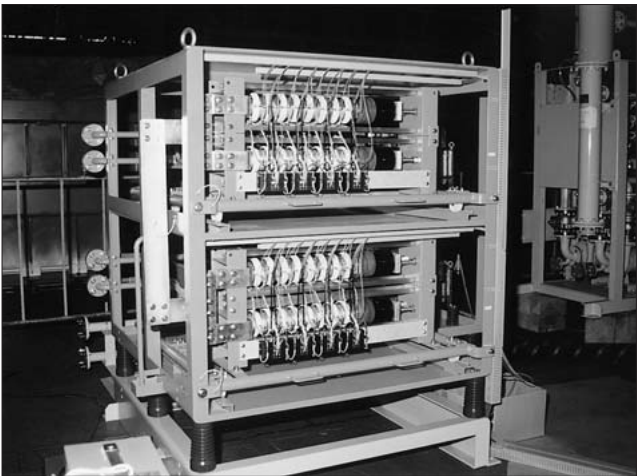


表 4 単相 SVC の仕様

| 項 目     | 仕 様                                              |
|---------|--------------------------------------------------|
| き 電 電 圧 | 単相, 60 Hz, 30 kV                                 |
| 容 量     | 30 MVA ( 18 kV, 1,667 A )                        |
| 結 線     | 逆並列接続                                            |
| 使 用 素 子 | 光サイリスタ<br>4,000 V, 1,500 A<br>16S 1P 2A ( 1S冗長 ) |
| 冷 却 方 式 | 送水風冷 ( 純水冷却 )                                    |
| インピーダンス | 50 %                                             |

図 11 サイリスタ装置の外観



全体システム構成を、表 4 に SVC の概略仕様を、また図11にサイリスタ装置の外観を示す。

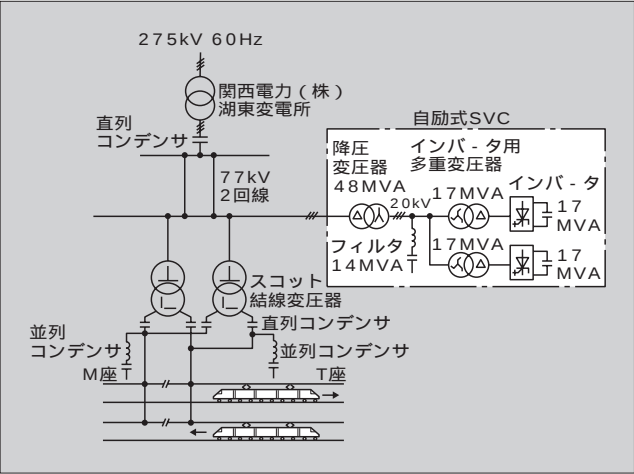
制御装置およびサイリスタの点弧・監視装置は、待機冗長形の完全二重系となっており故障時はオンラインで切替が可能で、システムとして高い信頼性を確保している。

図12に現地での性能検証結果を示す。SVC なしの改善前電圧変動は 13 % 以上であるのに対し、SVC を設置することにより電圧変動を 5 % 以下に抑制できていることが分かる。

図 12 単相 SVC の性能検証結果



図 13 自励式 SVC の全体システム構成



5.2 三相自励式 SVC

自励式 SVC は、前述のサイリスタによる SVC に対して、大容量自己消弧デバイスとして GTO (Gate Turn-Off Thyristor) を採用しており、無効電力補償による電圧変動抑制に加えて、三相個別に電流を制御することにより不平衡電力の補償が可能で、特に回生車両の導入に伴う電圧変動や三相不平衡の抑制に有効となる。

図13に三相自励式 SVC の全体システム構成を、表 5 に概略仕様を示す。自励式 SVC は、逆導通 GTO (4.5 kV，3 kA) を採用し、6 多重構成で1バンクあたり進相・遅相 17 MVA の出力が可能となっている。

自励式 SVC の運転効果を確認するために、納入時に行った実負荷試験時の各部有効・無効電力変動と 275 kV 規制点の電圧変動 (ΔV) の測定結果を図14に示す。波形から分かるように、自励式 SVC 停止時に受電点で発生していた無効電力変動は、自励式 SVC の運転により補償され、規制点で発生している最大 3 % の電圧変動を 1.5 % (規制

表 5 自励式 SVC の仕様

| 項 目         |         | 仕 様                                              |
|-------------|---------|--------------------------------------------------|
| 系 統 電 圧     |         | 三相，60 Hz，77 kV                                   |
| シ ス テ ム 容 量 |         | 進相 48 MVA～遅相 20 MVA                              |
| インバ-タ       | 変換器形式   | 電圧形多重インバ-タ (36相)<br>単相インバ-タ×3相×6多重               |
|             | 変換器容量   | 17 MVA/バンク×2                                     |
|             | 素 子     | 高周波逆導通 GTO 4.5 kV，3 kA                           |
|             | 冷 却 方 式 | 送水風冷 (純水冷却)                                      |
|             | 制 御 方 式 | 3パルス PWM<br>無効電力，逆相電力補償制御                        |
| 多 重 変 圧 器   |         | 17 MVA，三相<br>20 kV/1,091 V<br>千鳥入/△×6多重，送油風冷     |
| 降 圧 変 圧 器   |         | 48 MVA，三相<br>77 kV/20 kV<br>△/△，送油風冷             |
| 高調波フィルタ     |         | 第3高調波FL 7 MVA×1<br>第5高調波FL 7 MVA×1<br>20 kV，油入自冷 |

目標：2 %) 以下に抑制している。

⑥ 今後の展望

近年，低次高調波低減や力率向上の観点から自励式変換装置を適用したシステムが普及している。電気鉄道の地上分野では GTO を適用した装置が主流であったが，今後は高効率，小形化などの面で有利な電圧駆動形デバイスとして IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が積極的に採用される時代と考える。

IGBT の直列接続化や高耐圧化により高電圧・大容量変換装置の構成が可能である。特に直列接続回路を構成する

図 14 自励式 SVC の性能検証結果

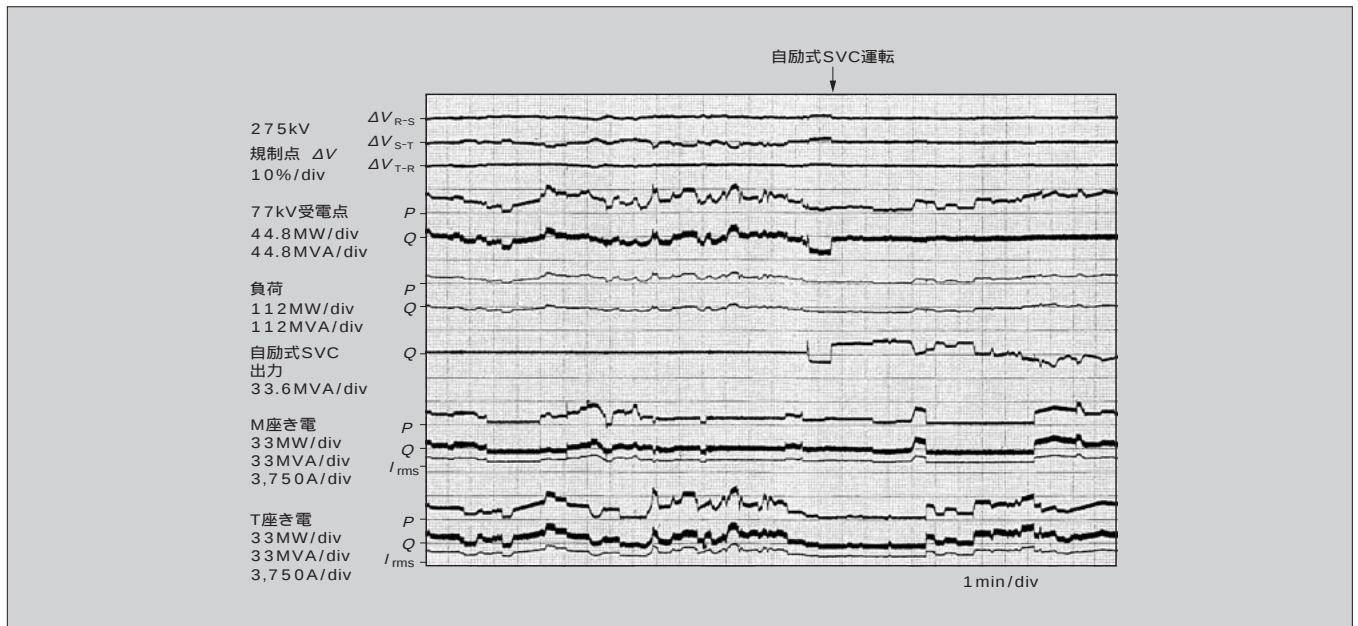


図 15 直列スタック構成例（4直列，1相分）

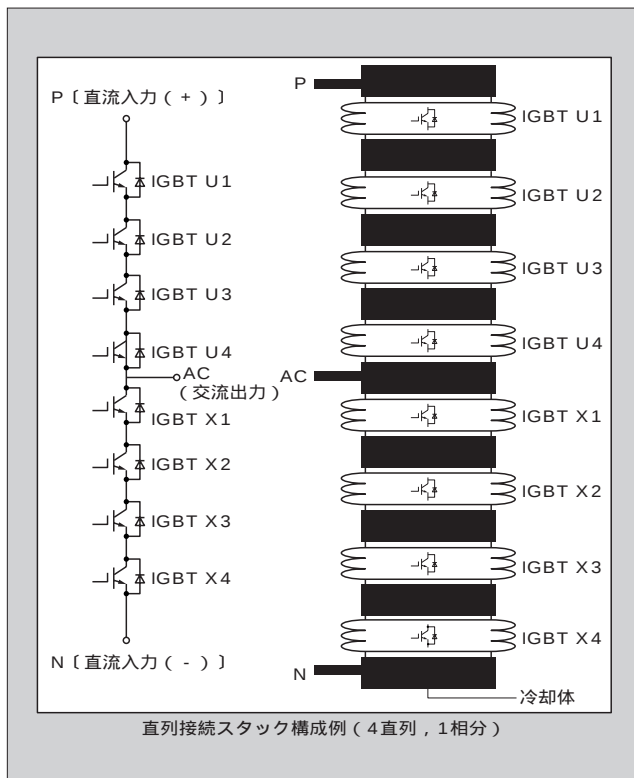
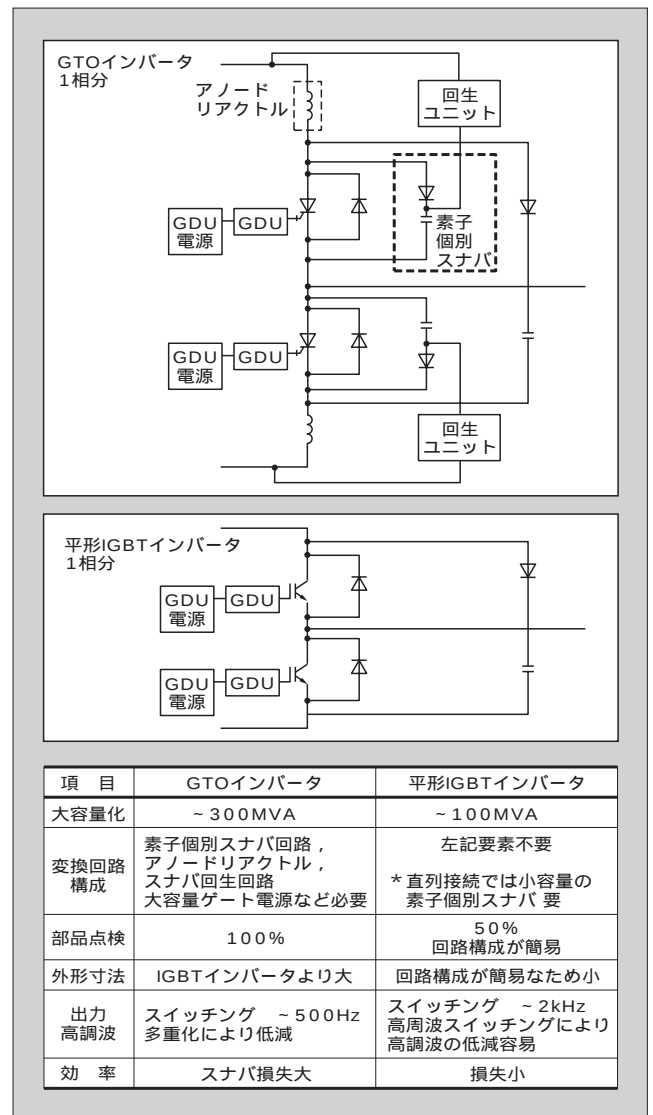


図 16 GTO インバータと平形 IGBT インバータの比較



うえでは平形圧接構造が有利である。図15に直列接続スタック構成例を，図16にGTOインバータと平形IGBTインバータの比較を示す。

平形IGBTの活用により大容量変換装置の分野においても現状よりさらに経済的で高機能，高性能なシステムが実現できる。

## 7 あとがき

以上のように電気鉄道の地上設備においても、さまざまな手法を駆使して諸対策や補償効果を実現している。地球温暖化防止が重要課題となっている昨今、省エネルギーで地球環境に調和した装置を創出していくことがわれわれの使命である。

今後とも電気鉄道の車両・地上両システムを十分考慮した最適システムの構築に注力していく所存である。

最後に各装置の適用に際し、ご指導・ご協力いただいた関係各位に深く感謝する次第である。

## 参考文献

- (1) 高調波抑制対策技術指針，JEAG9702-1995，日本電気協会，電気技術基準調査委員会（1995）
- (2) 渡辺昭良ほか：京阪電鉄大津線・GTOサイリスタ式回生電力吸収装置の運転実績，昭和62年電気学会産業応用部門全国大会（1987）
- (3) 高坂憲司・高橋良和：平型 IGBT とその応用，OHM（1998-11）

## 技術論文社外公表一覧

| 標 題                                            | 所 属                                            | 氏 名                                              | 発 表 機 関                            |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|
| 光触媒による低濃度 NOx の除去<br>---- UV 強度および相対湿度の影響 ---- | 富士電機総合研究所<br>"                                 | 西村 智明<br>西方 聡                                    | 第39回大気環境学会年会（1998-9）               |
| 固体絶縁物表面における油中沿面放電の進展2)                         | 富士電機総合研究所<br>"                                 | 仲神 芳武<br>宮本 昌広                                   | 平成10年度電気関係学会北海道支部連合大会<br>（1998-10） |
| 光 ICTS による酸化亜鉛バリスタ単一粒界の評価                      | 富士電機総合研究所<br>"                                 | 田中 顕紀<br>向江 和郎                                   | 第18回電子材料研究討論会（1998-10）             |
| 変電機器への最近の熱流解析技術の適用                             | 富士電機総合研究所<br>"<br>"<br>"                       | 仲神 芳武<br>川西 敬造<br>杉山 修一<br>宮本 昌広                 | 日本機械学会・熱工学部門講習会（1998-10）           |
| インバータ駆動誘導電動機の軸電圧                               | 富士電機総合研究所<br>"                                 | 奥山 吉彦<br>藤井 秀樹                                   | 電気学会回転機研究会（1998-10）                |
| 表皮効果を考慮したかご形誘導電動機の等価回路モデル                      | 富士電機総合研究所                                      | 奥山 吉彦                                            |                                    |
| 固体絶縁物表面における油中沿面放電の進展4)                         | 富士電機総合研究所<br>"                                 | 仲神 芳武<br>宮本 昌広                                   | 電気学会平成10年度基礎・材料・共通部門総合研究会（1998-11） |
| 油浸絶縁流動系における光学的電界測定と電荷挙動                        | 富士電機総合研究所<br>"                                 | 仲神 芳武<br>宮本 昌広                                   |                                    |
| 新しい植物絶縁油の変圧器への適用                               | 富士電機総合研究所<br>"                                 | 仲神 芳武<br>川西 敬造<br>宮本 昌広                          |                                    |
|                                                | 変電システム製作所<br>"                                 | 宮 良一<br>小林 弘志                                    |                                    |
|                                                | "                                              | 高坂 正明                                            |                                    |
|                                                | "                                              | 和田 元生                                            |                                    |
| MOSFET インバータによる大気圧誘導熱プラズマの発生                   | 富士電機総合研究所                                      | 榊原 康史                                            | 日本電熱協会（1998-11）                    |
| SiC デバイスによる電気自動車用パワーエレクトロニクスの新展開               | 富士電機総合研究所                                      | 木下 繁則                                            | 応用物理学会第4回結晶工学セミナー（1998-11）         |
| 1 サイクル高速真空遮断装置の性能検証                            | 富士電機総合研究所<br>"<br>吹 上 工 場<br>"<br>"<br>機器制御事業部 | 磯崎 優<br>昆野 康二<br>藤沢 浩明<br>柴田 和郎<br>菅野 朋人<br>石川 熙 | 電気学会開閉保護研究会（1998-11）               |



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。