

無効電力補償装置

小西 茂雄(こにし しげお)

馬場 謙二(ばば けんじ)

大宮司 充(だいぐうじ みつる)

1 まえがき

近年、パワーエレクトロニクスを駆使した静止形無効電力補償装置 (SVC) は、電力系統において電圧変動抑制、系統安定化、調相、電圧フリッカ抑制、不平衡補償などの目的で電力、産業、電気鉄道の各分野で幅広く適用されている。

本稿では、この SVC の最近の技術動向、変換装置技術および適用例について述べる。

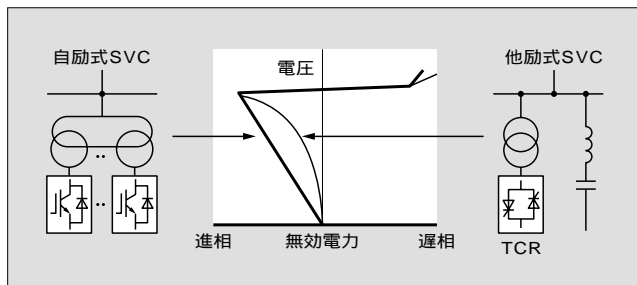
2 SVC の技術動向

SVC には、サイリスタを用いた他励式 SVC および GTO (Gate Turn-Off thyristor) や IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などの自己消弧デバイスを用いた自励式 SVC がある。

代表的な他励式 SVC は、サイリスタ制御リアクトル (TCR) 方式の SVC であるが、富士電機は1970年代にいち早く TCR 方式のフリッカ補償装置を製品化して以来、数多くの製作実績がある。この SVC は比較的廉価なことから現在も多用されているが、制御速度の制約や低次高調波発生などの問題があり、また図 1 に示すように電圧低下領域で SVC の発生無効電力が電圧の二乗に比例して低下する特性を持つ。

これに対して自励式 SVC は、定電流特性を持つため他励式 SVC に比べ電圧低下領域での電圧維持能力が高い。

図 1 SVC の電圧制御特性



また自励式 SVC は、図 2 に示すように系統電圧に対するインバータ電圧の振幅と位相を制御することにより、進相・遅相無効電力だけでなく逆相電力も自由に出力することができ、また高調波補償も可能である。

自励式 SVC は、大容量 GTO の開発を背景に実用化され、電気鉄道用 SVC やフリッカ補償装置などに適用されている。しかし GTO は、図 3 に示すように di/dt 、 dV/dt 耐量の制約からアノードリアクトルや素子ごとの個別スナバが必要であり、またそれらに起因して大きな損失を発生するため効率低下を防止するスナバ電力再生回路が必要となり、きわめて複雑なインバータ構成となる。これに対して最近富士電機が開発した大容量電圧駆動型自己消弧素子である平型 IGBT を適用することにより、周辺回路を大幅

図 2 自励式 SVC の無効電力・逆相電力出力時の動作

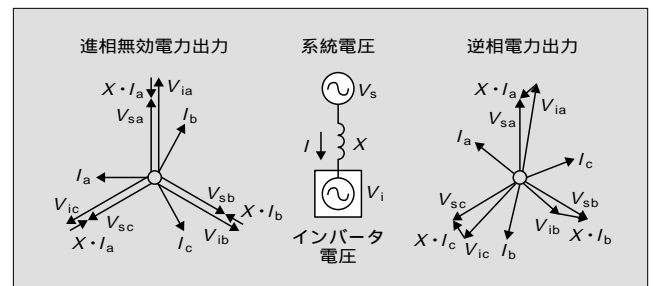
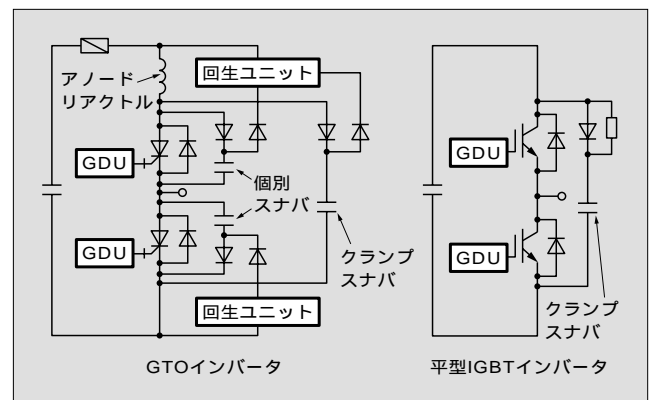


図 3 GTO インバータと平型 IGBT インバータの構成比較



小西 茂雄

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研究所主席研究員。電気学会会員。



馬場 謙二

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、電機システムカンパニー電機・交通システム事業部交通技術第一部主任。電気学会会員。



大宮司 充

パワーエレクトロニクス製品の開発、設計に従事。現在、変電システム製作所パワエレ部。

に簡素化することができ、部品点数、変換装置体積を 1/2 以下にすることが可能となる。

平型 IGBT を適用した小型、高効率、高信頼度、かつ低価格の SVC の実用化により、今後ますます高性能な自動式 SVC の電力系統への適用が進むと考えられる。

③ 変換装置技術

ここでは、無効電力補償装置の変換装置技術について最近の技術動向である IGBT 式変換装置を例にとり、その最新技術、必要技術について述べる。

3.1 ゲート駆動・保護技術

3.1.1 ゲート駆動回路

IGBT は、オンオフの一義的な制御だけではなく、ゲート電圧を制御することによりスイッチングスピードなどきめ細かな制御が可能である。したがって、ゲート駆動回路をいかに構成するかが変換装置の機能・信頼性に大きく影響する。

IGBT 用ゲート駆動回路の代表的な機能ブロック図を図 4 に示す。ゲート駆動回路は、制御装置からの素子点消弧指令を光信号により受信して素子に適合した信号に成形する基本機能のほかに、高信頼性を要求されるシステムの安定した運転や系統事故の波及防止を実現するために以下の機能を持つ。

① 状態監視機能

素子の異常は、素子のコレクタ-エミッタ間電圧により素子状態を監視し、素子状態と点消弧指令との比較により検出している。素子の異常や駆動回路内部の制御電源電圧

に異常が発生した場合には、図 5 に示すように制御装置への返送信号を反転して伝送する。この監視機能により、システムの高速保護を可能としている。

② 短絡保護機能

素子を直列接続していない通常の装置においては、短絡故障が発生した場合に素子に短絡電流が流れたことで生じる電圧上昇を素子電圧監視により検知し、素子にダメージを与えないようにゆっくりとゲート電圧を逆バイアスしてソフト遮断する短絡保護技術を確立した。

素子を直列接続した場合の短絡保護は、現状ヒューズにより行っており、ヒューズレスでの保護方式の確立が技術課題となっている。

③ 素子直列接続時の駆動回路技術

素子を直列接続した高電圧変換装置では、素子間の電圧分担の均等化が問題となるが、素子スイッチングタイミングのばらつきを補正する調整機能や、スイッチングの過渡状態におけるアクティブゲートコントロール機能をゲート駆動回路に持たせることによりこの問題を解決した。また、主回路からゲート駆動回路電源を供給する自己給電方式の採用により、高電圧化に伴う絶縁性能を確保する技術を確立している。

3.1.2 平型 IGBT ケースラプチャ耐量

平型素子は、モジュール型素子に比べ格段に高いケースラプチャ耐量を持つ。しかし、IGBT 適用要件である主回路の低インダクタンス配線化に伴い短絡故障発生時の短絡電流が増大することになり、素子のケースラプチャが懸念された。そこで、実際の短絡故障を模擬した平型 IGBT 素子のケースラプチャ耐量確認試験を実施し、他の構成部品との協調および安全性を確認した。

3.2 スタック構造技術・冷却技術

① スタック構造

平型 IGBT の素子性能を最大限に引き出すためには、素子電極面の均一加圧が必要不可欠である。そして、無効電力補償装置の補償性能向上のため素子を高周波スイッチングする必要があり、このことによる跳上り電圧、発生損失低減のための低インダクタンス配線が要求される。また、装置の運転状態によって素子の発熱状態が変化しスタックは伸縮するが、この場合にも素子内部の圧接力分布を一定

図 4 IGBT 用ゲート駆動回路の機能ブロック図

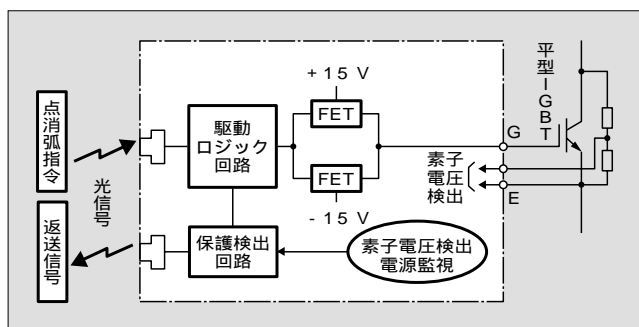


図 5 状態監視信号処理方法

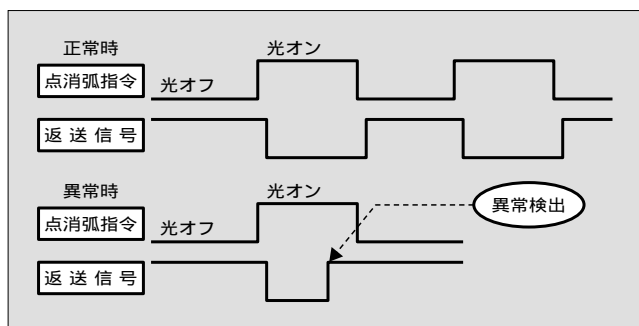


図 6 平型 IGBT スタック

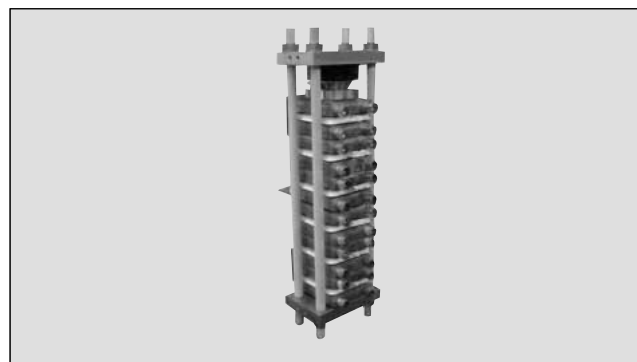
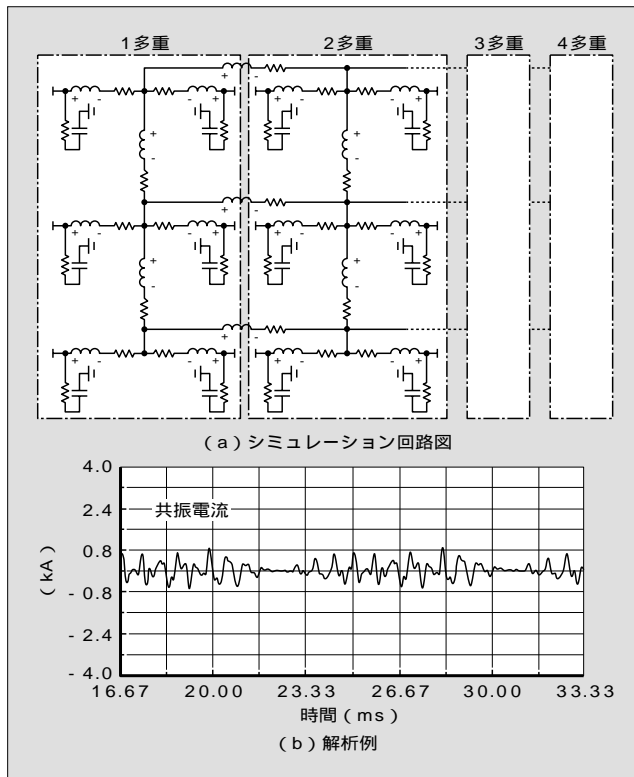


図7 直流共振シミュレーション回路と解析例



とし、この圧力変化に対する耐久性を具備したスタック構造とする必要がある。さらには、高い絶縁性能を有するスタック構造であることが必要である。図6に示す平型IGBTスタックは、これらの要件を満足する構造を採用した一例である。

2. 水冷冷却システム

素子の利用率向上、装置のコンパクト化などのために、発生損失の処理を水冷冷却システムにより行っている。このシステムでは、一次冷却水を純水の閉鎖循環とすることにより高信頼性を確保している。また、高周波スイッチングによる素子の発生損失増大に対処すべく、素子の新型冷却体を開発し、0.005 K/W という高い熱処理能力を実現した。

3. 直流共振防止

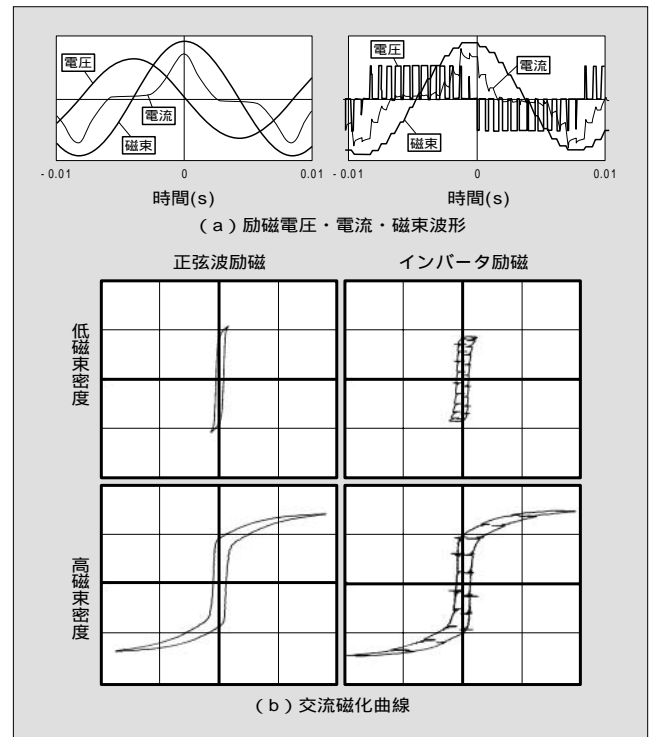
変換装置は、系統電圧に対抗する電圧発生のために電圧源となる直流コンデンサを持つ。このコンデンサは、構造上分散配置を余儀なくされ、コンデンサ電圧差や回路定数によっては直流共振現象を引き起こす。この現象解析のために、分布する直流コンデンサや銅バー配線などをモデル化して直流共振シミュレーションを実施した。解析結果を構造に反映させることで直流共振を防止している。図7にシミュレーション回路図と解析例を示す。

3.3 多重変圧器技術

1. 鉄心設計

SVC用多重変圧器は、系統励磁の際の多重間電圧分担の平衡化のためにギャップ付き鉄心構造を採用している。このため、振動と騒音を抑制するために連結ボルトを用い

図8 正弦波励磁とインバータ励磁の比較



通常の変圧器に比べより強固な締付け構造としている。

また、インバータによって励磁される変圧器は、方形波状のPWM (Pulse Width Modulation) 電圧波形が印加されるため、正弦波励磁に比べ鉄心責務が過酷になる。この検証のため、正弦波励磁とインバータ励磁の場合の損失特性、飽和特性、直流偏磁特性などの基礎データを取得している。図8は、この比較検証結果の一例である。これらの実験データに基づき、SVCの進相運転時の過励磁条件や偏磁制御精度などを考慮して最適な磁束密度の決定を行い、装置の信頼性と小型化の両立を図っている。

2. 冷却設計

インバータで励磁される多重変圧器は、通常の変圧器に比べ励磁損失が20～30%増加すること、またギャップ付き鉄心構造に起因して鉄損や励磁電流が大きくなることなど、鉄損・銅損の増加要因が幾つかある。

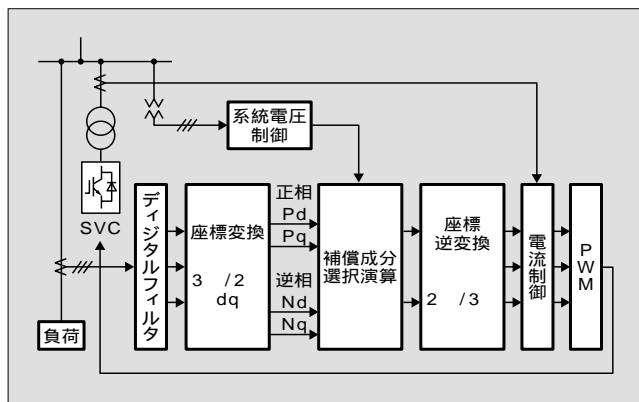
このため、これらの損失増加を考慮し、また構造上熱集中が起こる部位には冷却ダクトを適正配置することなどにより冷却構造の最適化を行っている。

3.4 制御技術

自励式SVCの制御装置には、最新のCPU、DSPを適用した全デジタル制御システムを採用しており、高速・高精度制御だけでなく、自己診断やトレースバック機能など信頼性・保守性に優れたシステムを実現している。

図9に自励式SVCの制御ブロック図を示す。系統電圧制御、変動負荷補償、フリッカ補償など目的に応じてより効果的な補償を実現するため無効電流、過渡有効電流、逆相電流、高調波電流などの補償成分を選択演算し、これを指令値としてフィードフォワード制御を併用した高速電流

図9 自動式 SVC の制御ブロック図



制御回路によって出力電流制御を行い、補償性能の高性能化を実現している。

④ SVC の適用例

4.1 産業用 SVC

産業用の電気設備では、大容量の機器が多く使用されており、かつ頻繁な負荷の変化に応じて運転されるため、それらが接続される電源系統に対して無効電力変動障害（電圧変動）を引き起こすことがある。このような特性を持つ負荷の代表例としては、製鋼用アーク炉、圧延機、溶接機などがあげられる。

電圧変動によって照明、テレビのちらつきを起こす障害は特に「フリッカ障害」と称し、一般的な電圧の変動と区別されている。産業用電気設備のうち、製鋼用アーク炉は容量の大きさ、無効電力変動周波数、三相不平衡ともにフリッカが発生しやすい条件に合致しており、大半の炉が何らかの対策装置を具備している。

従来、フリッカ補償装置としてはサイリスタを使用した他励式装置が一般的に適用されてきたが、パワーエレクトロニクス分野でのデバイス技術と応用技術の急速な進歩により GTO、IGBT といった自己消弧形素子を使用した自動式補償装置が主流を占めるようになってきている。

以下、他励式装置と自動式装置の概要と適用例について紹介する。

4.1.1 他励式フリッカ補償装置

図10に TCR 方式のフリッカ補償装置（SFC）の原理図を示す。この SFC は、負荷と並列に接続されたリアクトルの遅相無効電力（ Q_L ）を、負荷の遅相無効電力（ Q_F ）との合成値が一定になるようにサイリスタによって制御し、この遅相無効電力をコンデンサの進相無効電力（ Q_C ）で補償することにより、系統から供給される無効電力（ Q_S ）を最小かつ安定した値とすることで電圧変動の抑制を行うものである。一般にコンデンサには、サイリスタなどの発生する高調波電流を吸収するフィルタ機能を持たせるのが普通であり、コンデンサとリアクトルの相対量の選定によって進相・遅相の調整範囲が決められる。

本装置は、大容量器として経済性に優れており百数十

図10 TCR 方式フリッカ補償装置の原理

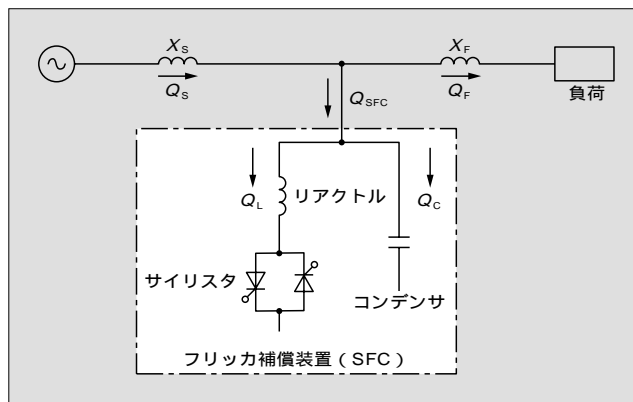
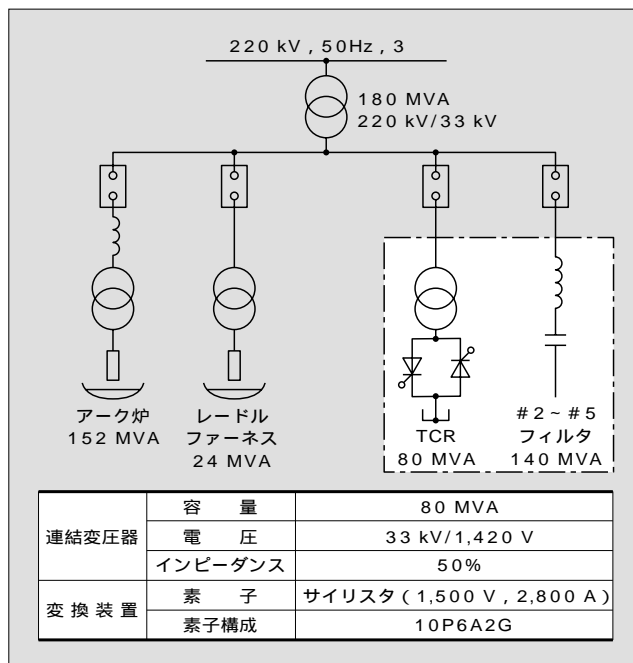


図11 TCR 方式フリッカ補償装置の設置系統例と仕様



MVA の容量まで実用化されている。また、自動式装置や同期調相機を並列設置してハイブリッドシステムとして使用されることも多い。

図11は、製鋼アーク炉のフリッカ対策用に設置された TCR 方式のフリッカ補償装置適用例である。低圧大電流サイリスタを使用した 80 MVA の TCR と合計 140 MVA の補償コンデンサで構成されており、アーク炉とレードルファーンネスの発生するフリッカを 53 % 以下に抑制し、受電力率を 0.95 以上としているとともに、コンデンサを第 2 調波から第 5 調波のフィルタ構成とすることによって各炉および TCR から発生する高調波を規制値以内に抑制している。

4.1.2 自動式フリッカ補償装置

自動式フリッカ補償装置は、自己消弧形素子（GTO、IGBT）を使用して PWM 制御による高速な瞬時電流制御を採用しており、基本波無効電力補償だけでなく逆相電力補償・高調波補償（アクティブフィルタ）機能を有するため、他励式装置に比べ高いフリッカ補償性能が得られる。

また、遅相・進相両極性の出力が可能であるため補償容量に対し装置容量が 1/2 以下で済み、必要進相コンデンサ（高調波フィルタ）容量を低減できるので、補償システム全体として省スペース化を図ることができる。

1 GTO 式フリッカ補償装置の適用例

図12に GTO 素子を使用した自励式フリッカ補償装置の設置系統例を示す。

本システムは、154 kV から 20 kV に降圧する降圧変圧器と、この 20 kV ラインに接続された 13 MVA の補償装置 2 セット、およびそれに付属する 2 MVA 高周波フィルタで構成されている。

補償装置は、大容量逆導通 GTO (4.5 kV, 3 kA) を適用した単相インバータ 3 台で三相 1 多重インバータを構成し、さらにその三相インバータ 6 台を変圧器により直列多重接続して構成されている。この多重変圧器には移相巻線を設けておらず、PWM 変調の三角波キャリア信号の移相によって多重化を行っている。

また、高調波フィルタはインバータのスイッチングに起因する高次高調波電流を吸収するハイパスフィルタであり、20 kV ラインのケーブルやアブソーバなどの焼損を防止する目的で設置している。

インバータの直流コンデンサ容量は、通常無効電力や逆相電力出力時の直流リップル電流に対して直流電圧変動が規定値以下となるように決めているが、本装置では通常の設計より直流コンデンサ容量を増強して過渡的な有効電力変動分も補償できるようにすることでフリッカ補償性能の大幅な向上を図っている。本装置のフリッカ改善効果を図13に示す。フリッカ改善目標である改善率50%以上の性能を達成し、フリッカを規制値以下に抑制している。

2 平型 IGBT 式フリッカ補償装置の適用例

図14に平型 IGBT 素子を使用した自励式フリッカ補償装置の設置系統例を示す。

本システムの場合，既存設備として2台のTCR（15

MVA + 25 MVA) があり、これに 12 MVA の自励式補償装置を増設してハイブリッドシステムを構成している。

補償装置は、平型 IGBT (2.5 kV, 1.8 kA) を適用した単相インバータ 3 台で三相 1 多重インバータを構成し、4 台の三相インバータを変圧器により直列多重接続して構成されている。

図15にフリツカ補償装置用平型 IGBT モジュールの外観を示す。このモジュールは、単相インバータの4個の平型 IGBT、駆動回路、クランプスナバ、および直流コンデンサを組み込み、コンパクトな構成を実現している。

なお、本装置は現在製品製作中であり2001年8月に運転開始予定である。

4.2 電気鉄道用 SVC

電気鉄道用の無効電力補償装置としては、新幹線変電所においてき電系統側に設置され電圧変動補償を行う他励式単相 SVC と三相系統側に設置され無効電力・不平衡電力の補償を行う自励式 SVC が適用されている。これまで東海道新幹線の電源増強の一つとしてこれらの装置が複数箇所に設置されてきた。富士電機はすでに GTO を適用した単器容量 + 17 MVA の自励式 SVC を東海道新幹線新米原

図 13 フリッカ改善効果

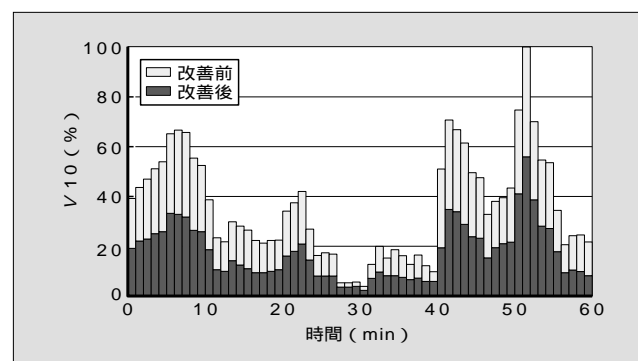


図 12 GTO 式フリッカ補償装置の設置系統例と仕様

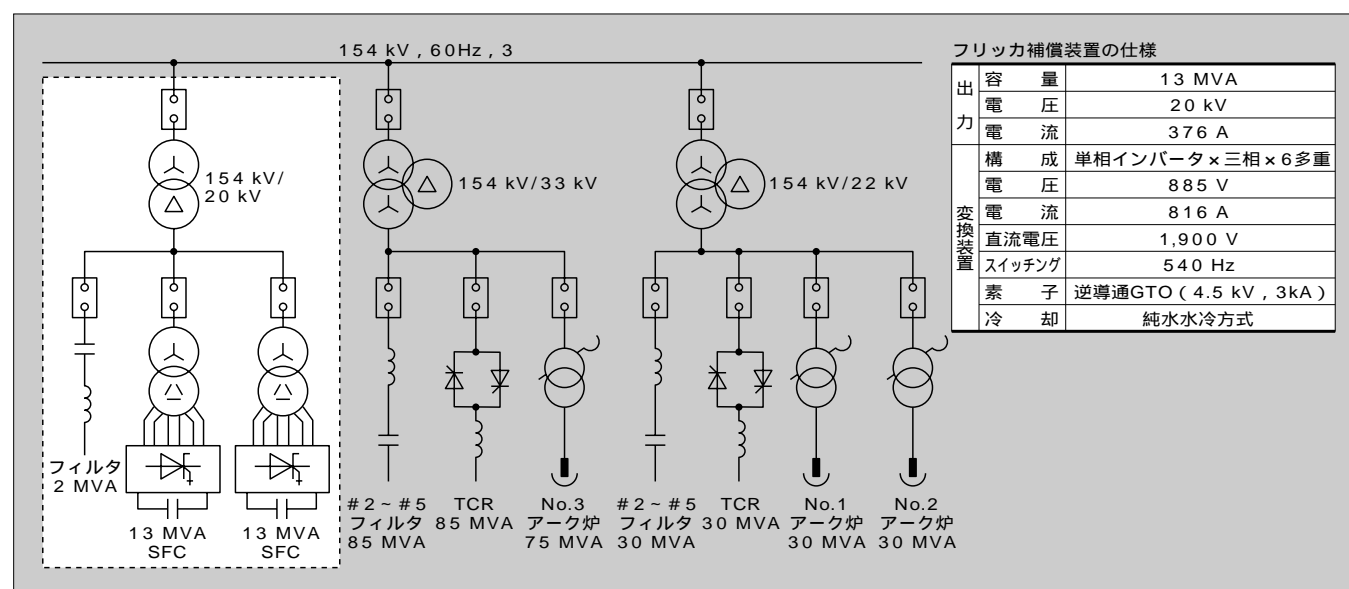


図 14 平型 IGBT 式フリッカ補償装置の設置系統例と仕様

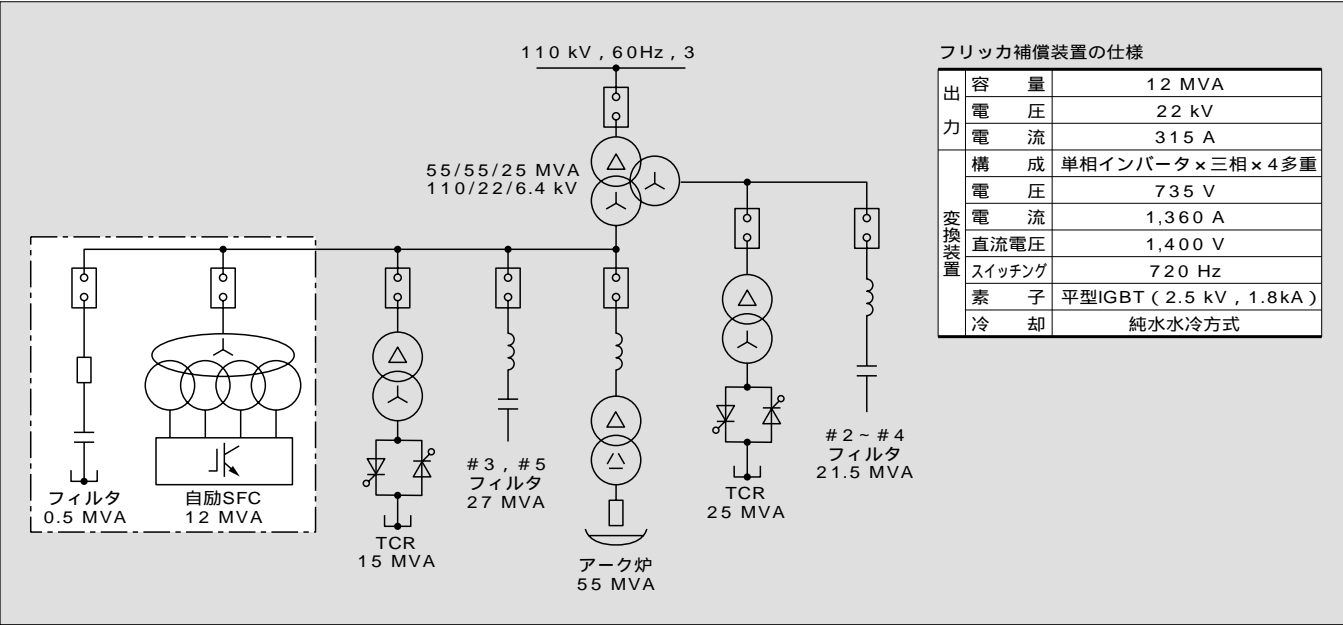


図 15 フリッカ補償装置用平型 IGBT モジュールの外観

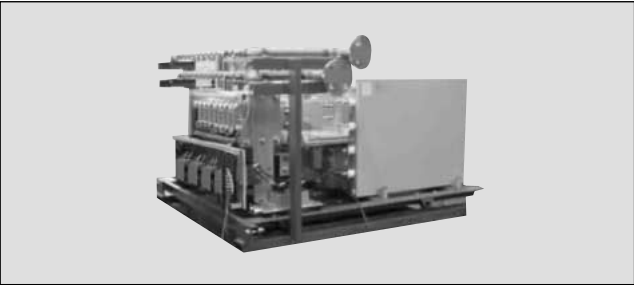
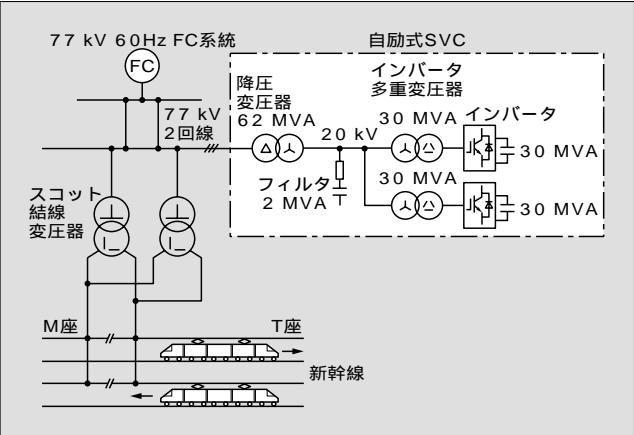


図 16 自励式 SVC の全体システム構成



変電所に納入しており運転実績を有している。今後、小型・高効率・簡素化を指向する自励式 SVC を提供することを前提に平型 IGBT を適用した単器容量 ±30 MVA クラスの大容量自励式 SVC の開発および適用検討を進めている。以下にそのシステム概要について紹介する。

図16に三相自励式 SVC の全体システムを、表 1 に概略

表 1 自励式 SVC の概略仕様

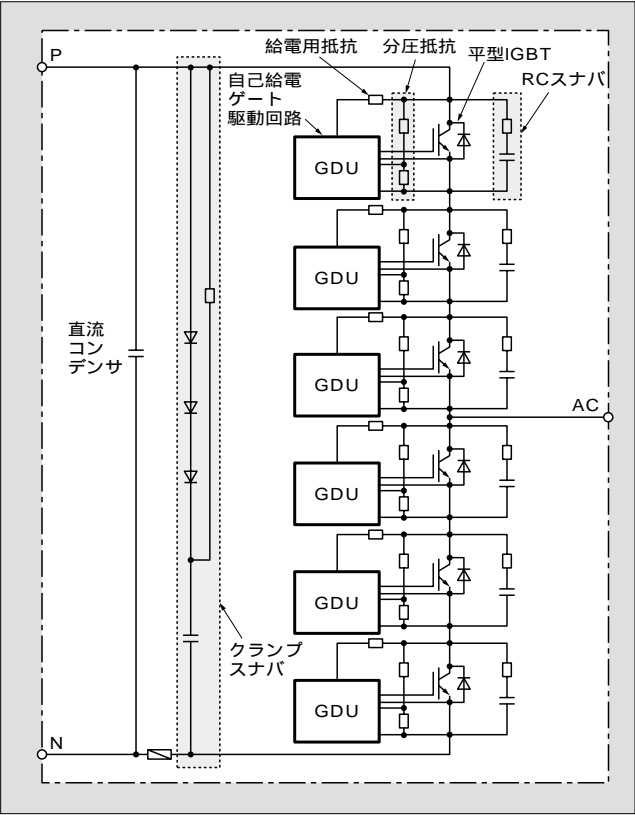
項 目		仕 様
系 統 電 圧		三相，60 Hz，77 kV
シ ス テ ム 容 量		進相62 MVA～遅相58 MVA
インバータ	変換器形式	電圧形多重インバータ 単相インバータ×三相×4多重（48相）
	変換器容量	30 MVA/バンク×2
	素 子	平型IGBT 2.5 kV，1.8 kA
	冷 却 方 式	送水風冷（純水冷却）
	制 御 方 式	12パルス PWM 無効電力，逆相電力補償制御
多 重 変 圧 器		30 MVA，三相 20 kV/1.95 kV 人/オープン△×4多重，送油風冷
降 圧 変 圧 器		62 MVA，三相 77 kV/20 kV △/人，送油風冷
高調波フィルタ		95，97次除去用CRフィルタ

仕様を示す。この SVC システムは，77 kV の三相系統側に設置され新幹線の発生する無効電力と不平衡電力を補償することにより電圧変動抑制を行うものであり，調整容量は進相 62 MVA から遅相 58 MVA である。自励式 SVC は，進相 / 遅相 30 MVA の変換装置 2 バンクからなり，適用デバイスとして 2.5 kV，1.8 kA 平型 IGBT を採用した 4 多重構成の装置である。

図17に上記平型 IGBT を 3 個直列接続した上下アーム 1 相分を組み込んで構成された試作モジュールの回路構成を示す。また，図18に外観，表 2 に仕様を示す。

今後，この試作装置のブラシアップを図り，高性能，高機能，かつ品質の優れたシステムの実現に向けて製品設計を行う予定である。

図 17 平型 IGBT 3 直列モジュールの構成



5 あとがき

SVC は、多様化が進む電力系統において電力品質の維持・向上のために今後ますます重要な役割を果たすものと考えられる。富士電機は、今後も豊富な経験と最新技術を駆使してニーズに適合した高性能な SVC を提供していく所存である。

最後に、SVC の適用にあたりご指導・ご協力をいただいた関係各位に対し深く感謝する次第である。

図 18 試作モジュールの外観

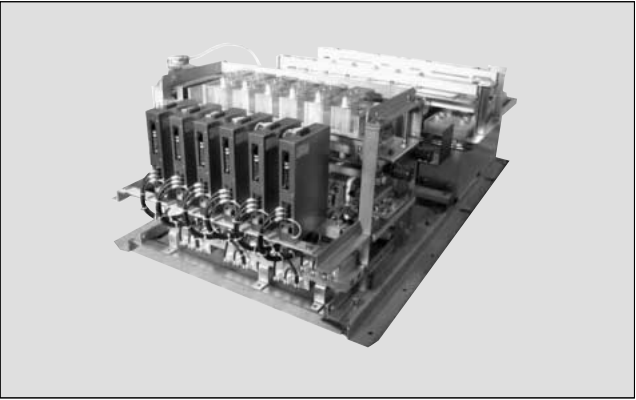


表 2 試作モジュールの仕様

項 目	仕 様
直 流 電 圧	3,600 V \pm 10%
出 力 電 圧	1,950 V
適 用 素 子	平型 IGBT 2.5 kV, 1.8 kA
素 子 構 成	3S1P2A
ゲート駆動回路電源給電方式	自己給電
冷 却 方 式	送水風冷（純水冷却）

参考文献

[1] 高坂憲司，高橋良和．平型 IGBT とその応用．OHM．vol.85，no.11，1998，p.90-94．
[2] 真野紳一ほか．フリック補償装置用自励式無効電力補償装置の開発．平成 7 年電気学会産業応用部門大会．no.190，1995．
[3] 江口直也ほか．不平衡補償機能付き自励式 SVC 制御方式の開発．電気学会論文誌 D．vol.114，no.4，1994．
[4] 牧野喜郎ほか．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．富士時報．vol.72，no.2，1999，p.104-110．