

斎藤 涼夫 色川 彰一 池田 博
S. Saito S. Irokawa H. Ikeda

電力系統へのパワーエレクトロニクス装置の導入が進んでいる。他励式変換器では大容量光トリガサイリスタを使用して装置の小型化、高効率化が図られる一方、今後の電力系統の安定化、効率的な運用に寄与できる FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 装置のキー技術として自励式変換器の研究開発を進めている。具体的には高電圧大電流素子の開発による装置の小型化、新方式瞬時ベクトル制御により系統事故時でも運転継続できる制御の高速化、そして新方式多重化ベクトル制御により装置の大幅な低損失化を実現することを目ざしている。これらの開発の概要と、FACTS 装置の適用例として自励式直流送電・自励式位相調整器による電力の安定化効果の例を示した。

In the field of line-commutated converters, remarkable progress has recently been made toward converters of smaller size and higher efficiency by using large-capacity light-triggered thyristors. Furthermore, research and development is progressing of a self-commutated converter which can contribute to the stabilization and effective operation of AC power systems such as equipment for flexible AC transmission systems (FACTS).

This paper describes the development of high-voltage/large-current power devices, in order to construct converters of small size; the investigation of a new space vector control based on the instantaneous value of the line voltage, in order to realize faster response in current regulation resulting in improved capability for continuous operation; and the investigation of a new space vector control in multiple converter systems, in order to significantly reduce converter loss.

1 まえがき

当社の電力分野におけるパワーエレクトロニクス技術の発展は、1969年に100kVサイリスタバルブを開発したことに始まる。その後着々と開発が進み、最近では1,000MWを超える大容量装置の製作が可能となり、ますます電力系統への適用が拡大していくものと期待されている。

電力系統は今後も交流を主体に計画・整備されていくものと思われるが、新技術を駆使して研究開発された他励式・自励式変換器が電力系統で果たす役割の重要性はさらに増していくと考えられる。その理由はこれらの装置によって有効・無効電力が高速に制御でき、系統の安定化・効率的運用に寄与できるからである。特に最近はその効果がFACTS装置として議論されており、一部ではすでに研究の成果^{(1),(2)}あるいは実際の導入例⁽³⁾が報告されるに至っている。

当社はFACTS装置として適用できるよう自励式変換器の高性能化のための研究開発を推進している。図1に電力系統へ導入が期待されているFACTS装置を示す。

2 電力系統へのパワーエレクトロニクス装置の適用

電力系統に接続されるパワーエレクトロニクス装置ですでに実用化されているものとしては、直流送電、SVC(無効

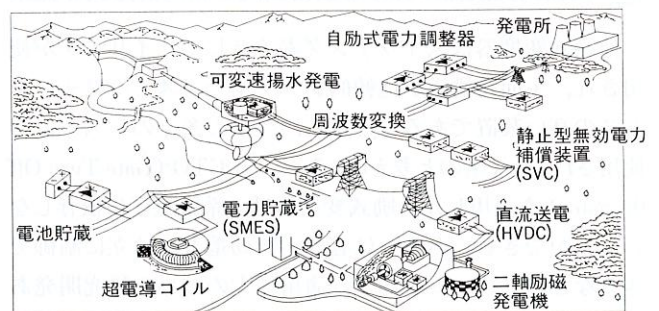
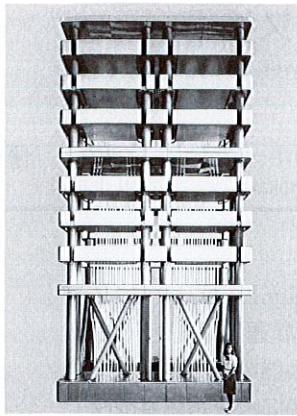


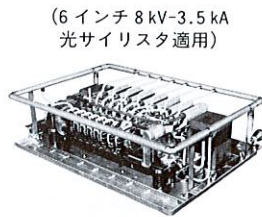
図1. 電力系統へのFACTS装置の導入 FACTS装置は有効・無効電力を高速に制御して、系統の安定化と効率的な運用に寄与する。
FACTS equipment to be connected to AC power systems

電力補償装置)、可変速揚水発電システム、燃料電池用インバータなどがある。これらの装置は大容量であることが一般的で、今日までその多くの装置が他励式変換器で実現されている。

最近の直流送電としては、関西電力㈱、四国電力㈱、電源開発㈱で最終容量±500kV-2,800MWの紀伊水道直流連系が計画されている。この計画に向けて共同研究で開発した500kVサイリスタバルブおよびこれに使用するサイリスタモジュールを図2に示す。世界最大容量8kV-3,500A光トリガサイリスタ⁽⁴⁾の採用により、従来のサイリスタバ



500 kV-4 重バルブ



サイリスタモジュール

図2. 高電圧大容量サイリスタバルブ 大容量光トリガサイリスタの採用で、サイリスタバルブの大幅な小型化、低損失化を達成した。
High-voltage, large-capacity thyristor valve

バルブに対し MW 当たりの体積を 62%，損失を 72% に低減した高性能な他励式変換器である。また、この直流送電システムの高速制御性を活用することにより、交流基幹系統で事故が発生した場合でも遠方の発電機位相角の動揺を早期に収束できるなどのシステム的なメリットも期待されている。

3 自励式変換器における技術動向と新制御方式の提案

他励式変換器はスイッチング素子としてサイリスタが使用され、主回路構成が比較的シンプルでコストパフォーマンスの高い装置であることから、今後も多くのシステムで使用されていくものと考えられる。一方 GTO (Gate Turn Off thyristor) を適用した自励式変換器は、系統電圧に依存しない運転ができる、あるいは有効・無効電力が独立に制御できるなどのメリットがあり、適用拡大のための研究開発あるいは一部で導入が行われている。当社は東京電力(株)と共同研究で SVC 用の 50 MVA 大容量 GTO 変換器を開発し、新信濃変電所で検証試験を完了している。

現在、300 MW クラスの高電圧大容量自励式変換器システムを旨として研究開発を進めているが、開発のねらいと施策を図3に示す。主回路の高電圧化、装置の小型化、回路の低損失化、制御の高速化をねらった施策として高電圧大電流素子の開発、新制御方式の研究について以下に述べる。

3.1 高電圧大電流素子の開発

高電圧大容量自励式変換器の小型化をねらった施策として高電圧大電流素子の開発がある。GTO は特性的に高電圧・大電流の用途に向いており、1976年に当社が大容量化に着手して以来、逐次定格容量が大きくなってきた。最近では世界最大容量 6 kV-6 kA GTO の開発を完了し、装置の小

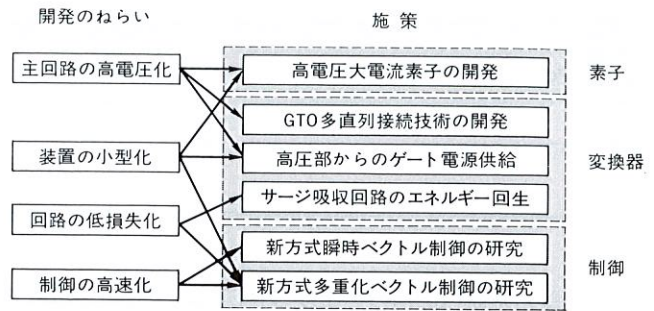


図3. 高電圧大容量自励式変換器の開発 300 MW クラスの高電圧大容量自励式変換器システムを旨として、研究開発を進めている。
Development of high-voltage, large-capacity self-commutated converter

型化、部品削減による信頼性向上に寄与している。電力用自励式変換器への大容量 GTO の適用は現在の主流であり、今後も続くものと考えられる。

さらに数年後以降の電力素子に関する技術動向としては、ゲート電力を低減すること、あるいは素子および素子周辺回路の損失を減らしてスイッチング周波数を上げるニーズがさらに強くなることが予測される。次世代電力素子として高耐圧で電圧駆動型ゲートをもち、高速スイッチングができる素子を旨として開発を推進している。

3.2 新制御方式 (1)

自励式変換器の制御の高速化をねらった施策として新方式系統瞬時電圧ベース空間ベクトル制御 (以下、瞬時ベクトル制御と略記) の研究がある。新方式瞬時ベクトル制御は、系統あるいは自励式変換器の三相電圧・電流を空間ベクトルとして扱い、自励式変換器の出力電圧ベクトルを調整することにより出力電流を自由に制御する方式である。現在の電圧制御は三相の交流電圧波形の基本波位相に注目した制御を行っているが、激しい系統動揺では位相の正確な検出が困難な場合もある。このような動揺でも電圧・電流を瞬時値として扱うことにより安定した運転継続を旨とする研究である。

瞬時ベクトル制御の例として、図4に示す交流系統と自

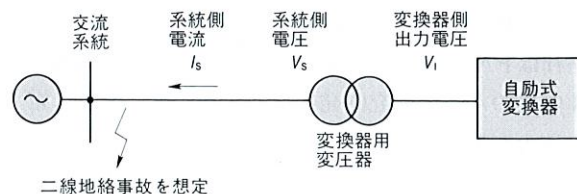


図4. 交流系統と自励式変換器による構成 交流系統と自励式変換器の間には、変換器用変圧器が設けられている。

System configuration including AC power systems and self-commutated converter

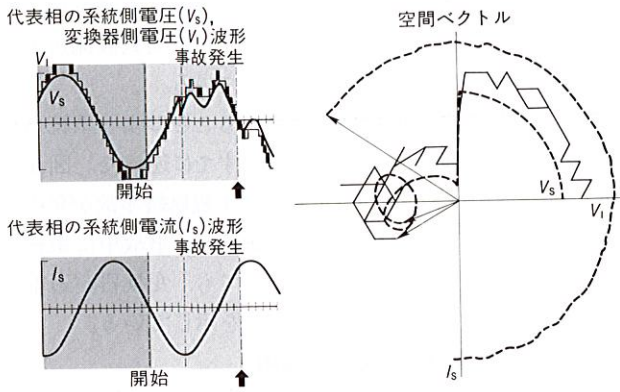


図5. 系統事故時の電圧・電流波形と空間ベクトルの動き 瞬時ベクトル制御により変換器の動作が系統電圧の過渡的变化にすばやく追従し、電流を正弦波に制御している。

Voltage and current waveforms, and behavior of space vectors at 2LG (two lines ground)

励磁変換器の構成で、二線地絡のような厳しい事故が発生した場合の瞬時電流制御を考える。このときの動作をシミュレーションし、その結果である電圧・電流波形と空間ベクトルの軌跡を図5に示す。指令値どおりの正弦波電流が流れ、運転継続性能が向上していることが理解できる。

3.3 新制御方式(2)

回路の低損失化とそれによる装置の小型化をねらった施策として新方式多重化ベクトル制御の研究がある。新方式多重化ベクトル制御は電力素子のスイッチング回数を可変にすることにより、定常時はスイッチング回数を少なくして変換器の損失を大幅に低減する制御方式である。電力系統で使われる大容量変換器は通常多重化構成で実現されているが、現在の多重化PWM(Pulse Width Modulation)制御では1台1台の変換器で個別にPWM制御するため、多重化変換器全体では必ずしも必要最小限のスイッチング回数とはなっていない。多重化ベクトル制御では図6に示されるように、たとえば8台の単位変換器からなる多重化変換器

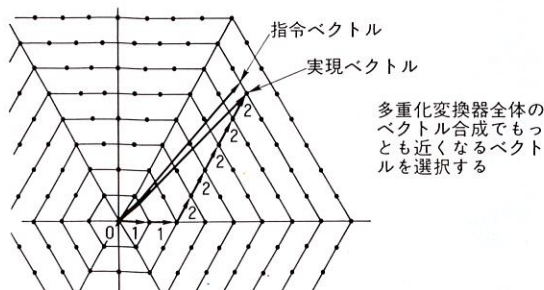
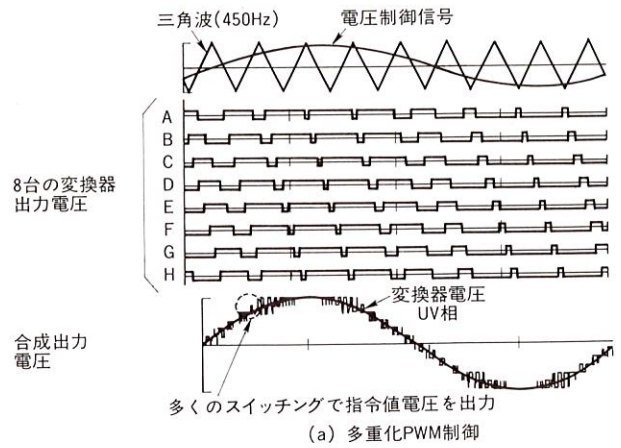


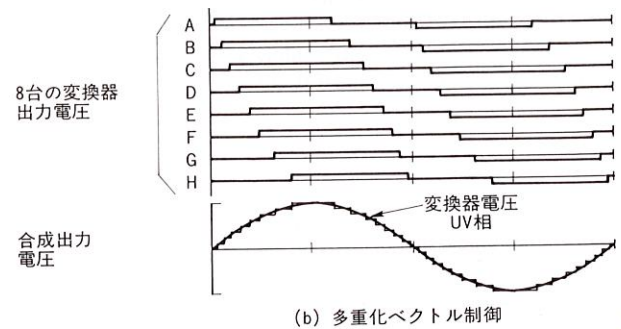
図6. 多重化ベクトル制御におけるベクトルの実現 指令ベクトルにもっとも近いベクトルを決め、しかも合成の組合せ自由度で最適となるパルスを選択する。

Realization of output voltage vector by space vector control in multiple converter system

大容量化と電力系統への適用が進むパワーエレクトロニクス技術



(a) 多重化PWM制御



(b) 多重化ベクトル制御

図7. 制御方式による出力電圧波形の比較 多重化ベクトル制御では、多重化PWM制御に比べ少ないスイッチング回数で目的の出力電圧波形を得ている。

Comparison of output voltage waveforms by space vector and PWM controls in multiple converter system

換器全体で見ても最適なパルスを選択するため、不要なスイッチングを省くことができる。両者の制御による出力電圧波形の比較を図7に示す。

電力素子のスイッチング回数が減り損失が大幅に低減することは、装置の小型化などに多大の効果がある。また、不要なスイッチングをなくすことは低い直流電圧で同じ交流電圧を得ることができ、電力素子の直列接続数が減らせ装置の小型化にも貢献することが期待される。

4 電力系統の安定化に寄与するFACTS装置の研究

FACTS装置はパワーエレクトロニクスとコンピュータ制御技術によって電力系統における交流電圧の振幅と位相、およびインピーダンスを自由に制御するものと定義される。FACTS装置導入のねらいは電力系統の安定化と効率的運用であると上述したが、自励式変換器を適用することによりさらに高いレベルでこれを達成しようとしている。FACTS装置としてはさまざまな装置が研究されているが、自励式直流送電と自励式位相調整器について紹介する。

4.1 自励式直流送電への適用

自励式直流送電は系統間の電力融通を高性能に行うため

のもので、その特徴は有効・無効電力を独立して制御できることにある。この例をシミュレーションした結果を図8に

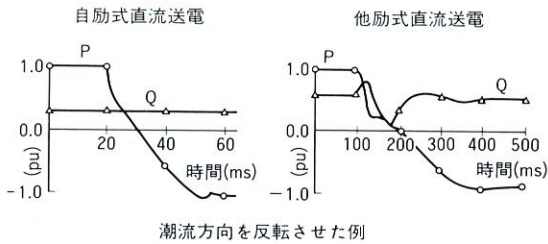


図8. 直流送電における潮流反転動作の比較 自励式直流送電では通過する有効電力(P)と両端の無効電力(Q)が独立して制御できる。

Comparison of power reversal behavior in line- and self-commutated high-voltage DC transmissions

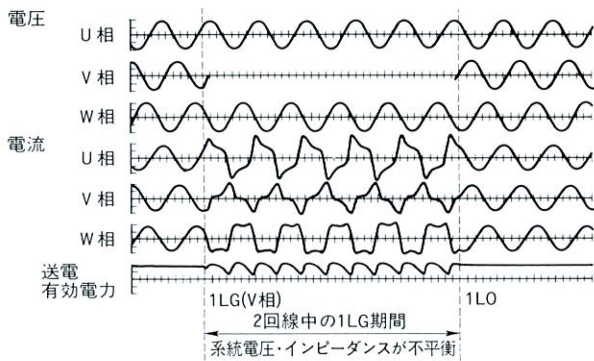


図9. 自励式直流送電による運転継続性能の向上 瞬時ベクトル制御の適用により、系統事故時にも変換器が過電流にならずに、運転継続性能が向上している。

Improved capability for continuous operation realized by self-commutated high-voltage DC transmission

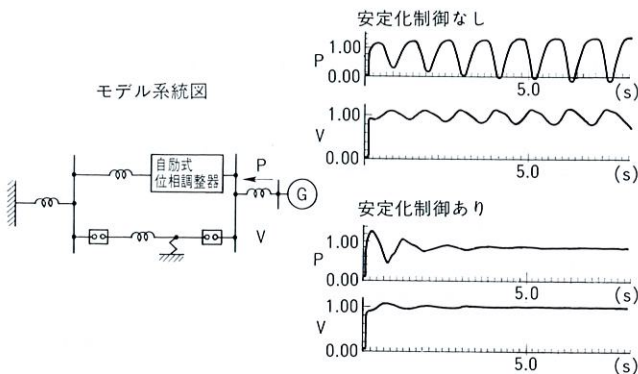


図10. 自励式位相調整器による安定化制御の効果 自励式位相調整器の安定化制御が、一線地絡時に発生する発電機の動揺に対して制御効果がある。

Effect of stabilization control realized by unified power flow controller

示す。他励式直流送電では実際の運用方法から潮流を反転させる際に無効電力が変動しているが、自励式直流送電では独立して一定に保てることを示している。

また、瞬時ベクトル制御を適用することにより系統事故時の運転継続性能が向上することはすでに述べた。図9は2回線の送電ルートにおいて1回線に1線地絡事故が発生した場合のシミュレーション結果であるが、事故中に系統電圧・インピーダンスが不平衡となっても、変換器が過電流にならずに送電を継続していることを示している。

4.2 自励式位相調整器への適用

直列補償要素と並列補償要素を併せてもつ自励式位相調整器は、電圧の振幅・位相、およびインピーダンスの調整による多機能な系統安定化装置である。図10には系統事故時の発電機動揺抑制についてシミュレーションした結果を示すが、安定化に効果のあることが理解できる。

5 あとがき

パワーエレクトロニクス技術を活用することにより、系統安定化の向上、系統事故時の運転継続、系統の効率的運用に貢献できるものと考えられる。特に自励式変換器の導入により関連機器を含めた装置容量、設置スペース、損失、制御性能の面から高い経済性が得られるメリットを出していきたい。

文献

- (1) H. Naitoh, et al: A Snubber Loss Free Current Source Converter for High Power Use, CIGRE (1995)
- (2) 萩本和彦, 他: スナバーエネルギー再生方式 GTO 変換器の開発, 電気学会 B 部門大会 pp.267-292 (1994)
- (3) 常盤肇生, 他: 電力系統用自励式 SVC の開発, 電気学会 113-B, 2, pp.168-176 (1993)
- (4) T. Nimura, et al: A 8kV 3500A Light Triggered Thyristor, ISPSD, pp.181-184 (1995)



斎藤 涼夫 Suzuo Saito

重電技術研究所エレクトロニクス技術開発部部长。
パワーエレクトロニクス装置の研究開発に従事。電気学会
会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



色川 彰一 Syouchi Irokawa

電力事業部電力変電技術部主幹。
直流送電、静止型無効電力補償装置のシステムエンジニア
リング業務に従事。電気学会、IEEE 会員。
Power Systems Div.



池田 博 Hiroshi Ikeda

府中工場ドライブシステム部部长。
パワーエレクトロニクス装置の開発設計に従事。電気学会、
プラズマ・核融合学会会員。
Fuchu Works