

電力システムへの自励式インバータの適用

Application of Self-Commutated Inverters to Electric Power Systems

金井 丈雄
T. Kanai

石月 照之
T. Ishizuki

川上 紀子
N. Kawakami

色川 彰一
S. Irokawa

パワーエレクトロニクス技術の進歩に伴い、広域連系強化のための直流送電、系統電圧安定化のための静止形無効電力補償装置(SVC)など、電力システムへのパワーエレクトロニクス装置の適用が拡大してきている。これまでではサイリスタによる他励式変換器が主体であったが、GTO(Gate Turn Off thyristor)のように自己消弧機能をもったデバイスの大容量化により、今後さらに適用が拡大するものと期待される。自励式変換器は技術課題もあるが、系統条件への依存度が少ないので、制御の自由度が高い、機器をより小型化できるなどの多くの利点をもっている。ここでは、最近電力システムに適用された自励式変換装置である可变速揚水発電電動機の励磁用GTO変換器と自励式SVCの概要を説明し、適用されている技術を紹介する。

The remarkable development of power electronics technologies has enabled the wide application of various types of equipment in electric power systems. Typical examples are high-voltage DC (HVDC) transmission systems for prompt power exchange, and static var compensators (SVCs) for improving voltage stability. In particular, further demand will be created for self-commutated converters using self-turn-off devices such as gate turn-off thyristors (GTOs), due to their advantages such as reduced dependence on system conditions, increased controllability, compactness, and so on.

This paper outlines two self-commutated converters which were recently applied to power systems: a GTO converter for an adjustable-speed generator-motor, and one for a large-capacity self-commutated SVC.

可变速揚水発電電動機励磁用GTO変換器 GTO Converter for Adjustable-Speed Generator-Motor

テムの実現には、高速デジタル制御技術、大容量回転機製造技術とともに高電圧大容量パワーエレクトロニクス技術の進歩が重要な位置を占めている。

1 まえがき

揚水発電所において発電電動機を可变速運転し系統の周波数制御を行う可变速揚水発電が脚光を浴びている。当社は他社に先駆けサイクロコンバータを使用した可变速揚水発電システムを実用化した。その後、GTOの大容量化により、この分野にも自励式変換器を適用できるようになった。可变速揚水発電の高性能化を目的に東京電力(株)、電源開発(株)とGTO変換器を使用したシステムを共同で開発し、今回、電源開発(株)奥清津第二発電所に可变速揚水発電電動機励磁用GTO変換器を納入した。

ここでは、このGTO変換器について紹介する。

2 可变速揚水発電システム

可变速揚水発電システムは二次巻線型の誘導機と同一の構造をもつ発電電動機の二次巻線を低周波三相交流電流で励磁することにより、発電電動機を電力系統に同期させたまま回転数を可変させるものである。

図1は可变速揚水発電のシステム構成である。このシス

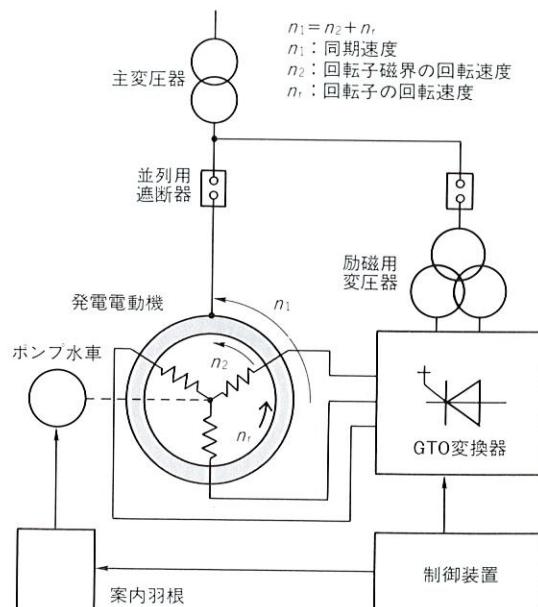


図1. 可变速揚水発電システムの構成 可变速揚水発電システムは、二次巻線型誘導機と同一の構造をもつ発電電動機と周波数変換器で構成される。

Configuration of adjustable-speed pumped storage system

- このシステムは定速機ではない次のような特長をもつ。
- (1) 揚水運転時の入力調整が可能で系統の周波数調整に有効である。
 - (2) 発電運転時の落差変動に対して高効率・広範囲の運動が可能である。
 - (3) 有効電力と無効電力を高速かつ独立に制御可能で電力動揺を早期に収束させ、系統の安定化に寄与する。
 - (4) GTO 変換器を使用して発電電動機を始動することができ、滑らかな始動ができる。

3 GTO 変換器の構成

図2は奥清津第二発電所のGTO変換器の構成である。GTO変換器は、商用周波交流電力を直流電力に変換するGTOコンバータ、直流の過電圧を防止するGTOチョッパ、直流電力を低周波交流電力に変換するGTOインバータにより構成される。さらに、GTOインバータの出力には電力系統の短絡・地絡故障時に発電機二次巻線に発生する過電圧を抑制する過電圧保護装置が接続されている。表1はGTO変換器の定格諸元である。

3.1 GTO コンバータ

GTOコンバータは単相ブリッジ回路構成のコンバータが3台で1ユニットを構成する。2ユニットずつ直流中性点の

表1. GTO 変換器の定格
GTO inverter-converter ratings

GTO コンバータ	定格	20 MW – 2,024 V – 823 A × 4
	構成	2 S – 1 P – 4 A × 3 相 × 2 多重 × 2 群
GTO インバータ	定格	31.5 MVA – 3,040 V – 5,980 A
	構成	2.5 Hz
直流電圧		4 S – 1 P – 6 A × 6 並列
冷却方式		9,000 V 純水循環水冷 外部水冷

上側と下側に接続され、その2ユニットの交流入力は励磁用変圧器で多重化される。GTO定格は4,500 V–3,000 Aであり、各アームは2個直列で構成されている。GTOのスイッチング周波数は500 Hzであるが、2ユニットの多重化により電源側から見れば2 kHzのスイッチング周波数と等価となり高調波を低減することができる。自励式のコンバータの採用により入力力率を1.0に制御することができ、GTO変換器の入力無効電力はゼロとすることができる。また、各コンバータ内にはアノードリアクトルのエネルギー回生回路を備えコンバータの効率を約2%向上させている。図3にコンバータ、後述するインバータ、チョッパに使用しているGTOモジュールを示す。このGTOモジュールは1S(1直列)構成で従来比64%の小型化を図っている。

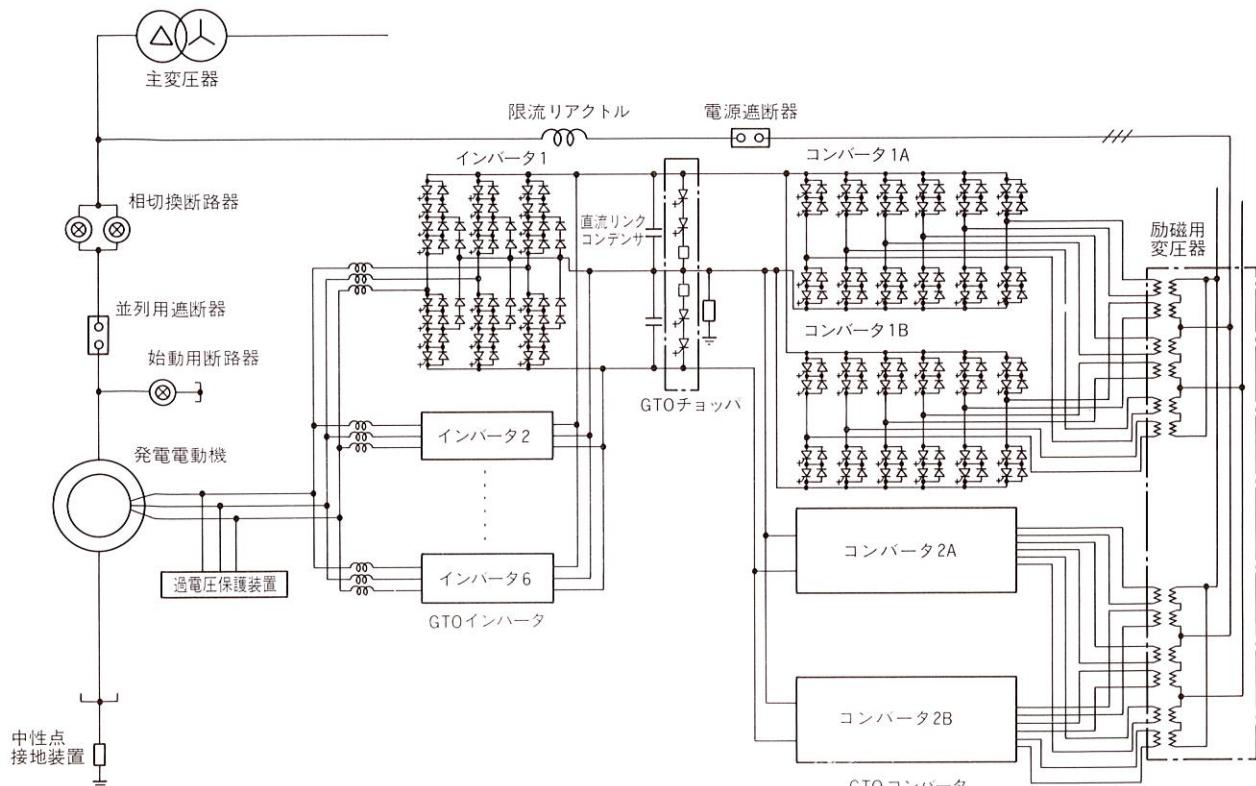


図2. GTO 変換器の構成 GTO 変換器は GTO コンバータ、GTO チョッパ、GTO インバータ、過電圧保護装置で構成される。
Configuration of GTO inverter-converter

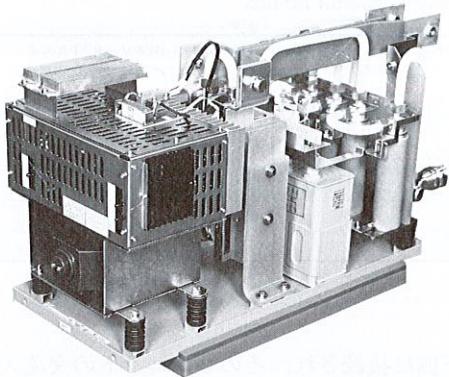


図3. GTOモジュール 従来比64%の小型化を図っている。
GTO module

3.2 GTOインバータ

GTOインバータは3レベル三相インバータを6台並列に接続して大電流のインバータを実現した。インバータの出力は低周波であり変圧器による多重化が困難なため、中性点をゼロ電位にクランプする3レベルインバータを採用し、高調波を低減させている。GTOはコンバータと同じ4,500 V-3,000 A 定格であり、1アーム4直列で構成される。GTOインバータ内にもエネルギー回生回路を設け、同じように効率の向上を図っている。このエネルギー回生回路は故障しても運転可能である。また、インバータ1台が故障しても残りの5台で定格有効電力を出力可能とする冗長性をもたせている。

3.3 GTOチョッパ・過電圧保護装置

いずれも電力系統で短絡・地絡故障が発生した場合に、発電機二次側に発生する過電圧を抑制する装置である。系統の故障が発生すると発電機の二次側に大きなエネルギーが流れ込み、直流コンデンサの電圧を上昇させる。直流電圧が保護のレベルに達すると、GTOチョッパのGTOがオンしコンデンサを放電させる。さらに電圧が上昇した場合には、過電圧保護装置のサイリスタが点弧され発電機二次巻線を短絡する。1線地絡故障の場合にはGTOチョッパだけで過電圧を抑制することが可能で、GTO変換器の運転を継続し系統の安定化に寄与することができる。半導体を使用した過電圧保護装置であり、高速・小型化を実現している。

4 GTO変換器方式のメリット

GTO変換器を使用した可変速揚水発電システムはサイクロコンバータ方式に比べて次のようなメリットがある。

- (1) GTOチョッパにより系統故障時のGTO変換器への

進入過電圧を抑制し、運転継続性が高い。また、停止した場合でも系統故障除去後の再起動時間が短い。

- (2) GTOコンバータの入力力率が1となるのでGTO変換器への無効電力の供給が不要で励磁用変圧器容量、発電電動機容量を低減することができる。
 - (3) 二次電流に休止期間がないため一次側への影響が少なくさらに質の高い電力を供給できる。
- このようにGTO変換器方式はさらに品質の高い電力を供給することができる。

5 今後の動向

可変速揚水発電システムの有効性はすでに認められており、今後の揚水発電所の計画にあたって必ずこのシステムが検討されている。自励式変換器を使用したシステムは数々のメリットがあり今後主流になると思われる。自励式変換器の今後の課題はさらなるコンパクト化と高効率化である。この課題を克服するためスイッチング周波数の適正化、PWM(パルス幅変調)制御の改良などとともに大容量GTOを適用していく必要がある。現在、6インチウェーハの6,000 V-6,000 A GTOを適用したGTO変換器を開発中である。

6 あとがき

奥清津第二発電所2号機の可変速揚水発電システムは1996年6月1日の運転開始に向けて調整試験中である。今後もさらなるGTOの大容量化、制御技術の改良を進め、より効率的なシステムの構築につとめていく。

謝 辞

このシステムの開発にあたり、ご指導いただいた東京電力㈱、電源開発㈱の関係各位に感謝の意を表する。

(金井／石月)

大容量自励式無効電力補償装置 Large-Capacity Self-Commutated SVC

1 まえがき

近年の急速な電力需要の増大により系統電圧の安定性が問題になっており、無効電力で系統電圧を制御する静止形無効電力補償装置(SVC)が導入されている。従来、サイリ

スタを用いていた無効電力補償装置を自励式で実現すると下記に示す利点がある。

- (1) 進相から遅相の無効電力を連続して制御できる。すなわち、系統電圧の制御性がよい。
- (2) 系統電圧によらずにスイッチングが可能であり、系統電圧低下時に制御できる無効電力量が多い。
- (3) 低次発生高調波が少なくフィルタが不要であり設置スペースを低減できる。

ここでは、電力系統への自励式変換器の適用の先駆けとなった、東京電力㈱新信濃変電所 50 MVA 自励式 SVC について、大容量化の技術ポイントである GTO 直列接続技術と、制御のポイントの一つである偏磁抑制制御について述べる。

2 主回路構成

図 4 に 50 MVA 自励式 SVC の主回路構成を示す。変換器は 4 台の電圧型三相自励式変換器ユニットから構成される。総合仕様を表 2 に、変換器ユニットの仕様を表 3 に示す。直流電圧 16.8 kV は自己消弧デバイスを適用した変換器としては、世界的にもっとも高い電圧である。

変換器ユニット 1 台の外観を図 5 に示す。

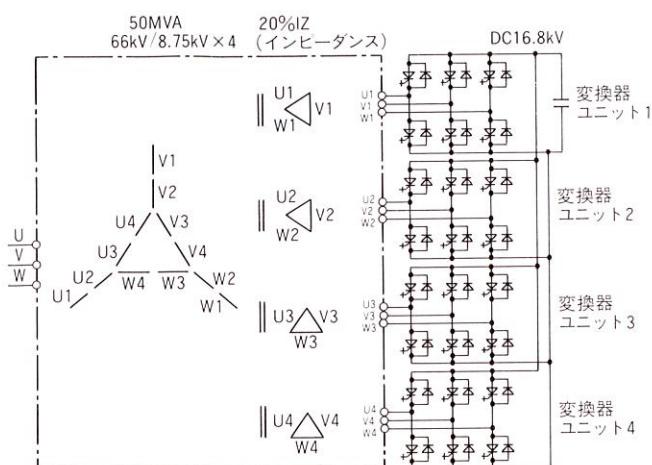


図 4. 50 MVA 自励式 SVC 主回路構成 東京電力(㈱)新信濃変電所 50 MVA 自励式 SVC の変換器主回路構成。

Configuration of 50 MVA self-commutated SVC

表 3. 変換器ユニットの仕様
Specifications of converter unit

定格容量	12.5 MVA
定格直流電圧	16.8 kV
定格交流電圧	8.75 kV
定格交流電流	825 A
制御方式	3 パルス PWM
使用素子	6,000 V-2,500 A GTO
アーム構成	8 直列 I 並列 6 アーム (冗長個数: 1)
冷却方式	純水循環水冷
ゲート点弧方式	光間接点弧

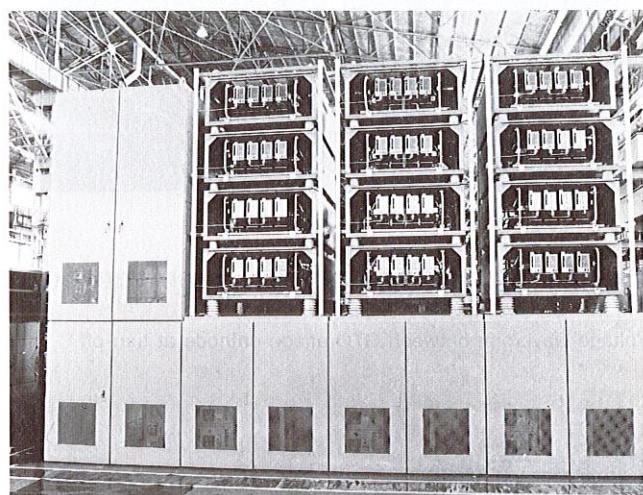


図 5. 12.5 MVA 変換器ユニット 50 MVA 自励式 SVC を構成する 4 台の変換ユニットの内の 1 台分。
External view of converter unit (12.5 MVA)

PWM 周波数は 150 Hz であり、4 台のユニット間でスイッチング位相をずらして高調波を打ち消すことで、全体の高調波を抑制している。

3 GTO の直列接続技術

変換器の大容量化のためには GTO の多直列接続技術が不可欠である。そのポイントは GTO のスイッチング時の電圧分担を均等にすることにある。

GTO のターンオフ時における過渡分担電圧の不平衡分 ΔV_{off} は GTO を理想的なスイッチングデバイスとすると(1) 式で表される。

$$\Delta V_{\text{off}} = (I_{\text{tgq}} / C_s) \times \Delta t_{\text{off}} \quad (1)$$

ここで、 I_{tgq} : GTO の遮断電流、 C_s : スナバコンデンサの容量、 Δt_{off} : ターンオフする時間のばらつきである。 Δt_{off} には、個々の GTO の特性のばらつきと、オフゲート信号の送出時間のばらつきが含まれている。GTO の特性が不ぞろ

表 2. 50 MVA 自励式 SVC の総合仕様
System specifications

定格容量	50 MVA
定格電圧	AC 66 kV
定格電流	AC 438 A
周波数	50 Hz
変換器構成	三相プリッジ×4 台
変圧器	66 kV/8.75 kV インピーダンス 20 %

いの場合に、同時にオフゲート信号を送出するとターンオフ時の過渡分担電圧にはばらつきが生ずる。すべてのGTOの特性をそろえることは非現実的なので、この装置ではゲート制御回路でGTOごとにオフゲート送出タイミングを調整し、過渡分担電圧のばらつきを抑制している。図6は、このように調整した8直列接続のGTOで2,400 Aの電流を遮断した時のGTO極間電圧波形である。8個のGTO間の分担電圧が均等であることがわかる。

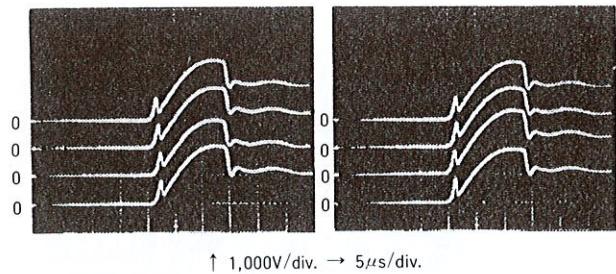


図6. ターンオフ時のGTO極間電圧波形 調整後の8直列のGTOのターンオフ時の極間電圧波形。

Voltage waveform between GTO anode-cathode at turn-off

4 制御回路構成

自励式SVCの制御回路構成を図7に示す。この装置は系統電圧を一定に保つ電圧一定制御と、系統事故などで発電機出力が動搖した場合に、系統電圧の制御で動搖を抑制す

る電力動搖抑制制御の二つの機能をもっている。両制御系出力の比率に重みをつけ、無効電流成分の基準値 i_d^* を決定する。

この装置の損失分の有効電力を系統から補給し、直流コンデンサ電圧を一定に保つ直流電圧一定制御で有効電流成分の基準値 i_d^* を決定する。

変換器の出力電流を三相／二相変換し、有効電流成分、無効電流成分を検出し、それぞれ基準値に等しくなるように制御し、変換器出力電圧の指令値を決定する。

PWM制御回路では出力電圧指令値と、系統と同期した150 Hzの三角波を比較してGTOのオンオフタイミングを決定する。

図8に、系統電圧一定制御時に系統電圧基準を3%ステップ状に上昇させた時の波形を示す。基準が上昇したため、自励式SVCは進み無効電力運転(図8では負極性)に移行する。基準変更後、無効電力出力は60 msで追従している。

5 偏磁抑制制御

この装置のような電圧形自励式変換器は、出力が電圧源として作用するので、出力に直流分が含まれると変換器用変圧器の鉄心が偏磁し、最悪の場合は過電流に至る。図7に示す制御系構成では変換器用変圧器の一次電流と二次電流の差をとることで励磁電流を検出し、その直流分で出力電圧指令値を補正し偏磁を抑制していた。

通常運転中は上記制御により偏磁は十分抑制されていたが、図7において#2に示す大容量変圧器投入時に、自励式

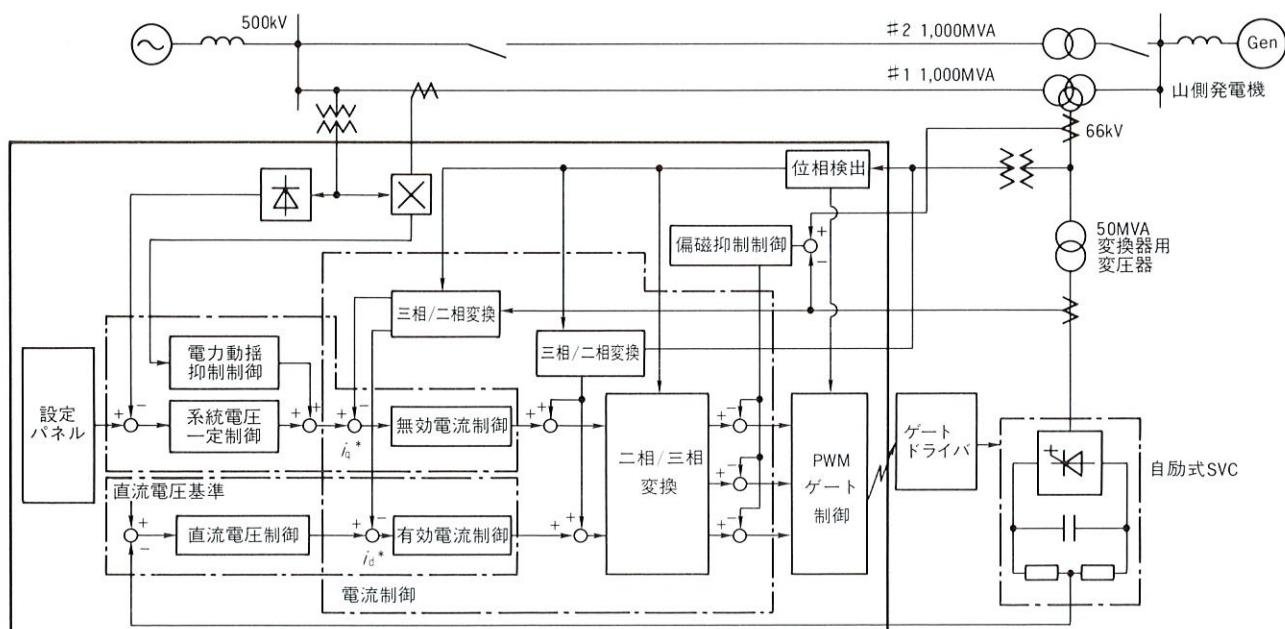


図7. 制御系構成 50 MVA 自励式 SVC の制御系構成。
Configuration of 50 MVA self-commutated SVC control circuit

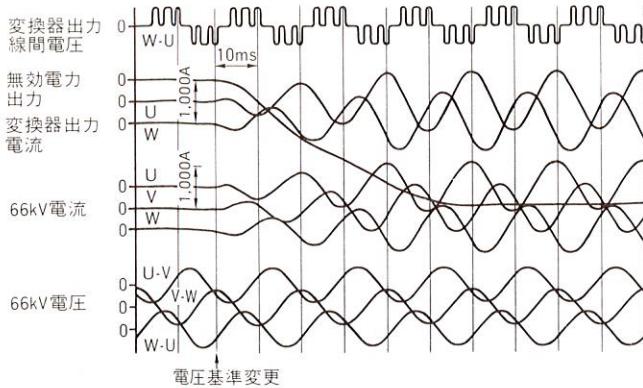


図 8. 電圧基準変更時の応答波形 系統電圧一定制御時に電圧基準を 3 % 上昇させたときの応答波形である。60 ms で応答している。

Test results of changing voltage reference

SVC 変換器用変圧器が直流偏磁し偏磁過電流で保護停止した。原因について検討した結果、#2 大容量変圧器の励磁突流による系統電圧ひずみに応答し、自励式 SVC 出力電圧指令値がひずみ、その結果 PWM 制御後のパターンに直流分が発生することが判明した。そこで、変換器出力電圧に含まれる直流成分を電源基本周期ごとに検出して補正をかける新制御(図 9)を考案した。図 9において、点線で囲んだ部分が新しく追加した制御である。

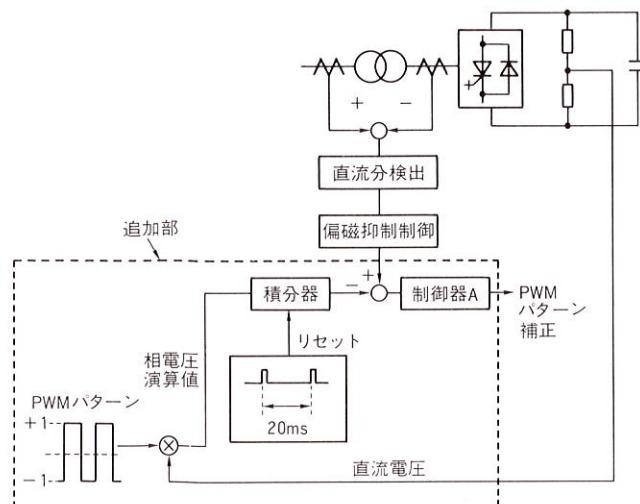


図 9. 新しい偏磁抑制制御構成 變換器出力電圧直流分を電源基本周期で検出し補正をかける新しい偏磁抑制制御の構成。

New DC magnetization prevention control

新制御を適用し、#2 大容量変圧器の投入試験を行った結果、偏磁過電流による保護停止は発生せず、新制御の効果を確認できた⁽¹⁾

6 あとがき

東京電力(株)新信濃変電所に納入した世界最大クラスの容量、直流電圧をもつ自励式 SVC について、GTO の直列接続技術、および偏磁抑制制御について述べた。この装置は実系統で 3 年以上にわたり運用中であり、貴重なデータを収集している。この装置での経験を生かし、さらに容量の大きい 6,000 V-6,000 A の GTO を適用した装置を現在開発中である。

謝 辞

自励式 SVC の開発および改善にあたり、ご指導いただいた東京電力(株)の関係各位に感謝の意を表する。

(川上／色川)

文 献

- (1) 鈴木健一、他：電圧形自励式変換器の新しい偏磁抑制制御、平成 7 年度電気学会電力エネルギー部門大会、No.45 (1995)

金井 丈雄 Takeo Kanai



府中工場パワーエレクトロニクス部主務。

電力システム用自励式変換器の開発設計に従事。電気学会会員。

Fuchu Works

石月 照之 Teruyuki Ishizuki



電力事業部水力プラント技術部主務。

水力プラントのシステムエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。

Power System Div.

川上 紀子 Noriko Kawakami



府中工場パワーエレクトロニクス部主務。

電力システム用自励式変換器制御システムの設計に従事。電気学会、IEEE 会員。

Fuchu Works

色川 彰一 Shouichi Irokawa



電力事業部電力変電技術部主幹。

直流送電、静止形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 System Div.