

新形三相静止形高圧自動電圧調整器 (三相TVR)の開発

Development of Three phase Thyristor type Step Voltage Regulator

苜川 謙治*1 Kenji Fugawa
 若松 友晴*2 Tomoharu Wakamatsu
 高木 俊明*2 Toshiaki Takagi
 安藤 匡宏*2 Masahiro Ando
 梶田 寛*3 Hiroshi Kajita
 普天間 淳*3 Jun Futema
 須田 芳和*1 Yoshikazu Suda
 桑原 祐*2 Tasuku Kuwahara

1. はじめに

近年、低炭素化社会の実現に向けて、再生可能エネルギー(太陽光発電や風力発電など)の大量導入が進められている。また、平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震による電力供給不安から、国内の再生可能エネルギーへの転換の機運は更に高まってきた。しかし、再生可能エネルギーが配電系統に大量に連系されると、急激な電圧変動が発生する恐れがある。

現在、高圧配電系統では、負荷時タップ切換変圧器(LRT)や自動電圧調整器(SVR)などで、適正電圧範囲内に収まるように制御されているが、高圧配電系統への再生可能エネルギーの連系や家庭用太陽光発電等の大量導入に伴う急激な電圧変動への対応は難しく、この問題に効果的な機器が求められている。

今回、このような急激な電圧変動への対応を可能とし、電圧調整を高速かつ多頻度に行える機器として、三相静止形高圧自動電圧調整器(以下、三相TVR)を開発した。

2. 三相TVRの概要

2.1 仕様

三相TVRの仕様を表1に、その外観を図1に示す。

開発品は、変圧器の結線をV-星形結線とし、サイリスタ素子数の低減を図っている。また、サイリスタの間接油冷却方式の採用と、配電線インピーダンスを考慮して短絡強度を2kAにすることで、機器の小形・軽量化を図った。

また、タップ切換に飛越しタップ切換機能を付加し、大きな電圧変動に対しても迅速な電圧調整を可能とした。

表1 三相TVRの仕様

項目	仕様
定格線路容量	3,000 kVA
定格2次電流	262 A
定格2次電圧	6,600 V
電圧調整範囲	±300V、タップ点数7点(100Vステップ)
結線	V-星形方式 調整変圧器：V結線、直列変圧器：星形結線
サイリスタ冷却方式	間接油冷却方式：サイリスタは気中/フィン油中
短絡強度	2.0 kA
最短タップ切換間隔	5秒(飛越しタップ切換機能付)
サイリスタ保護(内部短絡時)	限流ヒューズ
装置異常時保護	電磁接触器(MC)投入

*1 電力事業部 変圧器技術部 小形技術G
 *2 電力事業部 環境エネルギー技術部 パワエレG
 *3 電力事業部 制御技術部 制御技術G



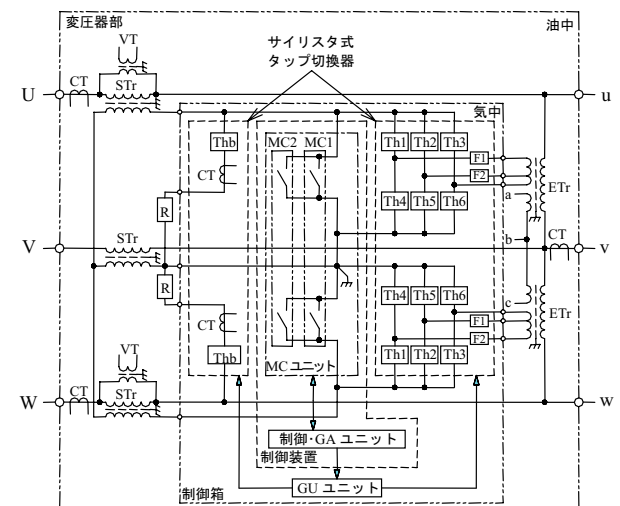
図1 三相TVRの外観

2.2 構成

三相TVRの主回路構成および制御装置、サイリスタ式タップ切換器の概要を以下に示す。

(1) 主回路構成

三相TVRの主回路構成を図2に示す。



STr: 直列変圧器 ETr: 電圧調整変圧器
 VT, CT: 変成器 Th1~6: タップ切換用サイリスタ
 Thb: ブリッジ用サイリスタ F1~2: 限流ヒューズ
 R: 限流抵抗 MC: 電磁接触器

図2 三相TVRの主回路構成

三相TVRは、変圧器、サイリスタ式タップ切換器、制御装置の各部で構成され、変圧器を収納した外箱の側面に、制御装置、サイリスタ式タップ切換器を収納した制御箱を取付ける構造としている。

変圧器の電圧調整方式は、線間に挿入した電圧調整変圧器の低压回路側と線路に直列に挿入した直列変圧器の低压回路側を、サイリスタ式タップ切換器で結合した間接切換方式を採用している。

サイリスタ式タップ切換器はタップ切換用サイリスタ、ブリッジ用サイリスタ、GUユニット(スナバ回路、サージ吸収器、ゲート駆動装置)、限流ヒューズ等で構成されている。

制御装置は、制御・GAユニット(制御部、ゲートアンプ(GA)部、電源部)とMCユニットの2つのユニットで構成し、電圧調整制御および装置の外部・内部故障に対し保護制御を行う。

(2) 制御装置

制御装置回路構成を図3に示す。

制御装置の制御・GAユニットは電圧調整および装置の外部・内部故障に対し保護制御を行う制御部と制御部からのタップ切換信号からサイリスタの組合せを選択するGA部および電源部から成る。MCユニットは、TVRの運転開始、停止時および外部・内部故障保護動作時に制御部からの指令により電磁接触器(以下、MC)の開閉を行う。

① 電圧調整機能

TVRの電圧調整機能は制御部で取込んだ電圧、電流要素をアナログフィルタ処理を行った後、A/D変換し、CPUを使用したデジタル演算処理を行い、配電線の電圧を予め設定してある基準電圧に調整するようサイリスタを切換えて電圧調整変圧器のタップを切換える。電圧調整用の各種リレー要素の仕様概要を表2に示す。

② 保護機能

配電線事故時や装置内部故障時に装置自身を保護し、また、配電線に影響を与えないよう保護する機能である。

これらの各種保護機能の内容を紹介する。

・外部短絡保護

配電線短絡による過電流を制御部で検出し、タップを素通しに切換えた後、MCを投入して過電流をバイパスする。配電線が正常に復帰した場合は、約120秒後にMCを開放し正常運転に戻る。

・過負荷保護

過負荷電流を制御部で検出し、タップを素通しに切換えた後、MCを投入する。電流値が正常に復帰した場合は、約120秒後にMCを開放し正常運転に戻る。

・過電圧保護

配電線電圧を制御部で監視し過電圧を検出した場合は、タップを素通しに切換えた後、MCを投入する。配電線電圧が正常に復帰した場合は、約120秒後に正常運転に戻る。

・不足電圧保護

配電線電圧を制御部で監視し不足電圧を検出した場合は、タップを素通しに切換えた後、MCを投入する。配電線電圧が正常に復帰した場合は、約120秒後に正常運転に戻る。なお、制御装置電源にはバックアップ用のコンデンサを設け、配電線瞬時電圧低下による不要な保護動作を防止している。

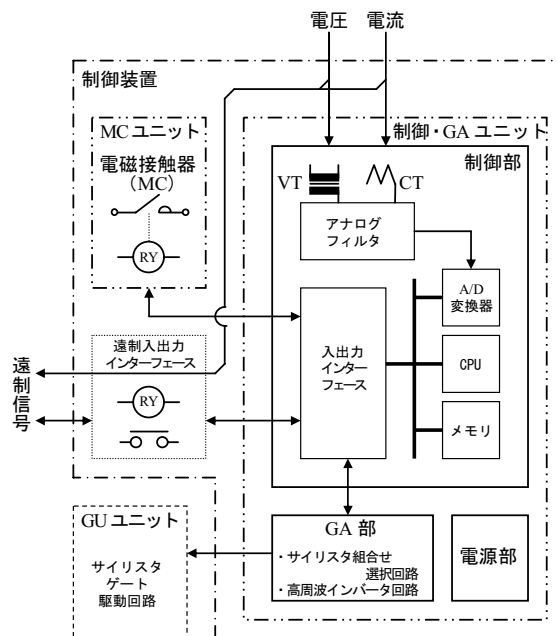


図3 制御装置回路構成

表2 電圧調整用リレー要素の仕様概要

項目	仕様	
90要素 (順送/逆送)	基準電圧	6,300 V ~ 6,900 V
	動作時間	100秒/ΔV ~ 600秒/ΔV (ΔV: 入力電圧と基準電圧の偏差)
	不感帯	0 V
67要素	飛越タップ	2 ~ 4タップ飛越
	動作時間	0 ~ 10秒
LDC要素	位相特性	進み95° ~ 遅れ85° (順送領域)
	抵抗分	0 ~ 24%
	リアクタンス分	0 ~ 24%

・タップ開放保護

万一の低压回路側開放事故が発生した場合、ブリッジ用サイリスタの過電圧自己点弧回路により導通させ、この異常電流を制御部で検出し、タップを素通しに切換えた後、MCを投入固定する。

・タップ短絡保護

万一のタップ間短絡事故発生時にサイリスタを保護

するため、タップ切換用サイリスタと直列に高速限流ヒューズを設けている。限流ヒューズの接点を制御部に監視し、異常検出時にはタップを素通しに切換えた後、MCを投入固定する。

・制御装置各部異常保護

各ユニットは個々に監視を行い、異常検出時はタップを素通しに切換えた後、MCを投入固定する。

③ 遠制機能

今回の開発品は遠制機能を付加している。以下に主な機能を示す。

- ・タップ昇圧／降圧制御
- ・一次電圧、二次電圧、二次電流の計測
- ・順潮流／逆潮流状態確認
- ・TVR 内部故障状態確認

これらの遠制機能を使用し、配電自動化システムに連係させることで、将来の電圧管理の高機能化への対応を可能としている。

(3) サイリスタ式タップ切換器

サイリスタ式タップ切換器は、制御装置からの指令により確実にサイリスタを導通させると同時に、配電線の雷サージや万が一の内部回路短絡からサイリスタを保護することが要求される。

本装置では、以下の対策を行なうことでサイリスタ式タップ切換器の信頼性向上を図っている。

① ゲート駆動装置

サイリスタは、サイリスタのゲート端子からカソード端子へ電流 I_{GK} を流すことで導通し、アノード端子からカソード端子へ電流 I_{AK} が流れる。 I_{GK} と I_{AK} がゼロになると非導通状態となる。サイリスタを導通させるために必要な I_{GK} は、温度による変動やサイリスタ個々のばらつきが大きい。したがって、それらを考慮し、充分な I_{GK} を流す必要がある。

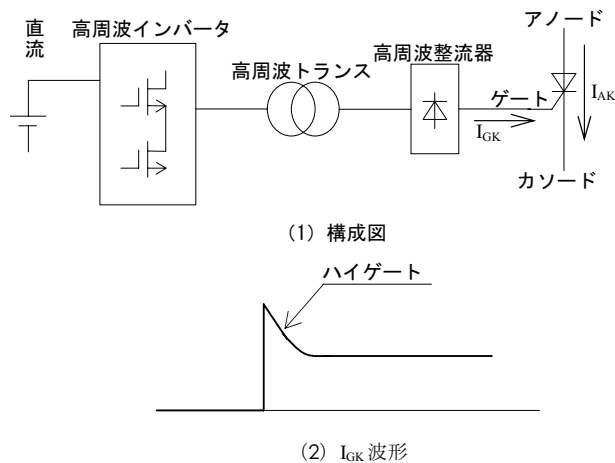


図4 ハイゲート高周波連続パルス方式の概念図

また、大容量負荷や突入電流が発生する負荷の投入・開放で発生する配電線電流の高周波振動等で、 I_{AK} がゼロ点を通過する場合でも導通状態を維持させなければならない。

このため本装置には、ハイゲート高周波連続パルス方式を採用した(図4)。この方式は、サイリスタを導通させる瞬間には I_{GK} を大きくし、その後は導通状態を維持するための I_{GK} を流し続ける。このため、温度変動やサイリスタ特性のばらつきに対してもサイリスタの導通失敗を防ぐことができる。また、 I_{GK} を断続させることなく流すため、 I_{AK} が高周波振動等でゼロ点を通過しても、サイリスタは導通状態を維持できる。

② 雷サージ対策

サイリスタは半導体であるので、過電圧に対する耐量が機械接点に比べ小さい。そのため雷サージ対策は非常に重要である。また、電圧が耐量以下でも急峻な電圧変化がサイリスタのアノードとカソード間に印加されるとサイリスタが導通する危険がある。そのため、過電圧を吸収し電圧変化率を抑制するスナバ回路と、サージ電圧を耐量以下に制限するサージ吸収器を併用して保護している(図5)。

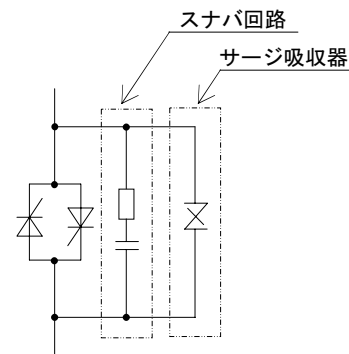


図5 サイリスタの過電圧保護

スナバ回路は、タップ切換時に導通状態から非導通状態に遷移するサイリスタに発生する転流サージを抑制する。

また、雷サージに対してもその立ち上がりを緩やかにしてサイリスタが誤って導通してしまうことを防ぐ。

サージ吸収器は、スナバ回路のみでは抑制できない雷サージ電圧を、サイリスタの許容電圧以下に抑制する。サージ吸収器の選定にあたっては、耐用回数を考慮しなければならない。配電線に発生する雷サージの回数は長年の蓄積したデータから予想できる。その回数とシミュレーションにより求めたサージ吸収器に流れる電流から、サージ吸収器の寿命を求め、本装置の寿命以上を確保できるサージ吸収器を採用した。

当社の雷サージ試験の結果、サイリスタの電圧変化率とサージ吸収器に流れる電流が、ほぼシミュレーション通りであることが確認されており、充分なサージ対策が行われていることが確認できた。

3. 三相TVRの特長

三相TVRの特長を以下に示す。

3.1 電圧制御の高機能化

(1) 不感帯なし積分リレーの採用

SVRはタップ切換回数に制限があるため、不感帯を設けてタップ切換器が過度の切換動作を行わないようにしている。したがって、SVRは出力電圧が不感帯の範囲内にある場合はタップ切換を行わず、不感帯を越えるとタップ切換を行うことになる。このため、SVRの出力電圧は基準電圧に対し最大で不感帯と等しい電圧偏差を生じる。

一方、TVRはタップ切換器にサイリスタを採用しているため、タップ切換回数を制限する必要がない。したがって、配電線の定電圧管理を実現する不感帯なし積分リレーを採用した。

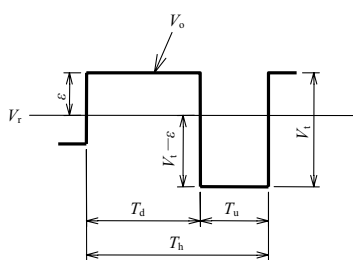
不感帯なし積分リレーを採用した場合、TVRの電圧調整動作は図6に示すようになる。

図6において、

$$\varepsilon T_d = (V_t - \varepsilon) T_u$$

となり、基準電圧を超えている部分の面積と、下回っている部分の面積が等しくなる。したがって、出力電圧の平均値を基準電圧に一致させることができ、配電線の定電圧管理が可能となる。

この方式は切換回数に制限が無いTVRの特長を最大限に活用できる定電圧管理手法である。



V_o : 出力電圧、 V_r : 基準電圧、 V_t : 1タップ電圧
 ε : 電圧偏差 (正側) $0 \leq \varepsilon \leq V_t$ 、 T_d : 下げ時間
 T_u : 上げ時間、 T_h : 繰返し周期

図6 不感帯なし積分リレーによる電圧調整動作

(2) 飛越しタップ切換機能の採用

TVRは各サイリスタのON、OFFでタップ切換を行うため、タップ切換回数に制限はない。しかし、タップ切換頻度が高い時の限流抵抗の温度上昇低減と内部故障時の保護協調から最短タップ切換間隔を5秒としている。したがって、大きな電圧変動に対し連続してタップ切換を行うことができない問題がある。この問題を解決するために、タップ切換に飛越しタップ切換機能を付加した。

飛越しタップ切換機能は最大4タップ(±400V)の飛越しタップ切換が可能である。大きく急峻な電圧変動を抑制する飛越しタップ切換動作と緩やかな電圧変動を抑制する1タップ切換動作を併用することで、さまざまな電圧変動に対し、迅速な電圧調整を可能とした。

3.2 高信頼性

本装置は柱上というノイズ環境が厳しい状況で配電線の電圧調整を行なうという重要な責務を負っている。したがって、誤動作した場合の影響は非常に大きく、最悪の場合、電力供給支障を引き起してしまう。そのため、十分なノイズ対策を行なうだけでなく、万が一の誤動作時にも供給障害を発生させないようにしている。

(1) ノイズ対策

当社では特にノイズに対して注意を払って設計を行なうと同時に、制御装置一括ではなく部品単体(プリント基板、ユニット)に対しても試験を行なっている。部品単体には、独自のノイズ規格を制定している。部品単体からノイズ試験を実施することで、信頼性を高めながら制御装置全体のノイズ試験を行なう手法を採用している。

表3に当社で行なっているノイズ試験項目とTVRの対象部品を示す。当社のTVRはこれらの試験全てをクリアし、配電線用機器として十分なノイズ耐量を確保している。

表3 ノイズ試験項目

試験項目	目的	対象部品		
		部品単体		制御装置
		プリント基板	ユニット	
ノーマルモードノイズ試験	基板の入出力信号に重畳するノイズ(ノーマルノイズ)に対する耐性を評価。	○		
コモンモードノイズ試験	基板の基準電位と入出力信号の基準電位との間に発生する電位差(コモンモードノイズ)に対する耐性を評価。 ユニット内で分離または絶縁された回路、基板間で発生するノイズに対する耐性を評価。	○	○	
静電気放電ノイズ試験	帯電した操作者からの直接あるいは近接した物体を介しての静電気放電に対する耐性を評価		○	
サージイミュニティ試験	落雷またはスイッチングなどの過渡現象から発生するサージに対する耐性を評価。		○	○
方形波インパルスノイズ試験	誘導負荷の開放に代表される立上りの速い広帯域の周波数成分を含むノイズに対する耐性を評価。		○	○
振動性サージ電圧試験	スイッチなどの開閉時に発生する繰返しの速く、徐々に減衰するノイズに対する耐性を評価。		○	○
電波ノイズ試験	無線機、携帯電話等の電磁波放射に対する耐性を評価。		○	○

(2) MC動作の信頼性向上

本装置の制御部やサイリスタに故障が発生した場合、電力供給障害をさけるために素通し状態(昇圧も降圧も行なわない)で運用する。この素通し状態にするためにMCを投入する。

したがって、制御部およびサイリスタの故障時にMCが動作できない場合は、TVR重故障となって配電線が停電となる恐れがある。

本装置では、以下の対策を行なうことでMC動作の信頼性向上を図っている。

① MCの2重化

信頼性を高めるためにMCを2重化し、直列変圧器の低圧回路側巻線が開放されてしまう事故を防いでいる。なお、2重化の対象は、MC本体だけでなく、MCを駆動する回路に対しても行なっている。

② MCの自己診断機能

MCが動作するのは非常に稀であるため、正常に動作するかを定期的(1ヶ月毎)に自己診断する。タップ切換時に素通しになる瞬間を利用し、MCを動作させ、各MCの補助接点を監視することで正常に動作するかを判定する機能を設けた。

③ MC異常時の保護

片方のMCに異常が認められた場合は、正常なMCの接点を閉じて素通し状態とし、電圧調整動作を停止する。

3.3 保守性の向上

各装置を個々にユニット化して部品交換の容易化を図ると共に、変圧器以外の装置を全て制御箱内に収納することでメンテナンス性の向上を図った。

3.4 小形・軽量化

これまで、TVRはタップ切換器にサイリスタを使用していることから、サイリスタの冷却や配電線短絡時の短絡電流に対する対策等から機器が大きく、質量が重くなる傾向があった。今回、以下の方式を採用することにより、機器の小形・軽量化を実現した。

(1) サイリスタの間接油冷却方式の採用

従来、TVRはサイリスタを油入自冷式で冷却しており、サイリスタを冷却する油と油を収納する容器が必要であった。そのため、質量・油量が増加し、また、メンテナンス性が劣る構造であった。

今回、サイリスタの冷却に間接油冷却方式を採用し、質量・油量の低減を実現した。

間接油冷却方式とは、油入変圧器の油タンク側面に設けた冷却板にサイリスタを取付け、サイリスタの熱を変圧器の油に伝え、サイリスタと変圧器の冷却を同時に行う方式である。この方式により、サイリスタの冷却用の油と容器

が不要となり、質量・油量の低減を図ると共に、サイリスタとGUユニットを制御箱内に配置することが可能となった。サイリスタとGUユニットを制御箱内に配置することで、制御・GAユニットとの配線作業が簡素化され、メンテナンス性も向上した。

(2) 限流リアクトルの省略

従来のTVRは、低圧回路に限流リアクトルを設け、高圧配電線の短絡事故による過電流が低圧側(サイリスタ側)へ移行するのを直列変圧器の鉄心飽和で抑制していた。また、タップ切換時に発生する励磁突入電流についても限流リアクトルで抑制していた。しかし、限流リアクトルを設けることは機器質量の増加につながる。

そのため、今回の開発品は、短絡許容電流を2kA以下に制限した。これはTVRの設置位置を変電所から5km以上にすることで可能となる。短絡許容電流を2kA以下に制限することにより、高圧配電線短絡事故による過電流がサイリスタの許容過負荷耐力以下とすることができた。また、タップ切換時に発生する励磁突入電流の抑制対策として、直列変圧器の低圧巻線の空心インダクタンスを大きくすると共に、サイリスタの投入を常に電圧のピーク時に行う同期制御を採用した。

これらを採用することで、限流リアクトルの省略が可能となり、総質量の低減を行うことができた。

4. 配電系統電圧シミュレーション

TVRの特長(高速かつ多頻度の切換えが可能)を検証するため、当社で開発した配電線電圧計測プログラムを使用しシミュレーションを行った。

シミュレーションは、図7に示す配電線系統モデルで行い、太陽光発電が連系された場合のTVRによる電圧調整の効果とSVRによる電圧調整の効果を比較した。この系統は500kWの太陽光発電を最も影響の出る末端に連系し、

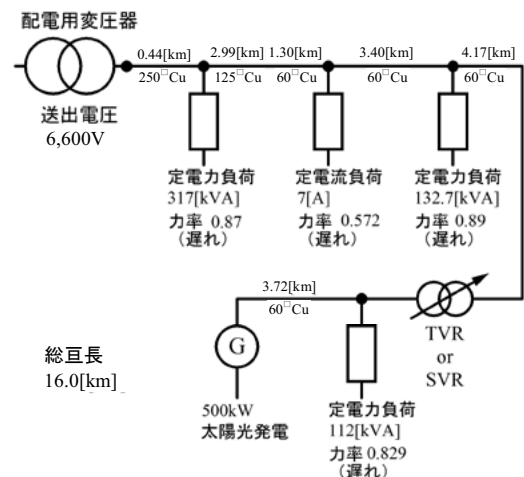


図7 配電線系統モデル

その近傍にTVRまたはSVRを設置した。太陽光発電の出力パターンは当社で測定したデータ(図8.1)を使用した。

太陽光発電接続点の電圧変化及びTVR、SVRのタップの変化の様子を図8.2、8.3に示す。

TVRはタップ切換えをきめ細かく行い、太陽光発電の出力変化に伴う急激な電圧変動に対して対応できていることがわかる。また、不感帯なしの電圧制御を行っているため、30分平均電圧値はほぼ一定となっている。

SVRはタップ切換回数が少なく、太陽光発電の出力変化に伴う電圧変動に対して反応ができていないことがわかる。また、30分平均電圧値についても電圧変動が大きくなっている。

今後、配電系統に分散電源が系統に大量に連系された場合、SVRのみでは急激な電圧変動を抑制することが難しく、TVRへの置き換えが進むものと予想される。

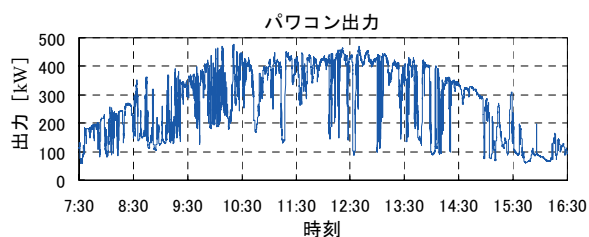


図8.1 太陽光発電出力パターン

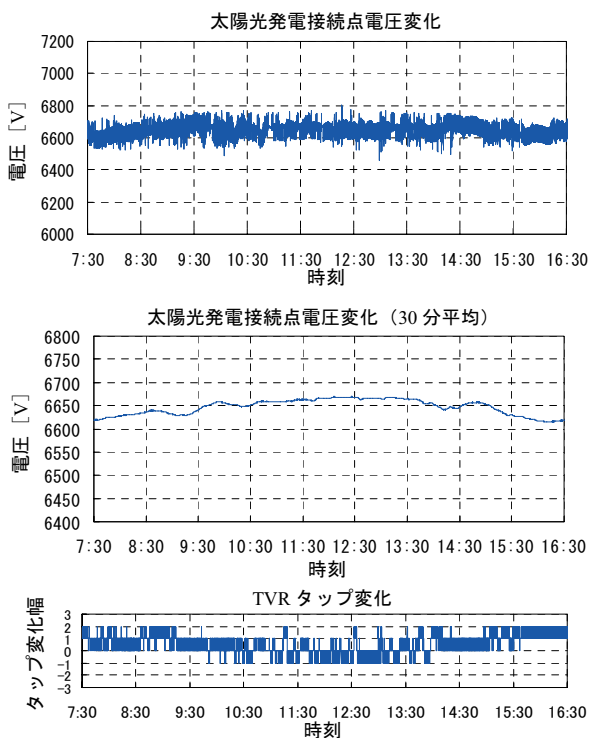


図8.2 TVR設置時電圧変化

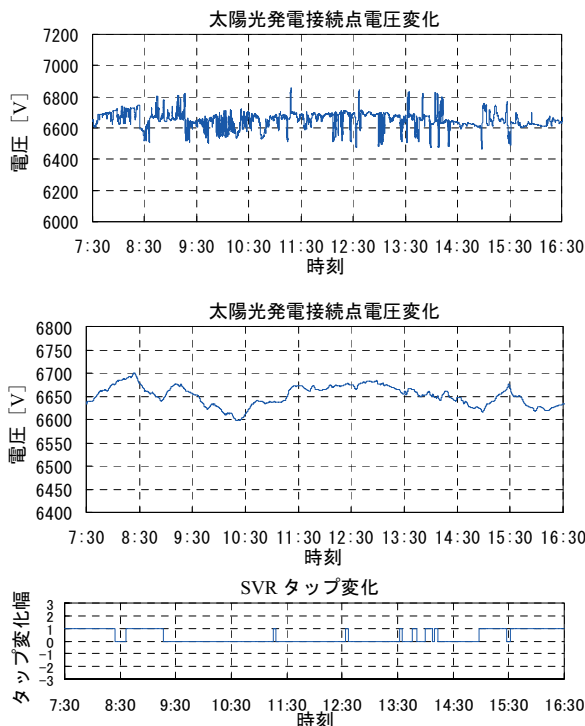


図8.3 SVR設置時電圧変化

5. あとがき

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの大量導入に伴い、配電系統の急激な電圧変動に対し効果的に対応できる機器として本装置を開発した。

開発においては、小形・軽量化を目的にサイリスタの間接冷却方式の採用や短絡強度の見直しとタップ切換時の同期制御により限流リアクトルの省略に取り組みこれらを実現した。また、当社保有技術である配電線自動化子局やデジタル保護・制御装置の技術を取り入れた高信頼度の制御装置を開発した。

今後は分散電源による逆流に対応した制御機能の付加など、機能の拡張を図る予定である。

参考文献

- (1) 「双方向サイリスタ式自動電圧調整器」
愛知電機技報No.17(1996)
- (2) 佐藤、神部、他：「配電線系統の電圧解析手法」
愛知電機技報No.23(2000)
- (3) 青山、河合、他：「トロイダル磁場コイル用電源」
愛知電機技報No.31(2010)