

配電用ハイブリッド型 電圧調整器の開発

Development of Hybrid Voltage Regulator for distribution line

符川 謙治^{※1} Kenji Fugawa
 高木 俊明^{※2} Toshiaki Takagi
 水野 秀則^{※2} Hidenori Mizuno
 福岡 匡宏^{※2} Masahiro Fukuoka
 五藤 和志^{※2} Kazushi Goto
 加納 稔久^{※3} Toshihisa Kanou
 スレチャンドヴァルマ^{※3} Surech Chand Verma
 上田 玄^{※4} Fukshi Ueda
 國井 康幸^{※4} Yasuyuki Kunii

1. はじめに

再生可能エネルギーの固定価格買取制度の施行により、大量の太陽光発電設備が配電系統に接続されている。そのため、配電系統から変電所へ向かって流れる潮流(逆潮流)により配電系統の電圧上昇が問題となっている。また、雲の移動に伴う発電電力変動が、配電系統に激しい電圧変動を引き起こしている。今後も、太陽光発電設備の増加が予想されるため、電圧調整器にはきめ細かく高速な電圧調整性能が要求される。

従来、配電系統の電圧調整に自動電圧調整器(SVR：Step Voltage Regulator)が用いられているが、太陽光発電が引き起こす電圧変動に追従できない。このため当社は、2012年にサイリスタ式自動電圧調整器(TVR：Thyristor type step Voltage Regulator)を開発し⁽¹⁾、太陽光発電による電圧変動を抑制できることを報告した⁽²⁾。

しかし、今後太陽光発電設備の接続が増え、さらに太陽光発電よりも変動が激しい風力発電の接続が進んだ場合には、無効電力により電圧調整を行なう静止型無効電力補償装置(SVC：Static Var Compensator)などが必要になると考えられる。SVCは、SVRより高速、TVRとほぼ同等の応答速度をもち、連続的な電圧調整が可能だが、電圧を維持するために必要なコストが非常に高くなってしまふ。

今回、SVCよりも低コストで、TVRよりも高性能な新型電圧調整器(HVR：Hybrid Voltage Regulator)を開発した。

本稿では、HVRの特長や仕様と新たに考案した電圧調整方式および試験結果について紹介する。

2. 従来の電圧調整器

従来、電圧調整器には、SVR、TVR、SVCが多く用いられている。それぞれの特徴を表1に示す。これらは配電線の状況にあわせて使い分けられているが、今後の配電系統の電圧調整としては十分とは言えない状況である。

SVRは、機械接点で構成され、タップ切換を機械式で行なうため、高速な電圧調整は困難である。また、タップ切換時のアークによって接点が摩耗し、多頻度の電圧調整を行なうと装置寿命が大幅に短くなってしまふ。したがって、SVRで、太陽光発電等が配電系統に与える激しい電圧変動を抑制することは望ましくない。

TVRは、半導体(サイリスタ)で構成されたスイッチによりタップを切り換えて電圧調整を行なう。サイリスタは、

高速なオンオフ動作が可能であると同時に、アークを発生しないため、多頻度の電圧調整が可能である。したがって、太陽光発電等による激しい電圧変動にも効果的に抑制できる特長を持つ。

しかし、これらの装置の電圧調整はタップの切換えで行なわれるため、電圧調整は段階的であり、きめ細かい電圧調整は不可能である。

SVCは、無効電力を配電系統へ注入することで電圧調整を行なう装置であり、サイリスタまたはインバータを用いて制御する。よって、TVRと同等の高速応答が可能で、かつ連続的な電圧調整が可能である。しかし、無効電力を発生するコンデンサやリアクトルや、高価なトランジスタ(IGBT)などが必要となるため、高コストになるという欠点がある。

表1 従来の電圧調整器の特徴

種類	応答時間	電圧調整	動作回数
SVR	低速 (数十秒)	段階 (1タップ電圧)	制限あり (20万回)
TVR	高速 (最速70ms)	段階 (1タップ電圧)	無制限
SVC	高速 (80ms)	連続	無制限

3. 構成と特長

HVRは、高速応答を持つTVRを無段階調整可能にした電圧調整器であり、SVCに比べて低コストで実現している。HVRの基本構成(1相分)を図1に示す。

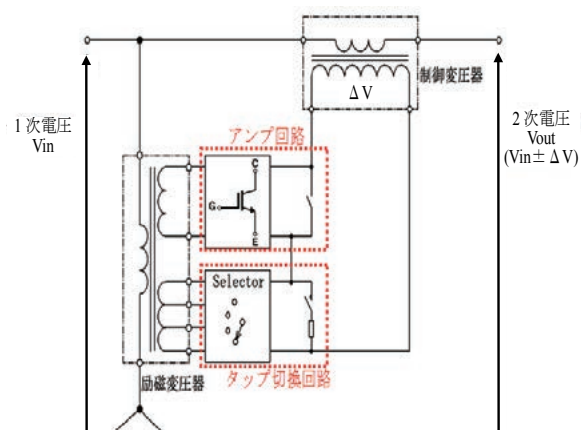


図1 基本構成(1相分)

^{※1} 電力事業部 変圧器技術部 小形技術グループ
^{※2} 電力事業部 環境エネルギー技術部 パワエレグループ

^{※3} 中部電力株式会社 電力技術研究所 流通グループ
^{※4} 中部電力株式会社 エネルギー応用研究所 お客さまネットワークグループ

HVRの1次電圧を励磁変圧器で低圧に変換し、タップ切替回路とアンプ回路に入力して、各回路ではそれぞれの出力電圧を任意に調整する。そして、各回路の出力を直列に接続し、その出力電圧の和を制御変圧器によって配電線の電圧に重畳することにより、HVRの2次電圧を適性値に維持している。

タップ切替回路は、TVRと同様にサイリスタを使用して電圧の粗調整を行なう。

アンプ回路は、電圧の微調整を行なうもので、高速スイッチング半導体であるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を使用したインバータで構成しており、正負両方向の極性の出力が可能である。アンプ回路の出力電圧は最大でタップ切替回路の1タップ電圧の半分までとし、アンプ回路とタップ切替回路を組合せることで、インバータの定格容量が小さくでき、コスト低減となる。

また、アンプ回路がタップ間電圧を補償するため、連続的な電圧調整が可能である。

HVRの特長を表2に示す。

表2 HVRの特長

項目	特長	内容
応答時間	高速	半導体素子を使用した制御
電圧調整	連続	タップ切替器のタップ電圧をインバータが補間
動作回数	無制限	機械要素を使用していない

4. 仕様

HVRの仕様を表3に、外観を図2に示す。

タップ電圧は、当社製品の従来値(SVR:100~150V、TVR:100V)よりも小さな75Vとし、インバータの容量を抑え、機器の小形化、低コスト化を重視した仕様とした。タップ点数は7点(昇圧3段、素通し1段、降圧3段)とした。インバータの電圧調整範囲は、タップ間の電圧を補うように $\pm 37.5V$ とした。

回路構成を図3に示す。HVRは、不平衡電圧の調整も行なうため、制御変圧器に印加する電圧は、対称とはならない。したがって、制御変圧器は単相変圧器を3台で構成した。一方、励磁変圧器は単相変圧器を3台で構成すると、装置を大形化させてしまうので、安定巻線を追加した3相変圧器とした。

表3 仕様

項目	定格・仕様	備考
定格線路容量	3,000 kVA	
定格2次電圧	6,600 V	三相不平衡の改善が可能
定格2次電流	262 A	
電圧調整範囲	$\pm 262.5 V$	タップ: $\pm 225 V$ インバータ: $\pm 37.5 V$
結線	星形	相毎の独立調整可能
短絡強度	6,550 A、2秒	定格電流の25倍
機器の保護	電磁接触器(MC) 投入	



図2 外観

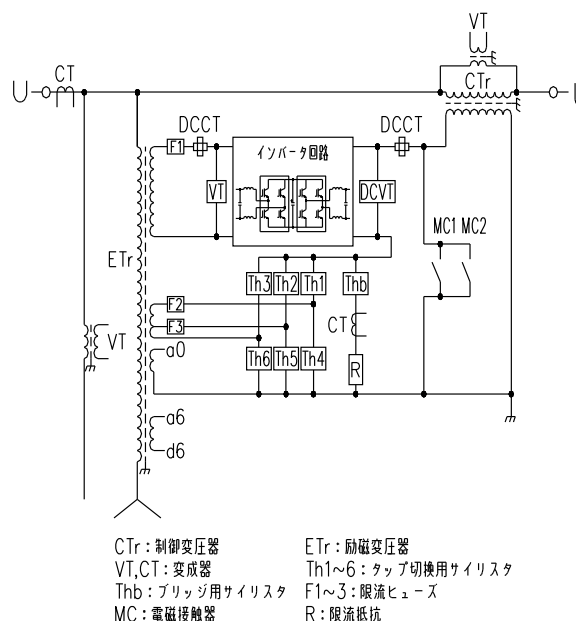


図3 回路構成

5. 制御方式

5.1 制御ブロック図

HVRはタップ切換制御とインバータ制御を組み合わせ、2次電圧を設定値に制御する。そして、2次電圧の制御は対象を相電圧とし、不平衡も調整するため、各相独立に行なう。

制御ブロック図を図4に示す。

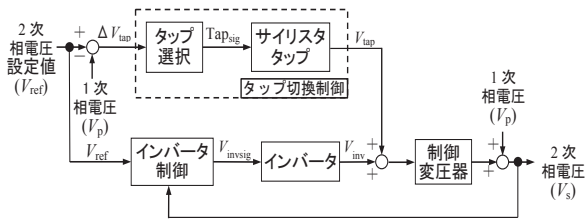


図4 制御ブロック図

5.2 制御方式

(1) 制御フロー

制御フローを図5に示す。

タップ切換制御は、1次側相電圧を監視して、2次側相電圧が規定値内になる様にタップ切換を行なう。そして、インバータ制御は、2次側相電圧が設定値となる様に出力電圧の制御を行なう。タップ切換を行なう時にはインバータは零電圧制御を行ない、タップ切換が完了すると、インバータは2次側相電圧の制御を再開する。この制御を各相独立で行なう。

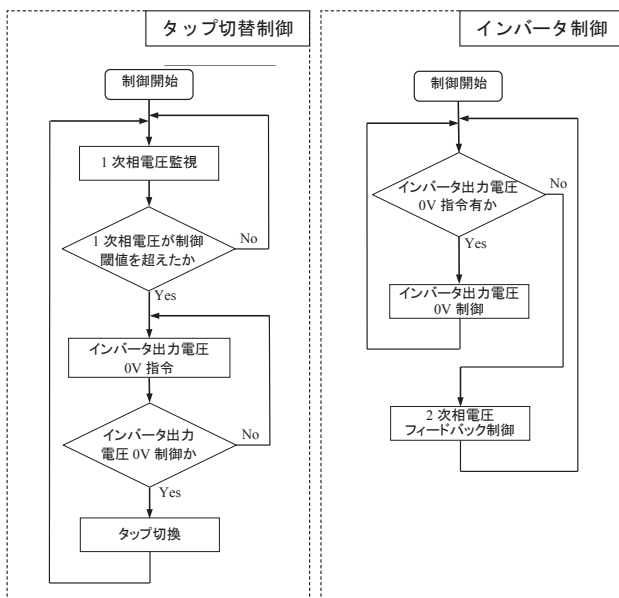


図5 制御フロー

(2) タップ切換制御

タップ切換器の1タップ分の補償電圧 V_{1tap} (相電圧換算)を求める。 V_{1tap} と設定値との差電圧(ΔV_{tap})を比較し、テーブルにあてはめタップを選択する。

- a. サイリスタタップ切換器による補償電圧計算 (1タップ分)

$$V_{1tap} = K_p \times K_s \times V_p \quad \dots\dots\dots ①$$

K_p : 励磁変圧器(ETr)巻数比(1タップ分)

K_s : 制御変圧器(CTr)巻数比

V_p : 1次相電圧の現在値

- b. 設定値との差電圧計算

$$\Delta V_{tap} = V_{ref} - V_p \quad \dots\dots\dots ②$$

V_{ref} : 2次相電圧設定値

- c. タップ位置の選択

②式で求めた ΔV_{tap} を用いて表4のテーブルにしたがってタップを選択する。

表4 タップ位置(Tap_{sig})選択テーブル

ΔV_{tap} の大きさ	Tap _{sig}	備考
$\Delta V_{tap} < -\frac{5}{2} V_{1tap}$	1	降圧3段
$-\frac{5}{2} V_{1tap} \leq \Delta V_{tap} < -\frac{3}{2} V_{1tap}$	2	降圧2段
$-\frac{3}{2} V_{1tap} \leq \Delta V_{tap} < -\frac{1}{2} V_{1tap}$	3	降圧1段
$-\frac{1}{2} V_{1tap} \leq \Delta V_{tap} < \frac{1}{2} V_{1tap}$	4	素通し
$\frac{1}{2} V_{1tap} \leq \Delta V_{tap} < \frac{3}{2} V_{1tap}$	5	昇圧1段
$\frac{3}{2} V_{1tap} \leq \Delta V_{tap} < \frac{5}{2} V_{1tap}$	6	昇圧2段
$\frac{5}{2} V_{1tap} \leq \Delta V_{tap}$	7	昇圧3段

(3) インバータ制御

インバータ制御のブロックを図6に示す。

インバータは常時2次相電圧をフィードバック制御している。ただし、タップ切換時はインバータ制御系の過渡的な応答を抑えるため、零電圧制御を行なう。

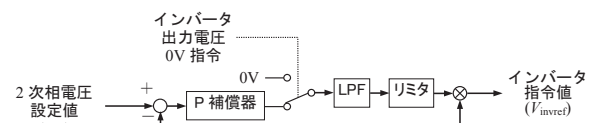


図6 インバータ制御ブロック図(1相分)

6. 試験結果

6.1 電圧調整試験

HVRを当社の次世代配電機器実証試験場⁽³⁾(スマートステーション)に設置し、試験を実施した(図8)。

スマートステーションは、配電関連製品の試験を行なう当社の設備であり、太陽光発電や不平衡負荷による影響を定量的に発生させ、開発品の性能評価を行なっている。

試験では、3相一括の重負荷投入時の急激な電圧変動に対する各部の電圧を測定し、2次電圧が基準電圧に制御されていることを確認した。結果を図7に示す。

また、三相不平衡電圧時におけるHVRの電圧調整効果を測定した。結果を表5に示す。不平衡負荷による影響で、HVRの1次電圧に最大3.45%の不平衡率が発生しているが、2次電圧の不平衡率は1.38%に改善されている(表5のNo.1)。また、1次電圧の不平衡率が低い場合でも、2次電圧の不平衡率が改善されており、この結果から、HVRで三相不平衡電圧を改善できることを確認した。



図8 スマートステーションでの試験風景

電圧急変時実効値データ(U-V相:赤、V-W相:青、W-U相:緑)

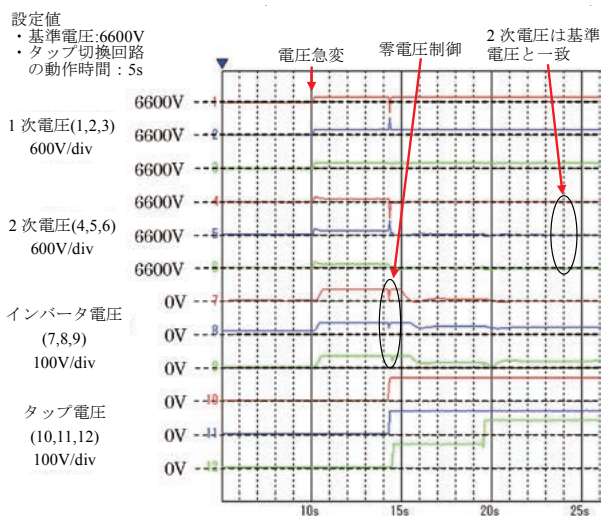


図7 電圧急変時の電圧調整値

表5 不平衡電圧調整動作の試験結果

No.	測定点	線間電圧(V)			不平衡率 (%)
		U-V間	V-W間	W-U間	
1	1次	6473	6653	6870	3.45
	2次	6518	6608	6675	1.38
2	1次	6555	6683	6863	2.67
	2次	6533	6593	6638	0.92
3	1次	6330	6368	6450	1.11
	2次	6563	6563	6615	0.53

6.2 短絡試験

HVRは、配電系統に短絡事故が発生した場合に、保護動作を正常に行ない短絡電流に耐えることが要求される。短絡電流は、制御変圧器で巻数比倍されて、タップ切換器のサイリスタとインバータのIGBTに過大な電流が流れる。半導体であるサイリスタとIGBTの短絡耐量は機械接点に比べ低いので、短絡電流の検出と保護動作を短時間で行なうことが必要である。

短絡試験を、当社の短絡試験設備⁽⁴⁾で行なった。試験電流は、JEC-2200「変圧器」の規格に準拠して定格電流の25倍、2秒間とした。

その結果、試験電流の通電中に、電圧及び電流に変化は認められなかった。また、HVRには損傷はなく試験後には正常に電圧調整動作が行なえた。この結果から、保護動作を正常に行ない短絡電流に耐えることが確認できた。

7. まとめ

大量の太陽光発電設備等が接続された配電系統の電圧変動に対し効果的に対応できる機器としてHVRを開発した。

開発においては、高速かつ連続的な電圧調整及び三相不平衡電圧の改善が可能である基本仕様を策定すると共に、HVRの制御方式を決定した。

また、HVRのプロト機を製作し、スマートステーションに設置して、実配電線に近い状態での電圧変動や電圧不平衡等が発生させ、HVRによる電圧調整効果が良好であることを確認した。

今後は、HVRの実用化検討を進め、市場投入を行なう予定である。

最後に、HVRの開発および試験に御協力いただいた中部電力株式会社殿、ならびに関係各位に感謝する次第である。

- (1) 苜川、若松、他：「新形三相静止形高圧自動電圧調整器(三相TVR)の開発」愛知電機技報No.33(2012)
- (2) 廣瀬、神部、他：「配電系統に太陽光発電が接続された場合のTVRの電圧調整効果について」愛知電機技報No.34(2013)
- (3) 「次世代配電機器実証試験場」愛知電機技報No.33(2012)
- (4) 「短絡試験設備」愛知電機技報No.35(2014)