

配電系統電圧制御へのパワーエレクトロニクス技術の適用

Application of Power Electronics Technologies to Voltage Regulation in Power Distribution Systems

山本 肇
YAMAMOTO Hajime

高木 喜久雄
TAKAGI Kikuo

関 長隆
SEKI Nagataka

パワーエレクトロニクス(以下、パワエレと略記)技術は、直流送電、周波数変換装置など送電系統への適用が進んでいるのに対して、配電系統への適用例は少ない。

近年、配電系統におけるパワエレ技術普及の先駆けとして、サイリスタを用いた高性能・高信頼の配電線用電圧調整器(TVR: Thyristor Voltage Regulator)を商品化した。また、電圧制御性能をよりいっそう高めるため、電圧調整器に無効電力補償機能を付加した装置としてDVC(Distribution system Voltage Compensator)を提案する。

Power electronics technologies have been applied to various equipment for power transmission systems, such as DC transmission systems and frequency converters. However, there have been few reports of the application of power electronics to power distribution systems.

In recent years, the thyristor voltage regulator (TVR) has been commercialized as a high-performance and high-reliability voltage regulator for power distribution lines, thus paving the way for the spread of power electronics technologies in power distribution systems. Moreover, in order to further enhance voltage regulation performance, we propose a distribution system voltage compensator (DVC) as a type of equipment in which a reactive power compensation function is added to a voltage regulator.

1 まえがき

整流器やインバータなどに適用されているパワエレ技術は、一般産業・交通分野などに広く普及している⁽¹⁾。電力分野では、直流送電や周波数変換用に、また、各種分散電源と電力系統とのインタフェース用にパワエレ技術が欠かせないものとなっている。しかし、電力系統、とりわけ配電系統の特性改善に、パワエレ技術が適用された例はそれほど多くない。

30年ほど前に、サイリスタを用いた配電線用電圧調整器が世の中に登場したが、その後姿を消してしまっていた。近年、北芝電機(株)は、高性能・高信頼のTVRを商品化した。パワエレ技術の進歩によって生まれたTVRの導入は、配電系統におけるパワエレ技術普及の第一歩を踏み出したと言える。

ここでは、TVRを中心に、現状及び今後の配電系統への新しいパワエレ技術の適用について述べる。

2 配電系統の現状と将来

国内外の配電系統では、大容量化や多様化する負荷特性に対応した系統制御装置が求められている。

規制緩和や環境に優しい技術の展開などに見られる時代の追い風のなか、マイクロガスタービン、風力発電、太陽光発電、あるいは燃料電池などの分散電源が増加している。

これらの分散電源は電力系統と比較して小容量であり、設置台数が少ないときには系統への影響も無視できる。しかし、局所的な集中設置や設置台数の増加が進めば、相対的な容量の増加により系統への影響を無視できなくなる。例えば、逆潮流^(注1)や高調波などの新しい課題が既に予想されている⁽²⁾⁽³⁾。

昨今、配電品質に階層を設けて運用する構想が検討されており、海外ではCustom Power⁽⁴⁾、国内ではFRIENDS⁽⁵⁾が提案されている。

これら配電系統における種々の問題解決と構想実現の手段として、パワエレ技術への期待が大きい。

また、配電機器における経済性のいっそうの追究のため、機器単体価格だけでなく保守費の削減が求められている。配電用遮断器などに使用される機械式接点を半導体に置き替えることで無接点化し、保守費の削減を図ることも提案されている。

3 配電系統における現状の電圧制御

配電系統では、線路上に分散して需要家の負荷が接続されており、そのすべての需要家における電圧変動を許容値に収める必要がある。このため、配電線の随所にステップ電圧調整器(SVR: Step Voltage Regulator)を設置してい

(注1) 電力系統に連系された分散電源が余剰電力を電力系統に送り込むこと。

る。SVRの原理は負荷時タップ切換え付き変圧器であり、電圧が許容値を外れそうになると変圧器のタップを切り換えて適正値に調整するものである。しかし、SVRには以下の限界がある。

- (1) タップ切換えを機械的な接点で行うことから動作時間に制約があり、急激な電圧変動に追従できない。
- (2) 機械的な接点には切換回数上の寿命があり、その交換周期を所定年数以上に必要性から、過渡的な電圧変動には対応できないようにしている。

これを解決する手段として誕生したTVRは、サイリスタによるタップ切換器を使用した電圧調整器で、一般需要家だけでなく、採石場・スキー場ほか瞬時的な電圧変動の起こりやすい地域に設置され、その電圧変動抑制に効果を上げている。装柱状態のTVRを図1に示す。



図1 装柱状態のTVR TVRは2本の電柱を使用して設置する。手前がサイリスタタンクである。
View of TVR installation

4 新型TVR

現行TVRの運用経験を生かし、より高速制御性能を持たせ、更に保守性と経済性を向上させた新型TVRを現在開発している。

新型TVRは次のような特長がある。

- (1) 大きな電圧変動が生じた場合は、必要なタップ位置に直ちに飛び越す機能を持たせた。
- (2) サイリスタの冷却方式を改良して、質量を20%弱軽くした。
- (3) サイリスタはヒューズをできるだけ溶断させないで保護する方式とし、TVR自身の故障以外で行う保護動作

に対しては、自動再始動するようにした。

- (4) 逆潮流に対応可能とした。

このほか、電圧調整幅拡大(±225Vから±300V)の性能アップを図ったが、回路構成の見直しほか種々の改良努力で、装置コストの低減を図った。

4.1 高速制御性

SVRは、モータを使ってタップを移動させるため、1ステップごとの移動になる。現行TVRのタップ移動もSVRに倣い1ステップごととしていたが、新型では必要とするタップ位置に直ちに移動させることもできるようにした。

図2はそのシミュレーション波形で、5sごとにTVR一次電圧に、-600V、-300V、-150V・・・の変動を与えたときの、二次電圧の応答を示している。(b)は現行TVRの制御方式により1タップごとに移動しているが(a)の新型TVRでは0.2s程度で最適なタップに移動していることがわかる。この時間を更に速めることは可能であるが、配電線負荷の種類・特性との関係も考えて応答時間を速める必要がある。今後、フィールド試験により最適値を検証することになっている。

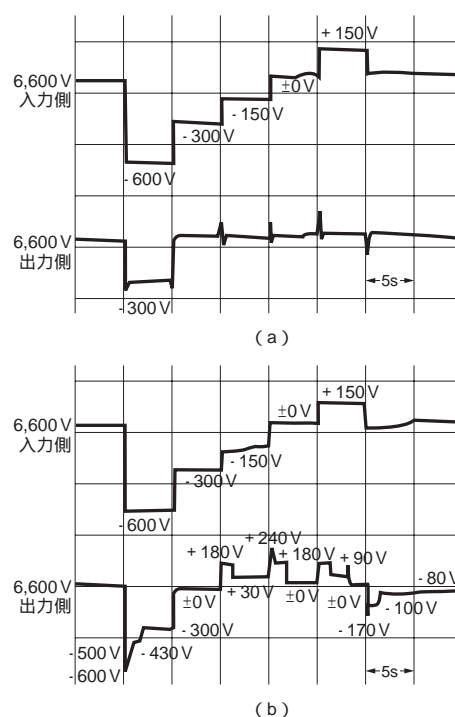


図2 新型と現行TVRの電圧ステップ応答特性の違い 入力電圧を5sごとに変動させたときに、(a)新型は0.2sで追従している。(b)は現行の制御方式による。

Dynamic responses of existing and new TVR control methods

4.2 サイリスタ冷却方式

柱上設置装置のパワーデバイスの冷却は、油漬けが一般的である。しかし、油は効果的な冷却手段ではあるが、必

然的に重くなるだけでなく、気中使用の冷却方式と比べると取扱い面でも不利である。密閉構造の制御盤から盤外に排熱する他の手段としては、ヒートパイプの利用が考えられるが、高価である。

新型 TVR の気中使用を前提に種々検討し、変圧器タンク下部側面からサイリスタの熱を変圧器油に伝達させるだけのシンプルな冷却方法を開発した。この方法は、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールなどのように油漬けできないパワーデバイスの冷却にも有用である。

4.3 ヒューズをあまり溶断させない保護方式

サイリスタの保護には通常半導体保護ヒューズが使われる。現行 TVR の延べ約 160 万時間の運用時間において、ヒューズ溶断は数回にとどまっているが、皆無ではない。例えば、落雷の波及により生ずる過電圧の侵入・電子回路の誤動作が溶断要因となっている。そのため、TVR 自身の故障を除き、ヒューズを溶断させることのないように保護方式を見直した。

サイリスタの保護協調曲線を図 3 に示す。曲線 A はサイリスタの許容サージオン電流特性、曲線 B はタップ短絡時サイリスタに流れる過電流、曲線 C はヒューズあるいは MCCB (配線用遮断器) の保護特性である。T1 秒以内であれば、 $B < C$ 、 $B < A$ の関係が成り立ち、ヒューズは溶断しない。

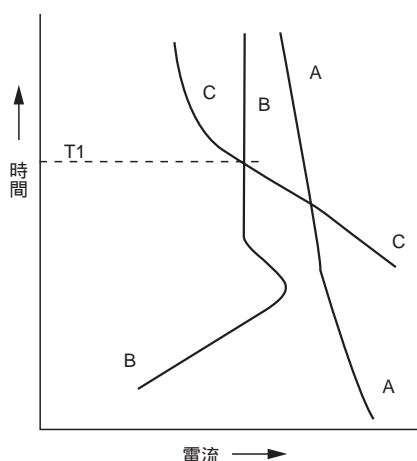


図 3 . サイリスタ保護協調曲線 サイリスタに許容されるサージオン曲線(A)は、サイリスタ短絡時の電流(B)より高い。短絡電流が続くと、T1 秒でヒューズ溶断曲線(C)がBを下回りヒューズが溶断する。

Thyristor protection coordination curve

この特性を利用すれば、サイリスタに過電圧が印加される前に、サイリスタを強制的にオンさせたとしても、ヒューズを溶断させることなく、サイリスタを保護できることがわかる。かりに制御回路異常で、サイリスタに継続的に短絡電流が流れるような状態が T1 秒継続すると、 $C < B < A$ となり、ヒューズが溶断しサイリスタを保護する。

ヒューズの溶断以外の保護動作では自動再始動を行い、稼働率のいっそうの向上を図った。

4.4 逆潮流への対応

逆潮流状態が発生すると、電圧制御が正常に行われない。すなわち、電圧を上げるようなタップ位置を選択しても二次電圧が上がらず、かえって一次電圧を低下させる。現行 TVR では、逆潮流状態の電圧制御機能を停止しているが、新型 TVR では電圧制御端子を二次から一次に切り換えて、運転を継続させることもできるようにしている。

逆潮流は系統切換えにより発生する場合が多かったが、昨今は分散電源の普及に伴って生ずることがある。その場合の電圧制御方法については、更に検討の余地が残されている。

4.5 主要諸元

以上の特長のほか、種々の改良を図った新型 TVR の主要諸元を表 1 に、外観を図 4 に示す。

表 1 . 新型 TVR 主要諸元
Main specifications of new TVR

項目	仕様
定格線路容量	3,000 kVA
定格線路電流	262 A
定格二次電圧	6,600 V
一次電圧範囲	6,300 V ~ 6,900 V
定格周波数	50 Hz 又は 60 Hz
相数	3
電圧調整幅	±300 V
タップ点数	7 点
タップ電圧	100 V
質量	2,350 kg



図 4 . 新型 TVR 図 1 と異なり、制御部と変圧器部のシンプルな構成となっている。
New TVR

5 DVC方式の提案

SVRやTVRは配電系統の電圧制御に有効な機器であるが、配電系統の負荷特性によっては、更に無効電力補償を併用することで、電圧制御性能をよりいっそう高めることが可能となる。スキーフットなどの回転機負荷は、起動時に過渡的に力率が低下するため、大きく電圧が低下する。これを補償するには、定常時に必要な台数に比べて多くの台数の電圧調整器の設置が必要となる。このような場合に、過渡的な力率低下を補償できれば、必要な電圧調整器の台数を低減することができる。無効電力補償を実現する装置としては、SVC(Static Var Compensator)があるが、ここでは電圧調整器にSVC機能を付加した装置としてDVCを提案する。DVCはTVRに二次巻線を追加して、その二次巻線にサイリスタ制御のコンデンサを接続した装置である。この構成により、TVRの電圧制御機能とコンデンサによる無効電力補償機能を兼ね備え、2種類の方法により配電線の電圧調整が可能となる。

図5は、30kmの配電線の末端に324kWの集中負荷が接続された配電系統において、負荷力率が0.2に低下した場合の電圧変化の様子を示している。図5(a)はTVRだけで、電圧制御をした結果であり、電圧を95%以上に保つのに4

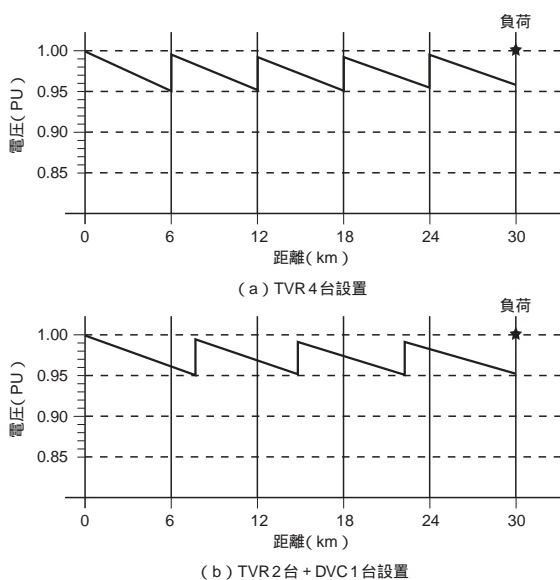


図5 . TVR と DVC の組合せ TVR を 4 台 設 置 の 場 合 と 同 等 の 電 圧 制 御 効 果 が ， TVR 2 台 + DVC 1 台 設 置 に よ り 実 現 で き て い る 。
Combination of TVR and DVC

台のTVRが必要となっている。一方、図5(b)はDVCを併用した場合で、TVR 2台とDVC 1台で(a)と同等の電圧制御結果が得られる。

電圧補償のために必要な機器の種類及び台数・容量は、負荷特性や系統条件によって大きく変わる。図5のような解析の実施は、もっとも経済的で効果の高い機器の組合せ・設置点・容量を選定するうえで、非常に重要な作業である。

6 あとがき

現在の配電系統における課題の一つである電圧制御機能の向上と省力化を実現する装置として新型TVRを紹介するとともに、より多機能な装置としてDVCを提案した。TVRは高速化とメンテナンスフリー化を実現したが、将来的には更なる電圧調整範囲の拡大を図る。

新しい発想とそれに伴う技術・信頼性、そして経済性の裏付けが伴うことでパワエレ技術が汎用的に適用される日が近いと考える。

文 献

- (1) 東芝レビュー“パワーエレクトロニクス特集号”. 55, 7, 2000.
- (2) 電気技術基準調査委員会.“分散型電源系統連系技術指針”. JEAG9701-1993, 日本電気協会. 1994-1.
- (3) 茂田省吾; 塚本修己. 分散型電源の導入と系統連系問題. 電気学会誌. 107, 9, 1987, p.909 - 912.
- (4) J.Douglas. Custom Power optimizing distribution services. EPRI Journal. May/June 1996, p.7 - 15.
- (5) 奈良宏一; 長谷川 淳. 新しい柔軟な電気エネルギー流通システム. 電気学会論文誌B. 117, 1, 1997, p.47 - 53.



山本 肇 YAMAMOTO Hajime

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 産業システム・パワエレ開発部グループ長。パワエレ応用システムの研究・開発に従事。電気学会、IEEE 会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



高木 喜久雄 TAKAGI Kikuo

電力システム社 電力事業部 電力変電技術部グループ長。直流送電や静止形無効電力補償装置などの開発及びシステムエンジニアリングに従事。電気学会会員。
Transmission, Distribution & Hydraulic Power Systems & Services Div.



関 長隆 SEKI Nagataka, D. Eng.

北芝電機(株)制御システム部兼メカトロシステム部技監、工博、技術士。パワーエレクトロニクス製品の開発・設計業務に従事。電気学会会員。
Kitashiba Electric Co., Ltd.