自励式無効電力補償装置を適用した 三相不平衡電圧変動補償装置の開発

正員 竹田 正俊 (三菱電機)
正員 村上昇太郎 (三菱電機)
正員 飯塚 昭廣 (東海旅客鉄道)
正員 持永 芳文 (鉄道総研)

Development of Three-phase Unbalance Voltage Fluctuation Compensating System
using Self-commutated Static Var Compensator

Masatoshi Takeda, Member Shotaro Murakami, Member
(Mitsubishi Electric Corporation)
Akihiro Iizuka, Member Yoshifumi Mochinaga, Member
(Central Japan Railway Company) (Railway Technical Research Institute)

This paper describes a self-commutated Static Var Compensator for suppressing voltage fluctuations caused by an a.c. electric railway (Shinkansen, or new trunk line). The a.c. electric railway is a single-phase load with large changes of reactive power and it causes large voltage fluctuations and power unbalances among three phases in the power system.

The authors have developed a new voltage fluctuation compensating system using a self-commutated Static Var Compensator. This system has the functions of reactive power compensation and negative-phase-sequence current absorption and can suppress rapidly-changing voltage fluctuations and reduce the three-phase power unbalance caused by the a.c. electric railway, effectively. This compensating system with a capacity of 40 MVA has been put to practical use, for the first time in the world, in 1993. The test results at site show that the system has excellent performance characteristics.

Theoretical analysis on the characteristics of voltage fluctuations with or without the compensating system and the evaluation of the test results including the comparison between the theoretical values and measured ones are also reported.

キーワード：無効電力補償装置，電圧変動，電気鉄道，三相不平衡負荷

1. まえがき

交流電気鉄道の給電系統は、電力会社の送電線とき電回路を変圧器で結んでいるだけであり、設備が簡単で、き電電圧を高くとれるなど、新幹線のような高速、大容量鉄道には不可欠な性能を有している。しかし、き電回路が電源と直結していることは、鉄道のような単相、間欠負荷の場合には、直接的に電源に三相不平衡や電圧変動などの影響を及ぼすことになるため、負荷に比べて十分に短絡容量の大きな電源から受電することが必須の条件となる。東海道新幹線は、建設時の事情や地理的条件から必ずしもこの条件を満足しているとはいえず、送電系統を一般負荷用送電系統と分離したり、並列コンデンサを設置して力率改善を図るなどの対策を講じてきた。しかし、最近の輸送力増強

に対する要請は強く、それに伴う負荷増大に対して、抜本的な対策をとる必要が生じ、三相不平衡および電圧変動に対する効果的な補償装置の実現が望まれてきた。

補償装置としては、自励式無効電力補償装置（略称としては、自励式SVCが一般的であるが、簡単のため本論文ではSVG:Static Var Generatorと略記する）が、近年、実用化されつつある⁽¹⁾⁽²⁾。SVGでは、電源周波数の1サイクル間に数回のスイッチング制御動作を行うことができ、また、無効電力と逆相電力の両方を制御できるため、三相不平衡な交流電気鉄道による電圧変動を効果的に補償することが可能となる。しかし、SVGを交流電気鉄道に適用した事例はまだ無く、電圧変動補償特性、補償容量や直流側コンデンサ容量の選定方法、制御方式などについてこれまで明らかにされていなかった。筆者らは、SVGを交流電気鉄道の電圧変動補償装置として適

用した場合の補償特性、補償容量選定方法、直流コンデンサ容量選定方法などを理論解析から明らかにすると共に、適切な制御方式を検討した。さらに、それらを基にSVGを適用した40MVA容量の新幹線電圧変動補償装置の開発を行い、交流電気鉄道用として世界で初めて実用化した⁽³⁾⁽⁴⁾。

本論文では、まず、交流電気鉄道負荷に対するSVGの補償特性および補償容量や直流側コンデンサ容量の選定方法に関して理論解析結果から明らかにし、新幹線の電圧変動補償装置として適用した場合の補償特性実測データと理論値との比較評価により、理論解析の妥当性について考察する。

2. SVGによる新幹線電圧変動の補償方法

〈2.1〉 SVGによる有効・無効電力の制御方法 図1にSVGの基本回路図を示す。SVGは電圧形インバータで構成しており、単相インバータを3回路用いて3相を構成している。SVGは電力系統側から見れば、交流電源として作用するため、各相においてSVGの出力電圧の大きさ V_c と位相 δ を制御することにより、SVGの各相の有効電力 P_c と無効電力 Q_c を独立して制御することができる。この特性を利用して、電源側の有効電力 P_s と無効電力 Q_s が各相で等しく、かつ、電源側インピーダンスによる電圧変動を補償するようにSVG出力の P_c と Q_c を制御すれば三相不平衡負荷による電圧変動を補償することが可能となる。なお、SVGでは有効電力の発生は無いため、SVG出力の各相の有効電力の和が0になるような正相無効電流と逆相電流を出力することができる。

図1 SVGの基本回路図と動作原理
 Fig.1 Basic circuit and operation of SVG

〈2.2〉 新幹線負荷の数式表現 SVGを用いて新幹線の電圧変動を補償する場合の回路図を図2に示す。新幹線用き電変圧器としては、受電電圧が特別高圧系統では一次側中性点が非接地のスコット結線変圧器が、また、超高圧系統では中性点直接接地ができる変形ウッドブリッジ結線変圧器が用いられているが、これらの変圧器における電流分布は同一であり、本論文で取り扱う電圧変動に関する点ではこれらに本質的な差異はないので、スコット結線変圧器

の場合について以降に検討する。図2において、三相交流電圧はスコット結線変圧器を介して直交する2相のM座とT座の単相電圧に変換される。同図で、交流電源電圧のV相電圧を基準にとり、線間電圧の大きさを1p.u.として、電源電圧ベクトルを次式で表現する。

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_v &= (1/\sqrt{3}) \exp(j2\pi/3) \\ \dot{E}_v &= 1/\sqrt{3} \\ \dot{E}_w &= (1/\sqrt{3}) \exp(-j2\pi/3) \end{aligned} \right\} \text{--- (1)}$$

また、M座とT座における新幹線負荷を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} \text{M座負荷: } \dot{W}_M &= \dot{V}_M \cdot \dot{I}_M^* = P_M + jQ_M \\ \text{T座負荷: } \dot{W}_T &= \dot{V}_T \cdot \dot{I}_T^* = P_T + jQ_T \end{aligned} \right\} \text{---- (2)}$$

ここで

$\dot{W}_M, \dot{W}_T$: M座とT座負荷の皮相電力ベクトル
 $\dot{V}_M, \dot{V}_T$: M座とT座の電圧ベクトル
 $\dot{I}_M, \dot{I}_T$: M座とT座の負荷電流ベクトル
 P_M, P_T : M座とT座負荷の有効電力
 Q_M, Q_T : M座とT座負荷の無効電力

スコット結線変圧器の2次側電圧を1p.u.とし、変圧器一次側に流れる負荷電流を規格値(p.u.値)で表現すると次式となる。本項では、以降、同様に電流は規格値で表現する。

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{MI} &= (P_M - jQ_M) \exp(j\pi/2) = Q_M + jP_M \\ \dot{I}_{TI} &= (2/\sqrt{3})(P_T - jQ_T) \end{aligned} \right\} \text{-- (3)}$$

従って、図2のM座とT座負荷電流の3相側における電流分布から、3相側での新幹線負荷電流を次式で表わす。

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{LU} &= \dot{I}_{MI} - (1/2)\dot{I}_{TI} = (Q_M + jP_M) - (1/\sqrt{3})(P_T - jQ_T) \\ \dot{I}_{LV} &= \dot{I}_{TI} = (2/\sqrt{3})(P_T - jQ_T) \\ \dot{I}_{LW} &= -\dot{I}_{MI} - (1/2)\dot{I}_{TI} = -(Q_M + jP_M) - (1/\sqrt{3})(P_T - jQ_T) \end{aligned} \right\} \text{---- (3)}$$

図2 SVGと新幹線負荷の3相交流回路
 Fig.2 Three-phase a.c. circuit of SVG and Shinkansen railway load

(3)式と(4)式から、変圧器一次側の3相各相の負荷の皮相電力 ($\dot{W}_{LU}, \dot{W}_{LV}, \dot{W}_{LW}$) は次式で表現できる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{W}_{LU} &= \dot{V}_U \cdot \overline{I_{LU}} = P_{LU} + jQ_{LU} \\ &= (1/6) \{ 3P_M + P_T - \sqrt{3} (Q_M - Q_T) \\ &\quad + j(3Q_M + Q_T + \sqrt{3} (P_M - P_T)) \} \\ \dot{W}_{LV} &= \dot{V}_V \cdot \overline{I_{LV}} = P_{LV} + jQ_{LV} \\ &= (2/3) (P_T + jQ_T) \\ \dot{W}_{LW} &= \dot{V}_W \cdot \overline{I_{LW}} = P_{LW} + jQ_{LW} \\ &= (1/6) \{ 3P_M + P_T + \sqrt{3} (Q_M - Q_T) \\ &\quad + j(3Q_M + Q_T - \sqrt{3} (P_M - P_T)) \} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 P_{LU}, P_{LV}, P_{LW} は各相の負荷の有効電力を、 Q_{LU}, Q_{LV}, Q_{LW} は各相の負荷の無効電力を示す。

<2・3> SVGによる電圧変動の補償 SVGの各相の皮相電力を $\dot{W}_{CU}, \dot{W}_{CV}, \dot{W}_{CW}$ として、下記のように表現する。

$$\dot{W}_{CU} = P_{CU} + jQ_{CU}, \dot{W}_{CV} = P_{CV} + jQ_{CV}, \dot{W}_{CW} = P_{CW} + jQ_{CW} \quad (6)$$

ここで、 P_{CU}, P_{CV}, P_{CW} : SVGの各相の有効電力
 Q_{CU}, Q_{CV}, Q_{CW} : SVGの各相の無効電力

従って、SVGで補償後の電源側の電力 $\dot{W}_{SU}, \dot{W}_{SV}, \dot{W}_{SW}$ は(5)式と(6)式から次のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{W}_{SU} &= \dot{W}_{LU} + \dot{W}_{CU} = (P_{LU} + P_{CU}) + j(Q_{LU} + Q_{CU}) \\ &= P_{SU} + jQ_{SU} \\ \dot{W}_{SV} &= \dot{W}_{LV} + \dot{W}_{CV} = (P_{LV} + P_{CV}) + j(Q_{LV} + Q_{CV}) \\ &= P_{SV} + jQ_{SV} \\ \dot{W}_{SW} &= \dot{W}_{LW} + \dot{W}_{CW} = (P_{LW} + P_{CW}) + j(Q_{LW} + Q_{CW}) \\ &= P_{SW} + jQ_{SW} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで、 P_{SU}, P_{SV}, P_{SW} : 電源側の各相の有効電力
 Q_{SU}, Q_{SV}, Q_{SW} : 電源側の各相の無効電力

一方、電源側インピーダンスの抵抗分も含めて電圧変動を補償するには、電源側の補償後の有効電力を P_o 、無効電力を Q_p とした場合に、 P_o と Q_p は次式を満足する必要がある。

$$\left. \begin{aligned} P_{SU} &= P_{SV} = P_{SW} = P_o, \quad Q_{SU} = Q_{SV} = Q_{SW} = Q_p \\ P_o &= (P_M + P_T) / 3, \quad Q_p = (R / \lambda) P_o \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし、 R : 電力系統インピーダンスの抵抗分

λ : 電力系統インピーダンスのリアクタンス分

(8)式で、 P_o はSVGが有効電力を発生できないため、電源側の有効電力と負荷側の有効電力は等しくなければならないという制約条件から決まるものであり、また、 Q_p は電源側に P_o が流れた時に、電源側の抵抗分による電圧降下を0とするために必要な条件である。

次に、(8)式の条件を満足するSVGの出力容量を(7)式を展開して求めると、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{W}_{CU} &= \{ (P_o - P_{LU}) + j(Q_o - Q_{LU}) \} + \{ -jQ_o \} + \{ -jQ_P \} \\ \dot{W}_{CV} &= \{ (P_o - P_{LV}) + j(Q_o - Q_{LV}) \} + \{ -jQ_o \} + \{ -jQ_P \} \\ \dot{W}_{CW} &= \{ (P_o - P_{LW}) + j(Q_o - Q_{LW}) \} + \{ -jQ_o \} + \{ -jQ_P \} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ただし、 $Q_o = (Q_M + Q_T) / 3$

(9)式において、右辺の第一項目の $\{ \}$ は負荷の逆相電力を意味し、第2項目の $\{ \}$ は負荷の正相無効電力を意味する。また、第3項目の $\{ \}$ は電力系統の抵抗分電圧降下を補償するために必要な無効電力を意味する。

また、(5)式と(9)式から、SVGの出力の有効電力成分 P_c と無効電力成分 Q_c をM座とT座の有効電力と無効電力の形で表現すると次式となり、この式よりSVGの必要な補償容量を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} P_{CU} &= -(1/6) \{ (P_M - P_T) - \sqrt{3} (Q_M - Q_T) \} \\ Q_{CU} &= -(1/6) \{ (3Q_M + Q_T) + \sqrt{3} (P_M - P_T) + 2(R/\lambda) (P_M + P_T) \} \\ P_{CV} &= (1/3) (P_M - P_T) \\ Q_{CV} &= -(1/3) \{ 2Q_T + (R/\lambda) (P_M + P_T) \} \\ P_{CW} &= -(1/6) \{ (P_M - P_T) + \sqrt{3} (Q_M - Q_T) \} \\ Q_{CW} &= -(1/6) \{ (3Q_M + Q_T) - \sqrt{3} (P_M - P_T) + 2(R/\lambda) (P_M + P_T) \} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

SVGで補償する際に、一般には電圧変動は許容値以内に入れば良く、電圧変動を完全に0にする必要がない場合が实际的である。このため、本論文では補償率 k というファクタを導入し、次のように定義する。

$$k = \frac{\text{SVG出力容量}}{\text{完全補償時の容量}} \quad (11)$$

即ち、SVGの補償容量が完全補償時の容量より小さい場合には、完全補償時の補償指令値に対して k 倍の容量をSVGが出力するように制御する。

補償率 k でSVGを制御した場合の補償後の電源側の皮相電力は(5), (7), (9)式を用いて次式で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{W}_{SU} &= \dot{W}_{LU} + k \dot{W}_{CU} = \{ kP_o + (1-k)P_{LU} \} + j \{ (1-k)Q_{LU} - kQ_P \} \\ \dot{W}_{SV} &= \dot{W}_{LV} + k \dot{W}_{CV} = \{ kP_o + (1-k)P_{LV} \} + j \{ (1-k)Q_{LV} - kQ_P \} \\ \dot{W}_{SW} &= \dot{W}_{LW} + k \dot{W}_{CW} = \{ kP_o + (1-k)P_{LW} \} + j \{ (1-k)Q_{LW} - kQ_P \} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

<2.4> 受電点での電圧変動 図2の回路において、受電点での電圧は図3のベクトル図から次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{UV} &= \dot{V}_U - \dot{V}_V = (\dot{E}_U - \dot{E}_V) - (R + jX)(\dot{I}_{SV} - \dot{I}_{SU}) \\ \dot{V}_{VW} &= \dot{V}_V - \dot{V}_W = (\dot{E}_V - \dot{E}_W) - (R + jX)(\dot{I}_{SW} - \dot{I}_{SV}) \\ \dot{V}_{WU} &= \dot{V}_W - \dot{V}_U = (\dot{E}_W - \dot{E}_U) - (R + jX)(\dot{I}_{SU} - \dot{I}_{SW}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここで、 $\dot{V}_{UV}, \dot{V}_{VW}, \dot{V}_{WU}$ は受電点での相間電圧ベクトルを示す。

(13)式から、受電点におけるUV相間の電圧変動値 ΔV_{UV} は、

近似的に次式のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \Delta V_{UV} &= -I_{SU}\{R \cdot \cos(\phi_U + \pi/6) + X \cdot \sin(\phi_U + \pi/6)\} \\ &\quad + I_{SV}\{R \cdot \cos(\phi_V + \pi/6) + X \cdot \sin(\phi_V + \pi/6)\} \\ &= -(R/2)\{3(P_{SU} + P_{SV}) - \sqrt{3}(Q_{SU} - Q_{SV})\} \\ &\quad - (X/2)\{3(Q_{SU} + Q_{SV}) + \sqrt{3}(P_{SU} - P_{SV})\} \quad \text{--- (14a)} \end{aligned}$$

また、VW相間とWU相間の電圧変動(ΔV_{VW} , ΔV_{WU})は(14)式の相順を入れ替えれば良く、次式となる。

$$\Delta V_{VW} = -(R/2)\{3(P_{SV} + P_{SW}) - \sqrt{3}(Q_{SV} - Q_{SW})\} - (X/2)\{3(Q_{SV} + Q_{SW}) + \sqrt{3}(P_{SV} - P_{SW})\} \quad \text{--- (14b)}$$

$$\Delta V_{WU} = -(R/2)\{3(P_{SW} + P_{SU}) - \sqrt{3}(Q_{SW} - Q_{SU})\} - (X/2)\{3(Q_{SW} + Q_{SU}) + \sqrt{3}(P_{SW} - P_{SU})\} \quad \text{--- (14c)}$$

ただし、 ΔV の負の極性は電圧降下を表す。また、

$$\left. \begin{aligned} P_{SU} &= 1/\sqrt{3} I_{SU} \cos \phi_U, & Q_{SU} &= 1/\sqrt{3} I_{SU} \sin \phi_U \\ P_{SV} &= 1/\sqrt{3} I_{SV} \cos \phi_V, & Q_{SV} &= 1/\sqrt{3} I_{SV} \sin \phi_V \\ P_{SW} &= 1/\sqrt{3} I_{SW} \cos \phi_W, & Q_{SW} &= 1/\sqrt{3} I_{SW} \sin \phi_W \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (15)}$$

である。

式(5), (12), (14)を用いると、SVGを補償率 k で制御した場合の電圧変動率を表す関係式として、次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_{UV} &= -(R/2)(1-k)[(P_M + 3P_T) - \sqrt{3}(Q_M - Q_T)] \\ &\quad - (X/2)(1-k)[(Q_M + 3Q_T) + \sqrt{3}(P_M - P_T)] \\ \Delta V_{VW} &= -(R/2)(1-k)[(P_M + 3P_T) + \sqrt{3}(Q_M - Q_T)] \\ &\quad - (X/2)(1-k)[(Q_M + 3Q_T) - \sqrt{3}(P_M - P_T)] \\ \Delta V_{WU} &= -(1-k)(2R \cdot P_M + 2X \cdot Q_M) \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (16)}$$

3. SVGの制御方法とその特性検証試験

<3.1> SVGの制御方式 図4はSVGの制御回路ブロック図を示す。制御回路では、負荷の3相電流(i_{LU} , i_{LV} , i_{LW})を入力して、負荷電力検出回路で3相2相変換を行う事により、正相の有効成分(i_{LP1})と無効成分(i_{LQ1})および逆相の有効成分(i_{LP2})および無効成分(i_{LQ2})を検出している。検出した各成分は次段の低域通過フィルタに入力されて

図3 三相交流回路における電圧変動ベクトル図
Fig.3 Voltage fluctuation Vector diagram

直流成分が検出されるが、このフィルタは負荷変動に対して十分追従できるように、図4に示す特性を選定している。低域フィルタの出力は次段の演算回路に入力され、次式で3相電流指令値(i_{RU} , i_{RV} , i_{RW})が算出される。

$$\left. \begin{aligned} i_{RU} &= i_{CQ1} \cdot \cos(\omega t - 2/3\pi) + i_{CP2} \cdot \sin(\omega t + 2/3\pi) \\ &\quad + i_{CQ2} \cdot \cos(\omega t + 2/3\pi) \\ i_{RV} &= i_{CQ1} \cdot \cos(\omega t) + i_{CP2} \cdot \sin(\omega t) \\ &\quad + i_{CQ2} \cdot \cos(\omega t) \\ i_{RW} &= i_{CQ1} \cdot \cos(\omega t + 2/3\pi) + i_{CP2} \cdot \sin(\omega t - 2/3\pi) \\ &\quad + i_{CQ2} \cdot \cos(\omega t - 2/3\pi) \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (17)}$$

ここで、

i_{CQ1} : 正相出力指令信号の無効成分

i_{CP2} , i_{CQ2} : 逆相出力指令信号の有効成分と無効成分

ω : 三相交流電源の角周波数

であり、また、 i_{CQ1} , i_{CP2} , i_{CQ2} は次式により求めている。

$$i_{CQ1} = i_{LQ1} + (R/X) i_{LP1}, \quad i_{CP2} = i_{LP2}, \quad i_{CQ2} = i_{LQ2}$$

この電流指令値は次段の出力リミット回路に入力される。3相各相の電流指令値のいずれかが出力リミットレベルに達した場合には、(11)式の補償率 k が出力リミット回路で演算され、3相電流指令値は自動的に k 倍されて出力電流が電流上限値を超えないように制御される。この場合、SVGの出力電流ベクトルは k 倍されて比例的に変化するだけであり、その方向性は保たれ、補償後の電圧変動は $(1-k)$ 倍に抑制できる。なお、3相の電流指令値は出力リミット回路において3相分の合計が常に0になるように演算されている。

<3.2> SVGの電圧変動補償特性の検証 SVGの電圧変動補償特性を確認するため、図5の回路にて試験を行った。新幹線負荷に電するスット結線変圧器はY/Δ結線変圧器とY/Y結線変圧器の組み合わせにより模擬しており、Y/Δ結線変圧器の二次側のvw相間電圧をT座電圧とし、Y

図4 SVGの制御回路ブロック図
Fig.4 Block diagram of control circuit of SVG

／Ｙ結線変圧器の２次側のwu相間電圧をM座電圧とする事により、90度の位相差を有する2相電圧を得ている。この場合の一次側の負荷電流分布はドット結線変圧器と同一となる。SVGは2kVA容量のものを使用し、図4の制御回路を用いて制御している。

図6は、三相不平衡負荷に対する電圧変動補償特性を検証するために、M座負荷のみを接続して、力率を新幹線負荷の力率にほぼ等しい0.7にした状態で負荷電流を変化させた場合の受電点の電圧変動補償特性を示す。同様に、T座負荷のみに通電した場合の受電点の電圧変動補償特性を図7に示す。この試験の結果は下記のように要約できる。

(1) SVG無しの場合の電圧変動率

M座またはT座のみに負荷がある場合に、受電点の3相各相には不平衡な電圧変動が生じる。この電圧変動率の理論値は(16)式で $k=0$ とすることにより求めることができ、理論計算結果を図6および図7に点線で示している。実測した電圧変動率を図中にプロットで対比させて示しているが、実測値は理論計算値とほぼ一致した結果が得られた。

(2) SVG有りの場合の電圧変動率

SVGで補償後の電圧変動率の理論値は、(16)式で補償率 k を指定することにより求めることができる。また、補償率 k は、(10)式から求めた補償容量が各相の補償容量の上限値(2kVA/3)を超過しない場合は $k=1$ とし、超過した時に(11)式で k を演算することにより求めることができる。このようにして求めた電圧変動率と補償率 k の理論計算結果を図6と図7に実線および一点鎖線で示している。また、実測した電圧変動率および k 値を図中にプロットで示しているが、実測値はいずれも理論計算値との良い一致性が得られ、理論解析の妥当性が確認できた。また、図に示すように、SVGの補償容量が上限に達していない期間($k=1$ の期間)では、電圧変動率は各相ともほとんど0に抑制されており、三相不平衡負荷に対するSVGの有効性が確認できた。さらに、負荷電流が増加し、SVGの補償容量上限値を超過した場合には、SVG制御回路内の出力リミット回路が動作し、補償率 k を下げてSVG出力容量を定格上限値に保つように動作する結果、 k が低下するにつれて電圧変動率が大きくなっていくが、 k に対する電圧変動率の特性は実線で示す理論計算値と良く一致していることが分かる。

4. 新幹線用電圧変動補償装置の実用化開発

＜4・1＞ システム構成 図8に東海道新幹線新枇杷島変電所に設置した40MVA容量の新幹線電圧変動補償装置のシステム構成図を示す。この装置では、系統電圧77kVを変圧器(TR1)により降圧し、20kV母線に20MVA容量SVGを2台並列に接続している。SVGの各7- μ mは4.5kV/3kA定格GTOを3直列接続しており、それを単相ブリッジ構成したインバータユニットを3段直列多重接続している。また、高調波と応答性の面からPWM周波数は300Hzに選定した。PWM時に発生する高次の高調波電流を吸収するために高調波フィルタを20kV母線に接続しているが、この高調波フィルタは力率改善用コンデンサを兼ねており、2×15MVAの容量に選定している。

図5 SVGの性能検証用試験回路
Fig.5 Testing circuit for verifying performance characteristics

図6 M座負荷のみの場合の電圧変動率特性
Fig.6 Voltage fluctuation characteristics with only M-phase loading

図7 T座負荷のみの場合の電圧変動率特性
Fig.7 Voltage fluctuation characteristics with only Teaser loading

図8 新幹線用電圧変動補償装置のシステム構成
Fig.8 System configuration of voltage compensating system

〈4・2〉 直流側コンデンサ容量の選定 SVGが逆相電流を出力する場合、直流側コンデンサには電源周波数の2倍周波数の電圧変動が生じるが、この電圧変動を適切な値に抑えるように直流コンデンサ容量を選定する必要がある。以下に、コンデンサ容量の選定方法を示す。

電源側の各相の相電圧とSVGの逆相電流を次式で表現する。

$$\left. \begin{aligned} e_u(t) &= \sqrt{2} V \cos(\omega t) \\ e_v(t) &= \sqrt{2} V \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ e_w(t) &= \sqrt{2} V \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \text{--- (18)}$$

$$\left. \begin{aligned} i_v(t) &= \sqrt{2} I_2 \cos(\omega t + \psi) \\ i_v(t) &= \sqrt{2} I_2 \cos(\omega t + \psi + 2\pi/3) \\ i_w(t) &= \sqrt{2} I_2 \cos(\omega t + \psi - 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \text{--- (19)}$$

ここで、

V : 電源側相電圧実効値, I_2 : SVGの逆相電流実効値

ψ : 逆相電流の位相

この場合の電源側の瞬時電力 p_{in} は次式で求められる。

$$\begin{aligned} p_{in} &= e_u(t)i_v(t) + e_v(t)i_v(t) + e_w(t)i_w(t) \\ &= 3VI_2 \cos(2\omega t + \psi) \end{aligned} \text{--- (20)}$$

また、SVG直流側の瞬時電力 p_{dc} は次式で表される。

$$p_{dc} = v_{dc}(t)C(dv_{dc}(t)/dt) \text{--- (21)}$$

ここで、 $v_{dc}(t)$ は直流電圧, C は直流コンデンサ容量である。

$p_{in} = p_{dc}$ が成立することから、(20)式と(21)式より直流電圧の平均値を V_0 とすると、 V_{dc} は次式で表される⁽⁵⁾。

$$\begin{aligned} v_{dc}(t) &= V_0 \sqrt{1 + \frac{3VI_2}{\omega CV_0^2} \sin(2\omega t + \psi)} \\ &= V_0 + \frac{3VI_2}{2V_0 C \omega} \sin(2\omega t + \psi) \end{aligned} \text{--- (22)}$$

ただし、

$$1 \gg \frac{3VI_2}{V_0^2 C \omega}$$

(22)式をSVG定格容量で単位化して、電圧変動率(%)として表現すると次式となる。

$$\Delta V_{dc}(\%) = \frac{(V_p - V_0)}{V_0} \times 100 = \frac{K_{NE}}{4C_{pu}} \times 100 \text{--- (23)}$$

ただし、

$$K_{NE} = 3VI_2 / (\text{SVG定格容量}) = (\text{逆相出力容量}) / (\text{SVG容量})$$

$$C_{pu} = (\omega CV_0^2 / 2) / (\text{SVG定格容量})$$

$$V_p = \text{直流電圧ピーク値} = V_0 + 3VI_2 / (2V_0 C \omega)$$

図8の装置では、直流側の過電圧防止の意味から $\Delta V_{dc} = 13\%$ に選定した。また、SVG定格容量に等しい逆相電力を出力する必要があるため、(23)式に $K_{NE} = 1$, $V_0 = 3800V$ を代入することにより、 $C = 14mF$ に選定した。

〈4・3〉 定常補償特性の確認試験

2台のSVGのうち、No. 1SVGを負荷模擬用として無効電流および逆相電流の発生源とし、No. 2SVGをそれに対する補償装置として動作させる方法を用いて、SVGの定常補償特性を検証した。

(1) 正相無効電流補償特性

図9に20MVA相当の正相無効電流をNo. 1SVGから発生させ、No. 2SVGでその無効電流を補償した場合のSVGおよび電源側の3相電流波形を示す。No. 1SVGとNo. 2SVGの電流は、大きさ等しく逆極性になって互いに打ち消し合っており、電源側に流れる電流は約230Aの3相平衡した進相電流になっている。この電流値は高調波フィルタの定格電流値に相当しており、No. 1SVGの発生無効電流は、No. 2SVGにより良好に補償できているものと評価できる。

(2) 逆相電流に対する補償特性

図10に20MVA相当の逆相電流をNo. 1SVGから発生させて、No. 2SVGでその逆相電流を補償した場合のSVGおよび電源側の3相電流波形を示す。No. 2SVGはNo. 1SVGと逆極性の逆相電流を出力し、電源側の電流は高調波フィルタ電流相当のほぼ三相平衡な電流に補償できていることが分かる。また、図中の E_d で示す直流電圧の変動率は約13%であり、(23)式で求めた理論値とほぼ一致した結果が得られた。

(備考) 図中の I_{c2u} 、 I_{c2v} は出力指令信号を示す。

図9 SVGの無効電力に対する補償特性
Fig.9 Compensation of reactive power

図10 SVGの逆相電流に対する補償特性
Fig.10 Compensation of negative phase-sequence current

＜4.4＞ 応答特性 図11にNo.1SVGからの出力（正相分5MVA+逆相分5MVA）をステップ的に変化させた場合のNo.2 SVG側の応答を測定した結果を示す。ステップ変化後から整定値の63%に達するまでの時間は約10msであり、新幹線負荷変動に比べて十分速い応答であることが確認できた。

図11 SVGのステップ応答
Fig.11 Step response of SVG

＜4.4＞ 実負荷試験結果 実際の新幹線負荷に対するSVGの補償効果を検証した結果を以下に示す。

(1) 図12はT座にのみ新幹線負荷がある場合に、SVGで補償時の電流波形の実測結果を示す。単相のT座負荷電流に対して、SVGはほぼ理論通りの補償電流を出力しており、その結果、電源側の電流は力率=1の三相平衡した電流に改善できていることがわかる。

(2) 図13の波形(a)～(f)は77kV受電点における各相間の補償前と補償後の電圧変動の同時測定結果を示している。補償前と補償後の電圧変動の同時測定方法としては、補償後の電圧変動は77kV母線電圧から測定し、補償前の電圧変動は77kV母線電圧に系統インピーダンスと電源側電流を乗じて、

ベクトル的に加算することにより補償前の77kV電圧変動を演算で作成し、これを補償前の電圧変動として測定した。

図中の①の期間以外はSVGは補償率 $k=1$ で制御しており、①の期間ではSVGの出力がリミットレベルに達したため、制御回路で補償率 k を0.77まで低減した状態を示している。補償前の電圧は各相が不平衡に変動しているが、補償後の電圧変動は $k=1$ の期間ではほとんど0に抑制できている。また、①の期間($k=0.77$)での電圧変動値は2.9%であるが、これは補償前の電圧変動値12.4%に対して $(1-0.77)$ 倍に相当しており、理論通りの補償特性となっている。

また、同図(g)に77kV母線における電圧不平衡率の測定結果を示すが、 $k=1$ の期間では不平衡率は約1.5%で一定となっている。これは、電力系統に既存の電圧不平衡によるものである。また、期間①では補償率を $k=0.77$ に低減した結果、電圧不平衡率は2%に増加している。

(3) 図14は電流、無効電力および逆相電流の測定結果を示す。同図の(d)と(e)に示すように、 $k=1$ の期間では補償後の無効電力および逆相電流はほぼ0に補償されており、無効電力および逆相電流は極めて良好に補償できていることがわかる。なお、図中の①部は、図13と同様に、SVGの出力を $k=0.77$ まで低減した場合を示しているが、この時に生じている無効電力および逆相電流値は同図(g)と(h)に示す補償前の値に対して $(1-0.77)$ 倍になっており、理論通りの特性が得られている。

また、同図(a)～(c)は各相の77kV電源側電流を測定した結果を示す。同図(i)～(k)に示すように、SVGの出力電流が三相不平衡に制御されて不平衡電流を補償している結果、電源側電流は3相とも同一大きさで変化しており、三相平衡化できていることがわかる。なお、①の期間では電流波形が三相間で異なっているが、この期間では $k=0.77$ に補償率を低減しているためである。

図12 新幹線実負荷試験時の電流波形
Fig.12 Current waveforms at actual load test

5. むすび

SVGを用いて三相不平衡な電圧変動を補償する方式を開発し、新幹線の電圧変動補償装置として実用化した。本論文では、この補償装置に関して、補償特性の解析、三相不平衡制御方式および試験結果について述べたが、その内容を要約すると次の通りである。

(1) SVGを新幹線負荷の電圧変動補償装置に適用した場合のSVG補償容量と補償後の電圧変動との関係を理論解析により求めた。特に、SVGの補償容量が負荷容量に比べて小さい場合における補償率の考え方を導入し、SVGがリミットにかかった場合の電圧変動補償特性を明らかにした。これらの特性は試験結果とほぼ一致する結果が得られ、理論解析結果の妥当性が確認できた。

(2) 三相不平衡負荷による電圧変動をSVGで補償する場合の、SVGの制御方法について提案した。この制御方式により、三相不平衡な電圧変動に対して良好な補償特性が得られることが試験結果から明らかになった。

(3) SVGを適用した40MVA容量の新幹線電圧変動補償装置を世界で初めて実用化し、1993年に東海道新幹線新枇杷島変電所に設置した。設置後の検証試験結果から、SVGは所期の性能を十分満足することが確認できた。また、測定した電圧変動値は理論解析結果とも良く一致し、三相不平衡な電圧変動に対するSVGの良好な補償効果が確認できた。

(4) 今回開発した電圧変動補償装置を適用すれば、超高压系統でない比較的弱い電力系統からでも新幹線などの交流電気鉄道にき電することが可能となるため、交流電気

鉄道の交流側の三相不平衡や電圧変動の補償装置として、今後の活用が期待できる。

終わりに、本開発および研究にご協力頂いた各位に深甚なる謝意を表します。

(平成7年8月25日受付、平成8年1月22日再受付)

図13 電圧変動抑制効果の測定結果
Fig.13 Measured results of voltage fluctuation

図14 逆相電流および無効電力補償効果の測定結果
Fig.14 Measured results of reactive power and negative-phase-sequence current

文献

- (1)長谷川, 別井, 大西, 竹田, 瀬戸, 村上: 「電力系統安定化用大容量自励式無効電力補償装置の開発」, 電気学会論文誌D, 111巻10号, 平成3年10月
- (2)S.Mori, K.Matsuno, T.Hasegawa, M.Takeda, S.Murakami; "DEVELOPMENT OF A LARGE STATIC VAR GENERATOR USING SELF-COMMUTATED INVERTERS FOR IMPROVING POWER SYSTEM STABILITY", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No.1, Feb., 1993
- (3)飯塚, 中間, 金山, 小林, 竹田, 村上: 「新幹線変電所における静止形無効電力発生装置 (SVG) の導入」 平成6年電気学会全国大会 NO.1086
- (4)飯塚, 平川, 岸田, 長谷, 持永, 竹田, 村上: 「東海道新幹線新枇杷島変電所における静止形無効電力発生装置 (SVG) の実負荷試験」 平成6年電気学会全国大会 NO.1087
- (5)竹下, 松井, 外山: 「単相PWMコンバータの直流電圧脈動の一抑制策」 電気学会論文誌D, 113巻9号, 平成5年

竹田 正俊 (正員)

昭和21年2月12日生。43年3月大阪大学工学部電気工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同社神戸製作所パワーエレクトロニクス部HVDCプロジェクト。主として無効電力補償装置およびアクティブフィルタの開発に従事。工学博士。61年、平成3年電気学会進歩賞受賞。

村上昇太郎 (正員)

昭和29年8月30日生。52年3月名古屋工業大学電気工学科卒業。54年3月九州大学工学部電気工学科修士課程修了。同年4月三菱電機入社。現在、同社神戸製作所パワーエレクトロニクス部にて主として無効電力補償装置の開発および設計に従事。第43回ホーム技術賞受賞。

飯塚 昭廣 (正員)

昭和17年8月14日生。40年3月東京工業大学理工学部電気工学科卒業。42年3月同大学院修士課程終了。同年4月日本国有鉄道入社。現在、東海旅客鉄道(株)技術本部技術開発センター所長。主として電気鉄道の電力供給に関する開発・運営に従事。平成6年科学技術長官賞(科学技術功労者)受賞。

持永 芳文 (正員)

昭和21年11月29日生。55年3月東京理科大学工学部電気工学科卒業。42年4月日本国有鉄道入社。現在、(財)鉄道総合技術研究所き電システム担当主幹技師。主として交流き電回路および絶縁協調に関する研究に従事。工学博士。技術士(電気・電子部門)平成6年電気学会進歩賞受賞。