配電系統用 SVC の安定性評価に関する検討

正員 清水 慶一* 正員 元治 崇*
正員 中沢 親志** 正員 中西 要祐**

Stability Estimation of SVCs in Distribution Systems

Keiichi Shimizu*, Member, Takamu Genji*, Member, Chikashi Nakazawa**, Member, Yosuke Nakanishi**, Member

This paper presents stability and an interactive phenomenon of one SVC, two or more sets of SVC, a SVC and a SVR in distribution systems. In particular, we focus on the saddle-node bifurcation and Hopf bifurcation points. The two local bifurcation points show a boundary of a stable domain.

キーワード：配電系統，無効電力補償装置，電圧調整器，分岐

Keywords: distribution system, static var compensator (SVC), step voltage regulator (SVR), bifurcation

1. まえがき

これまで配電系統の電圧制御はあらかじめ把握した系統データをもとにお客さま側の電圧を予測する方式により運用されている。しかし、分散電源、特に風力発電・太陽光発電など、発電量に比較的大きな変動要素が含まれる場合、それらの導入により、従来方式による電圧管理は困難となる。これらの問題を解決するため、高速かつ連続制御が可能な SVC など、パワエレ機器の配電系統への導入が進められている。上位系統においては複数台 SVC の相互干渉による不安定性が報告されており⁽¹⁾⁽²⁾、配電系統においても SVC 導入に関して、今後これら相互干渉を回避できる制御・整定方法、設置位置といった制約条件を整理する必要がある。本論文では、上述した項目の基礎検討として配電系統における単機 SVC、2 機 SVC の不安定現象、SVC と SVR の相互干渉問題を検討し、特に SVC を含む系統のサドル・ノード分岐点とホップ分岐点（局所分岐）に注目し SVC が安定に動作できる領域を明確化した。

2. 定式化と実効値モデル

2.1 単機 SVC を含む系統 文献 (1), (2) で検討さ

* 関西電力（株）電力技術研究所 電力基盤技術研究室（流通）
〒661-0974 尼崎市若王寺 3-11-20
Kansai Electric Power Co., Inc. Power Engineering R&D Center
3-11-20, Nakouji, Amagasaki 661-0974
** 富士電機アドバンステクノロジー（株）情報通信制御部 最適化システム Gr.
〒191-8502 日野市富士町 1 番地
Fuji Electric Advanced Technology Co., Ltd. Information and Control
Department, Optimization Systems Gr.
1, Fuji-machi, Hino 191-8502

れた系統を参考に SVC を含む配電系統の定式化および解析用実効値モデルの導出を行う。検討した系統を図 1 に示す。無限大母線 $\dot{V}_{inf}$ に配電線を介して SVC が接続されている。 $r_e + jX_e$, I_e , $G - jB$, $\dot{I}_L$, $\dot{V}_{SVC}$, $\dot{I}_{SVC}$ はそれぞれ配電線のインピーダンス、電流、負荷のアドミタンス、電流、SVC の電圧、電流を表す。負荷は定インピーダンスモデルとして表現した。変数上のドット (・) は複素数を表す。SVC はリアクトルを表現したサセプタンス B_L を制御する TCR 型とする。SVC は AVR により電圧一定制御を行い、SVC の電圧、電流の大きさ V_{SVC} , I_{SVC} により決まるサセプタンス値をとるモデルとする（SVC のコンデンサを表現したサセプタンス B_C は固定とする）。各電流は矢印方向を正とする。制御系を除く系統方程式を定式化すると (1) ~ (4) 式となる。

$$\begin{aligned} -\dot{I}_{SVC} &= j(B_C - B_L)\dot{V}_{SVC} \dots\dots\dots (1) \\ \dot{V}_{inf} - \dot{V}_{SVC} &= (r_e + jX_e)\dot{I}_e \dots\dots\dots (2) \\ \dot{I}_L &= (G - jB)\dot{V}_{SVC} \dots\dots\dots (3) \\ \dot{I}_L &= \dot{I}_e + \dot{I}_{SVC} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

図 1 単機 SVC の系統モデル

Fig. 1. A system model with a SVC.

また制御系 (AVR) を図 2 に示す。(1)~(4) 式より $\dot{V}_{SVC}$ を表すと (5) 式となる。

$$\dot{V}_{SVC} = \frac{\dot{V}_{inf}}{1 + (r_e + jX_e)\{G + j(B_C - B_L - B)\}} \dots\dots (5)$$

ここで SVC 電圧 $\dot{V}_{SVC}$ の大きさ V_{SVC} は (6) 式となる。

$$V_{SVC} = \frac{V_{inf}}{\sqrt{\{1 + r_e G - X_e(B_C - B_L - B)\}^2 + \{X_e G + r_e(B_C - B_L - B)\}^2}} \dots\dots\dots (6)$$

さらに (6) 式の右辺をまとめると (7) 式となる。

$$V_{SVC} = \frac{V_{inf}}{\sqrt{a_2 B_L^2 + a_1 B_L + a_0}} \dots\dots\dots (7)$$

ここで ,

$$\begin{aligned} a_0 &= 1 + (r_e^2 + X_e^2)\{G^2 + (B_C - B)^2\} \\ &\quad + 2\{r_e G - X_e(B_C - B)\} \\ a_1 &= 2\{X_e - (r_e^2 + X_e^2)(B_C - B)\} \\ a_2 &= r_e^2 + X_e^2 \end{aligned}$$

また (1) 式より SVC 電流 $\dot{I}_{SVC}$ の大きさ I_{SVC} は (8) 式となる。

$$I_{SVC} = (B_C - B_L)V_{SVC} \dots\dots\dots (8)$$

次に AVR を微分方程式で表現する。AVR は図 2 に示したモデルとする。図 2 を微分方程式で表現すると (9) 式となる。

$$\left. \begin{aligned} T_m \frac{dx}{dt} &= -x + V_{SVC} + k I_{SVC} \\ T_n \frac{dy}{dt} &= -x + V_{SVCref} \\ T_T \frac{dB_L}{dt} &= k_0 k_p x - k_0 k_p y - B_L - k_0 k_p V_{SVCref} \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

図 2 SVC の制御系 (AVR)

Fig. 2. A controller of the SVC (AVR).

(7),(8) 式を (9) 式に代入し, V_{SVC}, I_{SVC} を消去すると (10) 式となる。

$$\left. \begin{aligned} T_m \frac{dx}{dt} &= -x + \{-k B_L + (1 + k B_C)\} V_{inf} / \sqrt{a_2 B_L^2 + a_1 B_L + a_0} \\ T_n \frac{dy}{dt} &= -x + V_{SVCref} \\ T_T \frac{dB_L}{dt} &= k_0 k_p x - k_0 k_p y - B_L - k_0 k_p V_{SVCref} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここで初期値は以下とする。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ B_L \end{pmatrix}_{t=0} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ B_{L0} \end{pmatrix}$$

(10) 式は状態変数 x, y, B_L , パラメータ変数 $T_m, T_n, T_T, k, k_0, k_p, V_{SVCref}, V_{inf}, r_e, X_e, G, B, B_C$ の 3 次の非線形微分方程式である。(10) 式を単機 SVC の実効値モデルと呼ぶこととする。

2.2 2 機 SVC を含む系統 検討した系統を図 3 に示す。制御系を除く系統方程式を定式化すると (11) 式となる。ここで (11) 式のドット ($\cdot$) は複素数を表す。

$$\left. \begin{aligned} -\dot{I}_{SVC1} &= j(B_{C1} - B_{L1})\dot{V}_{SVC1} \\ -\dot{I}_{SVC2} &= j(B_{C2} - B_{L2})\dot{V}_{SVC2} \\ \dot{V}_{inf} - \dot{V}_{SVC1} &= (r_{e1} + jX_{e1})\dot{I}_{e1} \\ \dot{V}_{SVC1} - \dot{V}_{SVC2} &= (r_{e2} + jX_{e2})\dot{I}_{e2} \\ \dot{I}_{L1} &= (G_1 - jB_1)\dot{V}_{SVC1}, \dot{I}_{L2} = (G_2 - jB_2)\dot{V}_{SVC2} \\ \dot{I}_{SVC1} &= \dot{I}_{e2} + \dot{I}_{L1} - \dot{I}_{e1}, \dot{I}_{SVC2} = \dot{I}_{L2} - \dot{I}_{e2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

また制御系 (AVR) は図 2 の制御系を用いた。単機 SVC の場合と同様に, SVC 電圧と SVC 電流の大きさ $V_{SVC1}, V_{SVC2}, I_{SVC1}, I_{SVC2}$ を求め, これを図 2 を表現する式に代入すると (12) 式を得る。

図 3 2 機 SVC の系統モデル

Fig. 3. A system model with two SVCs.

$$\left. \begin{aligned}
 T_{m1} \frac{dx_1}{dt} &= -x_1 + \{-k_1 B_{L1} + (1 + k_1 + B_{C1})\} \\
 &\quad \times \sqrt{\beta/\alpha} V_{inf} \\
 T_{n1} \frac{dy_1}{dt} &= -x_1 + V_{SVCreff1} \\
 T_{T1} \frac{dB_{L1}}{dt} &= k_{p1} k_{01} x_1 - k_{p1} k_{01} y_1 - B_{L1} \\
 &\quad - k_{p1} k_{01} V_{SVCreff1} \\
 T_{m2} \frac{dx_2}{dt} &= -x_2 + \{-k_2 B_{L2} + (1 + k_2 B_{C2})\} \sqrt{c_{00}/\alpha} V_{inf} \\
 T_{n2} \frac{dy_2}{dt} &= -x_2 + V_{SVCreff} \\
 T_{T2} \frac{dB_{L2}}{dt} &= k_{p2} k_{02} x_2 - k_{p2} k_{02} y_2 - B_{L2} \\
 &\quad - k_{p2} k_{02} V_{SVCreff2} \\
 &\dots\dots\dots (12)
 \end{aligned} \right\}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 \alpha &= a_{00} + a_{10} B_{L1} + a_{01} B_{L2} + a_{11} B_{L1} B_{L2} + a_{21} B_{L1}^2 B_{L2} \\
 &\quad + a_{12} B_{L1} B_{L2}^2 + a_{20} B_{L1}^2 + a_{02} B_{L2}^2 + a_{22} B_{L1}^2 B_{L2}^2 \\
 \beta &= b_{00} + b_{01} B_{L2} + b_{02} B_{L2}^2
 \end{aligned}$$

a_{00}, b_{00}, c_{00} 等はシステムのインピーダンス, 制御系の定数で決定される値。

(12) 式は状態変数 $x_1, y_1, B_{L1}, x_2, y_2, B_{L2}$, パラメータ変数 $T_{m1}, T_{n1}, T_{T1}, k_1, k_{01}, k_{p1}, V_{SVCreff1}, r_{e1}, X_{e1}, G_1, B_1, B_{C1}, T_{m2}, T_{n2}, T_{T2}, k_2, k_{02}, k_{p2}, V_{SVCreff2}, r_{e2}, X_{e2}, G_2, B_2, B_{C2}, V_{inf}$ の 6 次非線形微分方程式である。(12) 式を 2 機 SVC の実効値モデルと呼ぶこととする。

2・3 SVC と SVR を含む系統 検討した系統を図 4, 系統方程式を (13) 式に示す。式中のドット (・) は複素数を表す。

$$\left. \begin{aligned}
 -\dot{I}_{SVC} &= j(B_C - B_L) \dot{V}_{SVC} \\
 \dot{V}_{inf} - \dot{V}_{SVR1} &= (r_{e1} + jX_{e1}) \dot{I}_{e1} \\
 \dot{V}_{SVR2} - \dot{V}_{SVC} &= (r_{e2} + jX_{e2}) \dot{I}_{e2} \\
 \dot{I}_{L1} &= (G_1 - jB_1) \dot{V}_{SVR2} \\
 \dot{I}_{L2} &= (G_2 - jB_2) \dot{V}_{SVC} \\
 \dot{I}_{L2} &= \dot{I}_{e2} + \dot{I}_{SVC} \\
 \dot{I}_{L1} + \dot{I}_{e2} &= \dot{I}'_{e1}, \dot{I}'_{e1}/\dot{I}_{e1} = 1/n \\
 \dot{V}_{SVR2}/\dot{V}_{SVR1} &= n
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

図 4 SVC, SVR を含む系統モデル

Fig. 4. A system model with a SVC and a SVR.

これまでと同様に SVC の制御系は図 2 の制御系を用いた。SVR の制御方程式⁽³⁾⁽⁴⁾を (14) 式に示す。 n, V_{SVRref}, T_s はそれぞれ SVR の巻数比, 電圧設定値, 時定数 (ここでは動作遅延時間) を表す。

$$T_s \frac{dn}{dt} = -V_{SVR2} + V_{SVRref} \dots\dots\dots (14)$$

単機 SVC, 2 機 SVC の場合と同様に, (13) 式の SVC, SVR の電圧, 電流の大きさ $V_{SVC}, I_{SVC}, V_{SVR}$ を求め, これを図 2 を表現する式と (14) 式に代入すると (15) 式を得る。

$$\left. \begin{aligned}
 T_m \frac{dx}{dt} &= -x + \{(1 + k B_C)n - k n B_L\} V_{inf} / \sqrt{\gamma} \\
 T_n \frac{dy}{dt} &= -x + V_{SVCreff} \\
 T_T \frac{dB_L}{dt} &= k_0 k_p x - k_0 k_p y - B_L - k_0 k_p V_{SVCreff} \\
 T_s \frac{dn}{dt} &= -n \sqrt{g_{00} + g_{01} B_L + g_{02} B_L^2} V_{inf} / \sqrt{\gamma} + V_{SVRref} \\
 &\dots\dots\dots (15)
 \end{aligned} \right\}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 \gamma &= f_{00} + f_{20} n^2 + f_{40} n^4 + f_{01} B_L + f_{02} B_L^2 + f_{21} n^2 B_L \\
 &\quad + f_{22} n^2 B_L^2 + f_{41} n^4 B_L + f_{42} n^4 B_L^2
 \end{aligned}$$

f_{00}, g_{00} 等はシステムのインピーダンス, 制御系の定数で決定される値。

(15) 式は状態変数 x, y, B_L, n , パラメータ変数 $T_m, T_n, T_T, k, k_0, k_p, V_{SVCreff}, r_{e1}, X_{e1}, G_1, B_1, B_C, T_s, V_{SVRref}, r_{e2}, X_{e2}, G_2, B_2, V_{inf}$ の 4 次非線形微分方程式である。(15) 式を SVC, SVR の実効値モデルと呼ぶこととする。

3. 線形化と固有値モデル

この章では, 前章で求めた実効値モデルを用いて, 平衡点を導出し, その平衡点近傍での線形化を行うことにより, 固有値モデルを求める。

3・1 単機 SVC を含む系統

(1) 平衡点の導出 状態変数の変化量が零となるという平衡点の定義⁽⁵⁾より実効値モデル (10) 式の左辺を零とし, 2 つの平衡点 1 および 2 (x^*, y^*, B_L^*) を求めると以下となる。

$$x^* = V_{SVCreff}, y^* = -B_L^*/(k_0 k_p),$$

$$B_L^* = \left(-A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - 4A_0 A_2} \right) / (2A_2)$$

ここで,

$$A_1^2 - 4A_0 A_2 > 0, A_0 = a_0 - (1 + k B_C)^2 V_{inf}^2 / V_{SVCreff}^2$$

$$A_1 = a_1 + 2k(1 + k B_C) V_{inf}^2 / V_{SVCreff}^2,$$

$$A_2 = a_2 - k^2 V_{inf}^2 / V_{SVCreff}^2$$

(2) 線形化 平衡点の存在条件 ($A_1^2 - 4A_0 A_2 > 0$) のもと、実効値モデル (10) 式の平衡点近傍での線形化を行う。これを (16) 式に示す。

$$\begin{pmatrix} \Delta \frac{dx}{dt} \\ \Delta \frac{dy}{dt} \\ \Delta \frac{dB_L}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/T_m & 0 & f_{BL}/T_m \\ -1/T_n & 0 & 0 \\ k_0 k_p / T_T & -k_0 k_p / T_T & -1/T_T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta B_L \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで,

$$f_{BL} = - \frac{\{ka_1 + 2(1 + k B_C)a_2\}B_L^* + \{2ka_0 + a_1(1 + k B_C)\}}{2(a_2 B_L^{*2} + a_1 B_L^* + a_0)^{3/2}} \times V_{inf}$$

(16) 式は状態変数 $\Delta x, \Delta y, \Delta B_L$ の 3 次線形微分方程式である (パラメータ変数は実効値モデルと同じ)。これを単機 SVC の固有値モデルと呼ぶこととする。

3・2 2 機 SVC を含む系統 3・1 節と同様に, 2 機 SVC を含む系統についても, 平衡点を導出し, 平衡点存在条件のもと, 実効値モデル (12) の平衡点近傍での線形化を行う。これを (17) 式に示す。

$$\begin{pmatrix} \Delta \frac{dx_1}{dt} \\ \Delta \frac{dy_1}{dt} \\ \Delta \frac{dB_{L1}}{dt} \\ \Delta \frac{dx_2}{dt} \\ \Delta \frac{dy_2}{dt} \\ \Delta \frac{dB_{L2}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/T_{m1} & 0 & f_{1BL1}/T_{m1} & 0 & 0 & f_{1BL2}/T_{m1} \\ -1/T_{n1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{p1}k_{01}/T_{T1} & -k_{p1}k_{01}/T_{T1} & -1/T_{T1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{2BL1}/T_{m2} & -1/T_{m2} & 0 & f_{2BL2}/T_{m2} \\ 0 & 0 & 0 & -1/T_{n2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{p2}k_{02}/T_{T2} & -k_{p2}k_{02}/T_{T2} & -1/T_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta B_{L1} \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta B_{L2} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで, $f_{1BL1}, f_{1BL2}, f_{2BL1}, f_{2BL2}$ は線形化点での係数。
(17) 式は状態変数 $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta B_{L1}, \Delta x_2, \Delta y_2, \Delta B_{L2}$ の 6 次線形微分方程式である (パラメータ変数は実効値モデルと同じ)。これを 2 機 SVC の固有値モデルと呼ぶこととする。

3・3 SVC と SVR を含む系統 3・1 節と同様に, SVC と SVR を含む系統についても, 平衡点を導出し, 平衡点存在条件のもと, 実効値モデル (15) 式の平衡点近傍での線形化を行う。これを (18) 式に示す。

$$\begin{pmatrix} \Delta \frac{dx}{dt} \\ \Delta \frac{dy}{dt} \\ \Delta \frac{dB_L}{dt} \\ \Delta \frac{dn}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/T_m & 0 & f_{1BL}/T_m & f_{1n}/T_m \\ -1/T_n & 0 & 0 & 0 \\ k_0 k_p / T_T & -k_0 k_p / T_T & -1/T_T & 0 \\ 0 & 0 & f_{2BL}/T_S & f_{2n}/T_S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta B_L \\ \Delta n \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで, $f_{1BL}, f_{1n}, f_{2BL}, f_{2n}$ は線形化点での係数。
(18) 式は状態変数 $\Delta x, \Delta y, \Delta B_L, \Delta n$ の 4 次線形微分方程式である (パラメータ変数は実効値モデルと同じ)。これを SVC, SVR の固有値モデルと呼ぶこととする。

4. 具体的な数値による安定性の検討

本章では, 単機 SVC・2 機 SVC・SVC と SVR を含むそれぞれの系統において, 標準定数の内, 単一のパラメータのみを変化させ, その変化に対する固有値軌跡の計算を, 固有値モデルを用いて実施し, 安定限界点である分岐点を求めた。さらに, 分岐点前後のパラメータ値において, 実効値モデルによる時間軸シミュレーションを実施し, SVC 電圧等が不安定となる様子を確認した。なお, それぞれの標準定数の基準値は 10 MVA, 6600 V, 60 Hz である。

4・1 単機 SVC を含む系統 表 1 の定数を標準定数として検討を行った。AVR の PI 制御後のゲイン $k_0 = 1.0$ とする。配電線巨長はリアクタンス換算で約 7.78 km に相当する。

前章の検討より実効値モデル (10) 式は分岐の発生に関して, 次の 3 つの条件が存在する。

- 条件 1: $A_1^2 - 4A_0 A_2 > 0 \rightarrow$ 2 つの平衡点が存在。
- 条件 2: $A_1^2 - 4A_0 A_2 = 0 \rightarrow$ サドル・ノード分岐点 (限界点)。
- 条件 3: $A_1^2 - 4A_0 A_2 < 0 \rightarrow$ 平衡点なし。

表 1 各パラメータの標準値

Table 1. The standard values of the each parameter.

Parameter	Standard value
Infinite bus voltage V_{inf}	1.0pu
Distribution line resistance r_e	0.4071pu
Distribution line reactance X_e	0.6826pu
Load conductance G	0.364pu
Load susceptance B	-0.072pu
Voltage set value of SVC $V_{SVCreff}$	1.0pu
Susceptance of SVC B_C	0.2pu
Slope reactance of SVC k	0.01pu
PI-controller gain at AVR k_p	2.1
Time-lag of first order time constant of voltage measurement at AVR T_m	0.03sec
PI-controller time constant at AVR T_n	0.01sec
Time constant after PI-control at AVR T_T	0.0046sec

したがって平衡点近傍の局所的な安定性に注目すれば、サドル・ノード分岐点が SVC の安定限界点となる。表 2 に (10), (16) 式により確認されたサドル・ノード分岐点が生じるパラメータ値を示す。表 2 を見ると、配電線の亘長を除いては、例えば無限大母線電圧が 0.7934 pu (5236 V) より低い場合であるなど、現実的ではない値となっており、実運用上は問題ないとする。

表 2 の結果を考慮し、固有値モデル (16) 式によりパラメータ変化に対する固有値軌跡の計算を行った。一例として系統負荷コンダクタンス G をパラメータとした場合のサドル・ノード分岐点近傍の固有値軌跡を図 5(a) に示す。 G

表 2 各パラメータのサドル・ノード分岐点

Table 2. The saddle node bifurcation points of the each parameter.

Parameter	Bifurcation point	Unstable domain
Load conductance G	0.6266pu	$0.6266\text{pu} < G$
Distribution line resistance r_e	0.6193pu	$0.6193\text{pu} < r_e$
Distribution line reactance X_e	0.2704pu 2.262pu	$0.2704\text{pu} < X_e$ $< 2.262\text{pu}$
Length of distribution line mlt	1.7056 times	1.7056 times $< mlt$
Infinite bus voltage V_{inf}	0.7934pu	$V_{inf} < 0.7934\text{pu}$
Voltage set value of SVC V_{SVCref}	1.2603pu	$1.2603\text{pu} < V_{SVCref}$

mlt は標準配電線インピーダンス(0.4071pu+j0.6826pu)からの倍率を表す。

(a) The locus of the eigen values before bifurcation

(b) The SVC voltage after bifurcation point

図 5 サドル・ノード分岐点付近の挙動

Fig. 5. Behavior near the saddle node bifurcation point.

の変化範囲は 0.6240 pu から 0.6265 pu である。固有値は G の変化に伴い複素共役の固有値が実数軸方向に移動し、

表 3 各パラメータの標準値

Table 3. The standard values of the each parameter.

Parameter	Standard value
Infinite bus voltage V_{inf}	1.0pu
Distribution line resistance 1 r_{e1}	0.1566pu
Distribution line reactance 1 X_{e1}	0.2625pu
Load conductance 1 G_l	0.05pu
Load susceptance 1 B_l	0.008pu
Voltage set value of SVC 1 $V_{SVCref1}$	1.0pu
Susceptance of SVC 1 B_{C1}	0.2pu
Slope reactance of SVC 1 k_1	0.01pu
PI-controller gain at AVR 1 k_{p1}	2.1
Time-lag of first order time constant of voltage measurement at AVR 1 T_{m1}	0.03sec
PI-controller time constant at AVR 1 T_{n1}	0.01sec
Time constant after PI-control at AVR 1 T_{T1}	0.0046sec
Distribution line resistance 2 r_{e2}	0.2505pu
Distribution line reactance 2 X_{e2}	0.4201pu
Load conductance 2 G_2	0.314pu
Load susceptance 2 B_2	-0.08pu
Voltage set value of SVC 2 $V_{SVCref2}$	1.0pu
Susceptance of SVC 2 B_{C2}	0.2pu
Slope reactance of SVC 2 k_2	0.01pu
PI-controller gain at AVR 2 k_{p2}	2.1
Time-lag of first order time constant of voltage measurement at AVR 2 T_{m2}	0.03sec
PI-controller time constant at AVR 2 T_{n2}	0.01sec
Time constant after PI-control at AVR 2 T_{T2}	0.0046pu

(a) Bifurcation

(b) The locus of the eigen values

図 6 分岐図と固有値軌跡

Fig. 6. Bifurcation and the locus of the eigen values.

0.6245 pu で 2 つの実数固有値となった後, 1 つは原点方向に, 1 つは負の方向に実数軸上を移動する。固有値の 1 つが実数軸上を原点方向に移動する様子は, サドル・ノード分岐点直前の固有値の特徴的な動きである⁽⁶⁾。図 5(b) に分岐点通過後 ($G = 0.63$ pu) の実効値モデルによる時間軸シミュレーション結果を示す。SVC 電圧 V_{SVC} が非振動的⁽⁷⁾

(a) Before Hopf bifurcation point ($G_2 = 0.7884$ pu)

(b) After Hopf Bifurcation point ($G_2 = 0.7945$ pu)

図 7 SVC 電圧

Fig. 7. The SVC voltage.

表 4 各パラメータのサドル・ノード分岐点

Table 4. The saddle node bifurcation points of the each parameter.

Parameter	Bifurcation point	Unstable domain
Voltage set value of SVC 1 $V_{SVCref1}$	0.6492pu 1.6896pu	$V_{SVCref1} < 0.6492pu$ $1.6896pu < V_{SVCref1}$
Distribution line resistance 1 r_{e1}	0.3780pu	$0.3780pu < r_{e1}$
Distribution line reactance 1 X_{e1}	0.0519pu	$X_{e1} < 0.0519pu$
Load conductance 1 G_1	1.3032pu	$1.3032pu < G_1$
Voltage set value of SVC 2 $V_{SVCref2}$	1.4272pu	$1.4272pu < V_{SVCref2}$
Distribution line resistance 2 r_{e2}	0.5424pu	$0.5424pu < r_{e2}$
Distribution line reactance 2 X_{e2}	0.0967pu	$X_{e2} < 0.0967pu$
Load conductance 2 G_2	0.9276pu	$0.9276pu < G_2$
Infinite bus voltage V_{mf}	0.6269pu	$V_{mf} < 0.6269pu$
Length of distribution line 1 $mlt1$	3.9742 times	$3.9742 \text{ times} < mlt1$
Length of distribution line 2 $mlt2$	3.1737 times	$3.1737 \text{ times} < mlt2$

に崩壊している様子がわかる。以上より $G = 0.6265$ pu 近傍にサドル・ノード分岐点, すなわち SVC の安定限界点がある。

次にホップ分岐⁽⁵⁾に注目し, パラメータ変化による固有値軌跡の計算を行ったが, 現実的な範囲において, 注目すべき現象は確認されなかった。

4・2 2機 SVC を含む系統 表 3 の定数を標準定数として検討を行った。AVR の PI 制御後のゲイン $k_{01} = 1.0$, $k_{02} = 1.0$ とする。配電線 1 はリアクタンス換算で約 2.99 km, 配電線 2 は約 4.79 km に相当する。

4・1 節と同様に, (17) 式により, パラメータ変化による固有値軌跡の計算を行った。一例として系統負荷コンダクタンス 2 (G_2) をパラメータとした場合の平衡点 (B_{L2}^*) の分岐図を図 6(a), 平衡点 1 (EP1) の固有値軌跡を図 6(b) に示す。

表 5 各パラメータのホップ分岐点

Table 5. The Hopf bifurcation points of the each parameter.

Parameter	Bifurcation point	Unstable domain
Load conductance 2 G_2	0.7914pu	$0.7914pu < G_2$
Voltage set value of SVC 2 $V_{SVCref2}$	1.310pu	$1.310pu < V_{SVCref2}$
PI-controller gain at AVR 1 T_{n1}	0.0012sec	$T_{n1} < 0.0012sec$
PI-controller gain at AVR 2 T_{n2}	0.002sec	$T_{n2} < 0.002sec$
Length of distribution line 1 $mlt1$	3.8437 times	$3.8437 \text{ times} < mlt1$
Length of distribution line 2 $mlt2$	3.0227 times	$3.0227 \text{ times} < mlt2$

ここで, $mlt1, mlt2$ は標準配電線インピーダンスからの倍率を表す。

表 6 各パラメータの標準値

Table 6. The standard values of the each parameter.

Parameter	Standard value
Infinite bus voltage V_{mf}	1.0pu
Distribution line resistance 1 r_{e1}	0.1566pu
Distribution line reactance 1 X_{e2}	0.2625pu
Load conductance 1 G_1	0.05pu
Load susceptance 1 B_1	0.008pu
Voltage set value of SVC V_{SVCref}	1.0pu
Susceptance of SVC B_C	0.4pu
Slope reactance of SVC k	0.01pu
PI-controller gain at AVR k_p	2.1
Time-lag of first order time constant of voltage measurement at AVR T_m	0.03sec
PI-controller time constant at AVR T_n	0.01sec
Time constant after PI-control at AVR T_T	0.0046sec
Distribution line resistance 2 r_{e2}	0.2505pu
Distribution line reactance 2 X_{e2}	0.4201pu
Load conductance 2 G_2	0.314pu
Load susceptance 2 B_2	-0.08pu
Voltage set value of SVR V_{SVRef}	1.0pu
Time constant of SVR T_s	60sec

(a) Bifurcation G_2 vs. n^*

(b) The locus of the eigen values

(c) The enlargement of Fig. 8(b)

図 8 分岐図と固有値軌跡

Fig. 8. Bifurcation and the locus of the eigen values.

固有値は G_2 の変化に伴い複素共役の固有値が 0.7914 pu で虚数軸を横切り (ホップ分岐点), 0.9276 pu で 2 つの平衡点が衝突 (サドル・ノード分岐点), その後消滅する。図 7(a), (b) にホップ分岐点通過前 ($G_2 = 0.7884$ pu) と後 ($G_2 = 0.7945$ pu) の実効値モデルによる SVC2 電圧 (V_{SVC2}) を示す。ホップ分岐点通過後 V_{SVC2} は振動的に発散しており, $G_2 = 0.7914$ pu に分岐点すなわち系の安定動作限界点がある。

同様の検討を行い次の表 4, 表 5 のパラメータにおいても安定動作限界点 (サドル・ノード分岐点もしくはホップ分岐点) を確認した。ただし, 配電線の巨長を除いては, 現実的ではない値であり, 問題ないとする。

4・3 SVC と SVR を含む系統 表 6 の定数を標準定数として検討を行った。AVR の PI 制御後のゲイン $k_0 = 1.0$

(a) The SVC voltage before bifurcation point (stability)

(b) The SVC voltage after bifurcation point (voltage collapses accompanied by vibration)

図 9 SVC 電圧

Fig. 9. The SVC voltage.

表 7 各パラメータのサドル・ノード分岐点

Table 7. The saddle node bifurcation points of the each parameter.

Parameter	Bifurcation point	Unstable domain
Infinite bus voltage V_{inf}	0.5537pu	$V_{inf} < 0.5537$ pu
Length of distribution line 1 $mlt1$	3.2615 times	$3.2615 \text{ times} < mlt1$
Load conductance 1 G_l	0.8124pu	$0.8124\text{pu} < G_l$
Load susceptance 1 B_l	0.8763pu	$0.8763\text{pu} < B_l$
Length of distribution line 2 $mlt2$	3.2071 times	$3.2071 \text{ times} < mlt2$
Load susceptance 2 B_2	0.8184pu	$0.8184\text{pu} < B_2$
Voltage set value of SVC V_{SVCref}	0.6130pu 1.4173pu	$V_{SVCref} < 0.6130\text{pu}$ $1.4173\text{pu} < V_{SVCref}$
Voltage set value of SVR V_{SVRref}	0.6546pu 1.2937pu	$V_{SVRref} < 0.6546\text{pu}$ $1.2937\text{pu} < V_{SVRref}$

とする。配電線 1 はリアクタンス換算で約 2.99 km, 配電線 2 は約 4.79 km に相当する。

4・1 節と同様に, 固有値モデル (18) 式により, パラメータ変化に対する固有値軌跡の計算を行った。例として系統負荷コンダクタンス 2 (G_2) をパラメータとした場合 (G_2 以外は標準定数) の平衡点 (n^*) の分岐図を図 8(a), 平衡点 1 (EP1) の固有値軌跡を図 8(b) に示す。図より固有値は G_2 の変化に伴い複素共役の固有値が 0.7911 pu で虚数軸を

表 8 各パラメータのホップ分岐点

Table 8. The Hopf bifurcation points of the each parameter.

Parameter	Bifurcation point	Unstable domain
Length of distribution line 2 $mlt2$	3.1092 times	$3.1092 \text{ times} < mlt2$
Load conductance 2 G_2	0.7912pu	$0.7912\text{pu} < G_2$
Voltage set value of SVC V_{SVref}	1.3482pu	$1.3482\text{pu} < V_{SVref}$
PI-controller time constant at AVR T_b	0.0021sec	$T_b < 0.0021\text{sec}$
Voltage set value of SVR V_{SVref}	0.6862pu	$V_{SVref} < 0.6862\text{pu}$

ここで、 $mlt1$ 、 $mlt2$ は標準配電線インピーダンスからの倍率を表す。また、本検討では r_{e1} 、 X_{e1} 、 r_{e2} 、 X_{e2} を単独のパラメータとして扱わず、亘長の変化に伴い、 r_e と X_e の比率を保ったまま変化させることとしたため、 r_{e1} 、 X_{e1} 、 r_{e2} 、 X_{e2} のパラメータの分岐点は求めている。

横切り（ホップ分岐点）、0.8183 pu で 2 つの平衡点が衝突（サドル・ノード分岐点）、その後消滅することがわかる。

図 9(a)，(b) に G_2 をパラメータとした場合のホップ分岐点通過前 ($G_2 = 0.7911 \text{ pu}$) と後 ($G_2 = 0.7912 \text{ pu}$) の実効値モデルによる SVR 一次電圧 (V_{SVR1}) を示す。ホップ分岐点通過後 V_{SVR1} は振動を伴い崩壊しており、 $G_2 = 0.7911 \text{ pu}$ に分岐点、すなわち系の安定動作限界点があることがわかる。

同様の検討を行い次の表 7、表 8 のパラメータにおいても安定動作限界点（ホップ分岐点もしくはサドル・ノード分岐点）を確認した。ただし、配電線の亘長を除いては、現実的ではない値であり、問題ないとする。

5. 配電線負荷量による分岐点の変化

前章まででは、単一のパラメータを、他のパラメータを固定としたまま、個別に変化させ、不安定となる限界値を調べた。その中で、無限大母線電圧、配電線亘長、系統負荷量、SVC 電圧設定値、SVC の PI 制御系の時定数等に限界があることがわかった。

しかしながら、負荷量というパラメータは、他のパラメータと異なり、時々刻々変化するものであるため、負荷量を変えた条件における他のパラメータの分岐点について検討する必要がある。

そこで、負荷量を変えた条件で各パラメータの分岐点を解析したが、配電線亘長以外のパラメータは負荷量の違いによる分岐点の変化が小さかった。そこで、配電線負荷量による分岐点の変化について、配電線亘長との関係をさらに詳細に解析を行った。

5・1 解析条件 2 機 SVC のモデルを用いて、系統負荷力率あるいは 2 つの系統負荷量の比（負荷分布に相当）をパラメータとして変化させた。図 3 における $G_1 : B_1$ および $G_2 : B_2$ の比率を変更することにより力率を、 G_1 、 B_1 で表される負荷量と G_2 、 B_2 で表される負荷量を変更することにより SVC1 の前後における負荷量の比を変更させた。

図 10 力率変化による系統負荷量と安定限界亘長の関係

Fig. 10. Relation between the amount of system loads and stable marginal length by power factor change.

図 11 負荷分布変化による系統負荷量と安定限界亘長の関係

Fig. 11. Relation between the amount of system loads and stable marginal length by load distribution change.

変更させた範囲は下記の通りである。

- ・系統負荷力率 進みの 0.9～遅れの 0.9
- ・系統負荷量の比 ($G_1 : G_2$) 9 : 1, 7 : 3, 5 : 5, 3 : 7, 1 : 9, 0 : 10

それぞれのパラメータおよび全体の配電線系統負荷量で設定された条件において、 r_{e2} 、 X_{e2} で表される配電線亘長を固定したまま、 r_{e1} 、 X_{e1} で表される配電線亘長を変化させ、安定限界となる亘長を求めた。

5・2 解析結果 系統負荷量が大きき場合には安定限界亘長が短くなり、系統負荷量が小さい場合には安定限界亘長が長くなる。また、力率あるいは負荷量の比を変化させても限界亘長はさほど差異が生じないことが判明した（図 10、図 11）。つまり、安定限界亘長の解析における系統負荷量については、力率の値ならびに負荷分布を考慮しなくてもよく、配電線全体の系統負荷量だけを考慮すればよいことがわかった。

また、上記のグラフを両対数平面上で表現すると系統負荷量と安定限界亘長の関係は直線上に乗るため、累乗の近似式で表現できることがわかる（図 12）。このことを利用すれば、定インピーダンス傾向が強い負荷特性の配電系統で、2 機以下の SVC が存在（設置間隔は 4.79 km）するよ

図 12 両対数平面上における系統負荷量と安定限界亘長の関係

Fig. 12. Relation between the amount of system loads and stable marginal length on a log-log plane.

うな系統においては、SVC の安定性評価が配電線負荷量と亘長との関係において簡便にできるものと考えられる。したがって、分散型電源の系統連系に伴い SVC が導入されるような場合、その連系可否判定の目安として使用できる。

6. むすび

配電系統における単機 SVC、2 機 SVC の不安定現象、SVC と SVR の相互干渉問題を検討した。

まず単一のパラメータのみを変化させた解析により、以下のことがわかった。

(1) 系統定数 ($G, r_e, X_e, mlt, V_{inf}, V_{SVCref}$) に関するパラメータ変化によりサドル・ノード分岐が発生し、分岐点通過後 SVC は不安定となるが、表 2 からわかるように配電線亘長以外は非現実的な値に分岐点がある。

(2) 2 機 SVC および SVC と SVR の系においても、現実的な SVC の制御定数の範囲においては、主に系統定数に関するパラメータ変化によりサドル・ノード分岐点、ホップ分岐点の確認され、分岐点通過後、系は不安定となる。したがって、今回対象とした系の安定動作限界点はホップ分岐点もしくはサドル・ノード分岐点でのみ決定されることがわかった。

次に負荷量を変えた断面での検討を加え、以下のことがわかった。

(1) 系統負荷量大きい配電線の方が不安定となること、安定限界亘長の解析における系統負荷量については、力率の値ならびに負荷分布を考慮しなくてもよく、配電線全体の系統負荷量だけを考慮すればよいことがわかった。このことを利用すれば、定インピーダンス傾向が強い負荷特性の配電系統で、2 機以下の SVC が存在 (設置間隔は 4.79 km) するような系統においては、SVC の安定性評価が配電線負荷量と亘長との関係において簡便にできるものと考えられる。したがって、分散型電源の系統連系に伴い SVC が導入されるような場合、その連系可否判定の目安として使用できる。

(平成 16 年 5 月 17 日受付, 平成 16 年 12 月 27 日再受付)

文 献

- (1) A.J.P. Ramos and H. Tyll: "Dynamic Performance of a Radial Weak Power Systems with Multiple VAR Compensators", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.4, pp.1316-1325 (1989-10)
- (2) M. Parniani and M.R. Iravani: "Voltage Control Stability and Dynamic Interaction Phenomena of Static VAR Compensators", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.10, pp.1592-1597 (1995-8)
- (3) C.C. Liu and K.T. Vu: "Analysis of Tap-Changer Dynamics and Construction of Voltage Stability Regions", *IEEE Trans. Circuits Syst.*, Vol.36, pp.575-590 (1989-4)
- (4) S. Abe, Y. Fukunaga, A. Isono, and B. Kondo: "Power System Voltage Stability", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vol.PAS-101, pp.3830-3840 (1982-10)
- (5) S. Sastry: *Nonlinear Systems Analysis, Stability, and Control*, Springer-Verlag New York, Inc. (1999)
- (6) V. Venkatasubramanian, H. Schattler, and J. Zaborsky: "Dynamics of Large Constrained Nonlinear Systems—A Taxonomy Theory", *Proc. IEEE*, Vol.83, pp.1530-1561 (1995-11)
- (7) I. Dobson and H. D. Chiang: "Toward a Theory of Voltage Collapse in Power Systems", *Syst. And Control Lett.*, Vol.13, pp.253-262 (1989)

清水 慶一 (正員) 1967 年 1 月 20 日生。1992 年 3 月大阪大学基礎工学研究科制御工専攻修了。同年関西電力(株)入社。現在、同社電力技術研究所電力基盤技術研究室に勤務。主として、分散型電源連系に関する研究に従事。

元 治 崇 (正員) 1951 年 1 月 30 日生。1975 年 3 月岡山大学工学研究科修了。同年関西電力(株)入社。現在、同社電力技術研究所電力基盤技術研究室に勤務。主として、分散型電源連系に関する研究に従事。

中 沢 親 志 (正員) 1968 年 4 月 12 日生。1991 年 3 月慶應義塾大学計測工学科卒業。同年 4 月富士電機(株)入社。2000 年～2002 年、米国コーネル大学客員研究員。現在、富士電機アドバンステクノロジー(株)主として、電力系統の安定性に関する研究に従事。1999 年電気学術振興賞進歩賞受賞。

中 西 要 祐 (正員) 1955 年 1 月 6 日生。1980 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年 4 月富士電機(株)入社。現在、富士電機アドバンステクノロジー(株)主として、電力系統の解析、シミュレーション手法および配電系統の運用制御技術に従事。工学博士。1991 年 IEEE 論文賞受賞 (PES Education Committee)。IEEE 会員。