

3.2 電圧安定性に関する解析例

3.2.1 電圧安定性の基礎的事項

近年、電力設備の立地難や環境問題などから電源の遠隔化・偏在化や送電線の大容量化の趨勢が顕著になって来ており、電力系統の安定運用のために従来にも増して高度な技術が必要となっている。最近、なかでも電力系統の電圧不安定化現象は広く注目を集めており、海外では CIGRE や IEEE において、また国内では電気協同研究会において幅広い検討が行われてきた。

送電線や発電機のトリップあるいは負荷需要の急激な増加があった場合でも、系統電圧が大幅に低下することなく、安定に運転できる能力を電力系統の「電圧安定性」と言う。

ここではこの電圧安定性の基本的な概念を述べる。

(1) 電力系統の送電特性

まず、図 3.24 に示した 1 機 1 負荷モデルの電圧安定性を考えてみる。この図で、負荷に供給される有効・無効電力 ($P+jQ$) は、線路リアクタンス X 、調相設備アドミタンス Y 、送電端電圧 V_s 、受電端電圧 V_r 、送受電端位相差角 θ に対して、(3.33)、(3.34) 式で表すことができる。

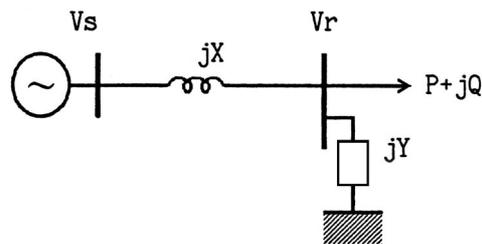


図 3.24 一機一負荷モデル系統

$$P = \frac{V_s V_r \sin \theta}{X} \quad (3.33)$$

$$Q = \frac{V_s V_r \cos \theta}{X} - \left(\frac{1}{X} - Y \right) V_r^2 \quad (3.34)$$

$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ なる関係を用いて θ を消去すると、(3.35) 式が得られる。

$$P^2 + \left\{ Q + \left(\frac{1}{X} - Y \right) V_r^2 \right\}^2 = \left(\frac{V_s V_r}{X} \right)^2 \quad (3.35)$$

ここで、簡単のために $\alpha = Q / P$ と置き、(3.35) 式を V_r について整理すると、

$$\left(\frac{1}{X}-Y\right)^2 V_r^4 + \left\{2P\left(\frac{1}{X}-Y\right)\alpha - \frac{V_s^2}{X^2}\right\} V_r^2 + (1+\alpha^2)P^2 = 0 \quad (3.36)$$

となり， V_r に関して 4 次方程式が得られる。(3.36) 式を V_r について解くと，

$$V_r = \sqrt{\frac{\frac{V_s^2}{X^2} - 2P\left(\frac{1}{X}-Y\right)\alpha \pm \sqrt{\frac{V_s^4}{X^4} - 4P\left(\frac{1}{X}-Y\right)\alpha \frac{V_s^2}{X^2} - 4P^2\left(\frac{1}{X}-Y\right)^2}}{2\left(\frac{1}{X}-Y\right)^2}} \quad (3.37)$$

を得る。

この式は需要 P の変化に対して受電端電圧 V_r がどのように変化するかを表す関係式であり，系統側の諸量，すなわち，送電端電圧 V_s ，線路インピーダンス，調相容量から定まる送電特性を表している。実際に(3.37)式の P を変化させてやると，図 3.25 に示すような曲線が得られる。この曲線は P - V カーブ，あるいはその形状からノーズカーブ(nose curve)と呼ばれ，その先端はノーズ端と呼ばれている。

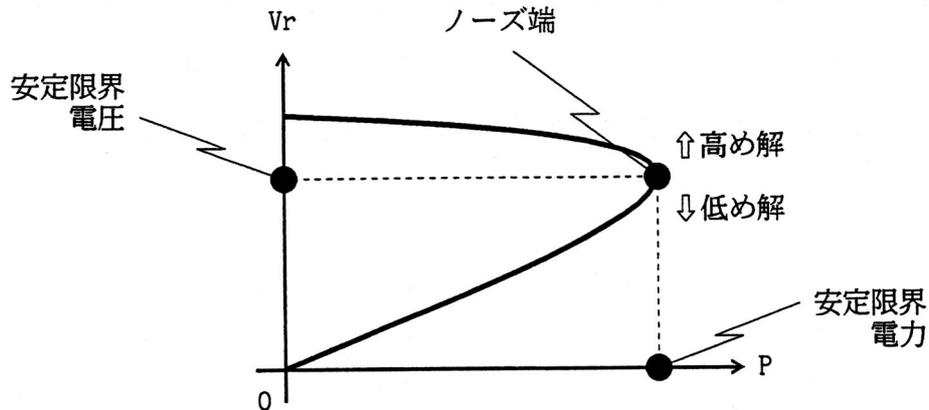


図 3.25 P-V カーブ

図 3.25 から分かるように送電可能電力には限界があり，その時の電力を安定限界電力，電圧を安定限界電圧と呼んでいる。この限界状態は(3.36)式が重根を持った状態，すなわち(3.37)式の内側の $\sqrt{\quad}$ 内が零となった状態である。また，電圧が安定限界よりも高い領域を電圧高め解領域，低い領域を電圧低め解領域と呼んでおり，それぞれ(3.37)式の複号が正の場合が高め解，負の場合が低め解領域に対応している。

(3.37) 式から分かる通り，受電端電圧 V_r は送電線インピーダンス X ，調相設備投入量 Y ，負荷力率 α ，および送電端電圧 V_s の関数であり，これらの変化により， P - V カーブは図 3.26 のように変化する。

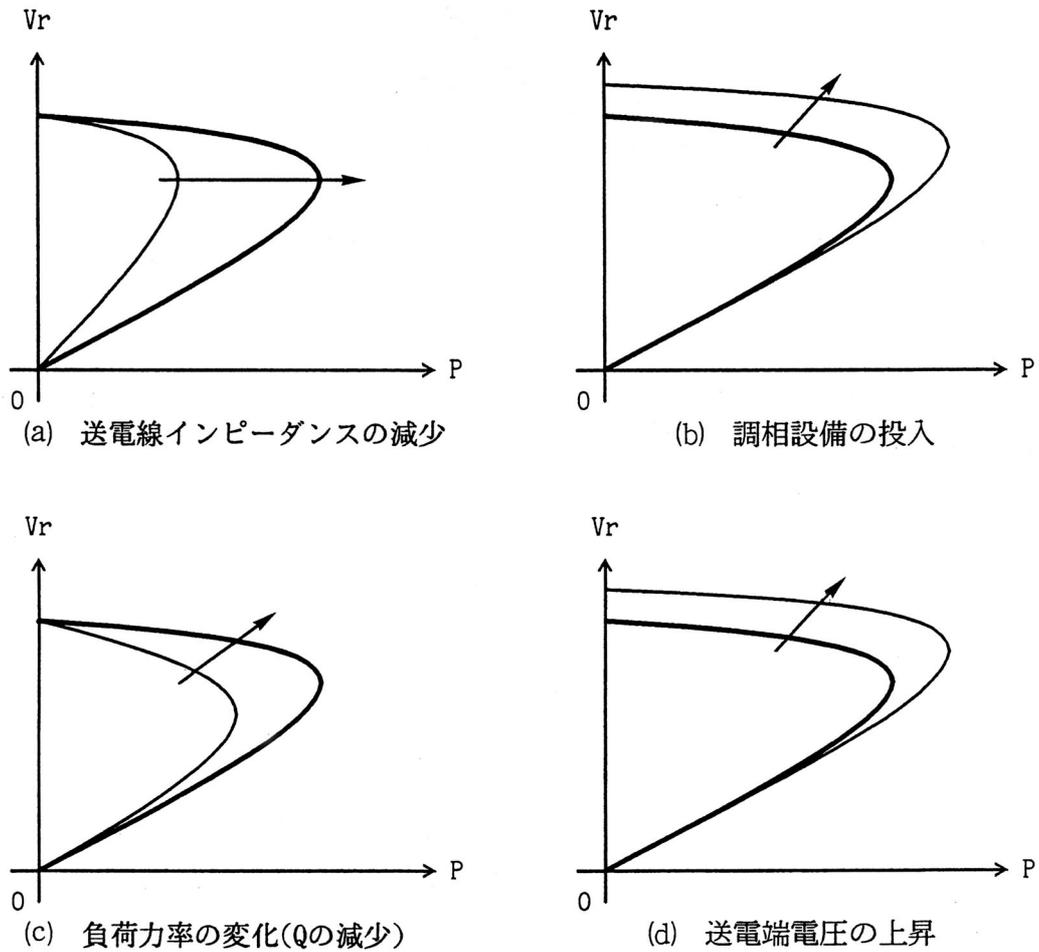


図 3.26 各パラメータの変化による P-V カーブの変化

(2) 負荷の電圧特性

電圧安定性は負荷の電圧特性と大きな関わりを持つ。負荷の電圧特性は、解析上は (3.38) 式で表現されることが多い。

$$\begin{cases} P \propto V_r^\alpha \\ Q \propto V_r^\beta \end{cases} \quad (3.38)$$

特に、 $\alpha = \beta = 0$ のとき定電力特性、1 のとき定電流特性、2 のとき定インピーダンス特性と呼ばれ、それぞれ図 3.27 のような特性となる。

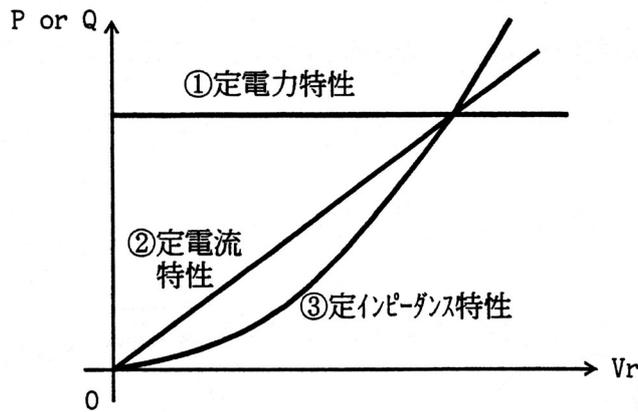


図 3.27 負荷の電圧特性

(3.38)式で定まる曲線をここではV-Pカーブと呼ぶことにする。受電端電圧は上で述べた系統の送電特性と負荷の電圧特性によって決定される。具体的には図 3.28 において、P-VカーブとV-Pカーブが交わる点を与えられた条件下での運転点となる。

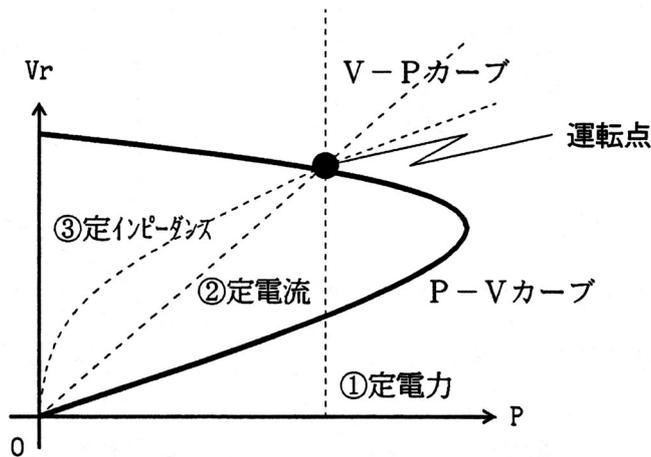


図 3.28 系統電圧の運転点

図 3.28 で、定電力負荷の増加は①の直線の右側への移行を意味するが、安定限界電力以上の負荷に対してはP-Vカーブと交点を結ばない。これが電圧不安定要因のひとつである。このことは、解析上は、電圧解が存在しないケース、すなわち、潮流計算の非収束あるいは発散として現れる。

一方、定電流負荷や定インピーダンス負荷の増加は②③のカーブの傾きの減少を意味するが、低め解領域にあってP-Vカーブとの交点が存在するため、電圧は低下するが運転は可能である。

(3) 系統負荷特性

電圧安定性を検討する上で負荷特性を考える場合には、前述のように個別負荷単体を対象とするのではなく、考察の対象とする系統とそれ以外の系統との接点をなす母線に注目して、その母線以下の電気的特性を一括して系統負荷という単位で捉えることが重要である。この系統負荷は、多数の個別負荷の他、送配電線、変圧器、調相設備などで構成されるが、特に変圧器の2次母線電圧を一定に制御するタップの動きが重要である。

たとえば図 3.29 のような系統では、送電線の1回線事故時には、変圧器2次側の電圧は低下し、消費電力もその電圧特性に従って一時的に減少するが、変圧器タップの上げ動作によって2次電圧は徐々に回復し、これに伴って負荷電力も元の値に戻ってくる。

このように、タップの動きも含めた比較的長い時間帯では、個別負荷単体の電圧特性がたとえ定電流あるいは定インピーダンス特性であっても、系統負荷内に設置された変圧器のタップ動作により電圧が一定に制御されるため、対象系統側から眺めた負荷特性は定電力特性とみなすことができる。

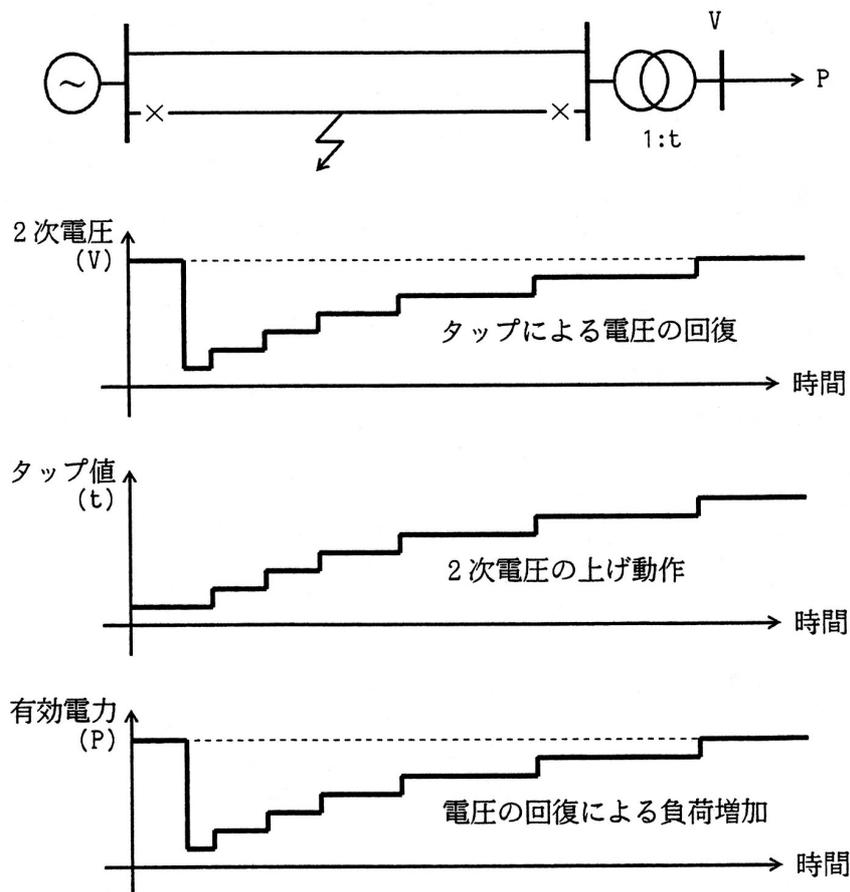


図 3.29 変圧器のタップ動作による定電力化

このような変圧器のタップ動作と電圧安定性の関係を，図 3.30(a)に示した 1 発電機—1 送電線—1 変圧器—抵抗負荷モデルで考察する。なお同図で，発電機から変圧器 1 次母線までを解析対象系統，それ以下を系統負荷と考え，1 次母線電圧 V_1 の動きに注目する。

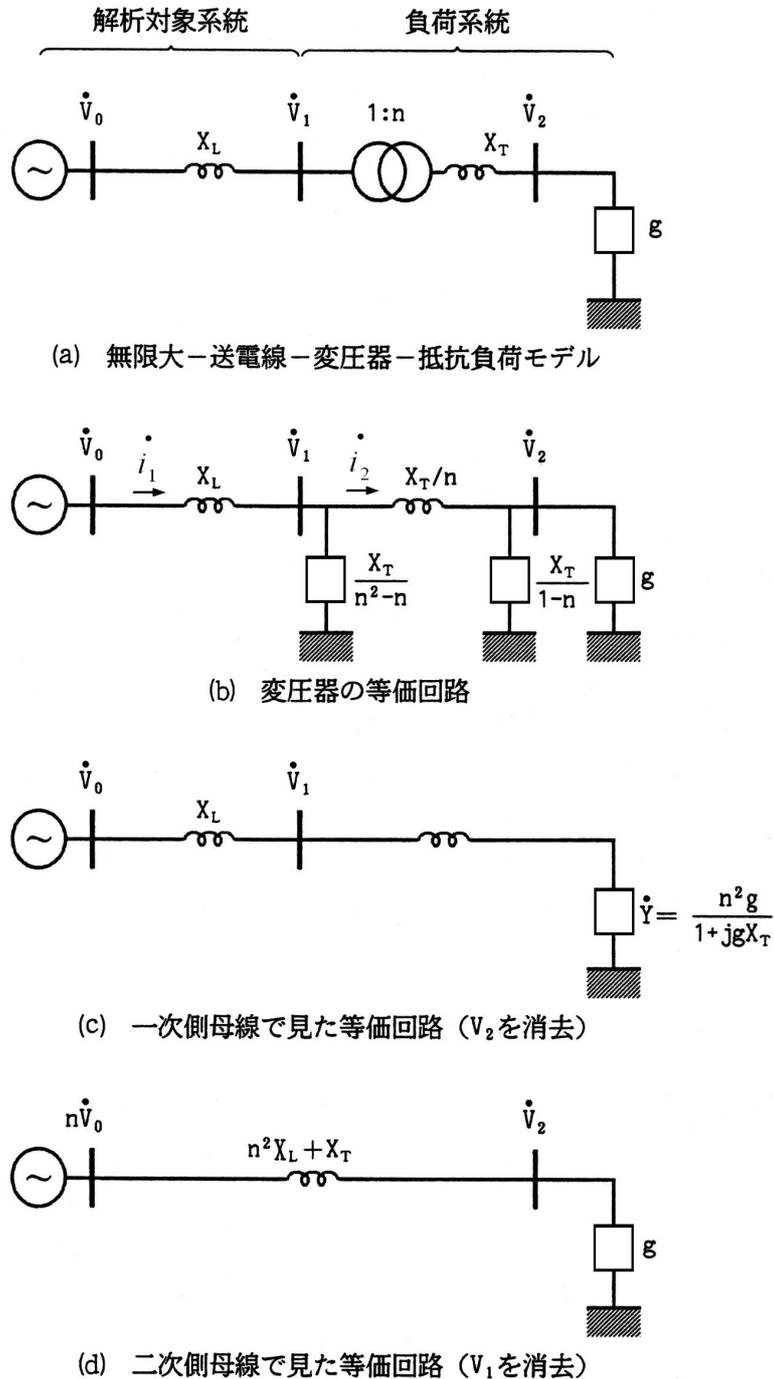


図 3.30 1 発電機—1 送電線—1 変圧器—抵抗負荷モデル

タップ付変圧器の等価回路は図 3.30 (b) のように表されるので、変圧器 1 次側から眺めた場合の負荷を含めた合成アドミタンスは(3.39)式となり、図 3.30 (c) の等価モデルが得られる。

$$\dot{Y} = \frac{1}{\frac{1}{g + \frac{1-n}{jX_T}} + \frac{jX_T}{n}} + \frac{n(n-1)}{jX_T} = \frac{n^2 g}{1 + jgX_T} \quad (3.39)$$

図 3.30 (c) 図から分かるように、タップ比 n の増加は等価的には(3.39)式のアドミタンス \dot{Y} の増加に相当するが、このことは図 3.28 で言えば、③の曲線の傾きの減少を意味するため、タップ比の増加に伴い 1 次電圧 V_1 は低下することとなる(図 3.31)。

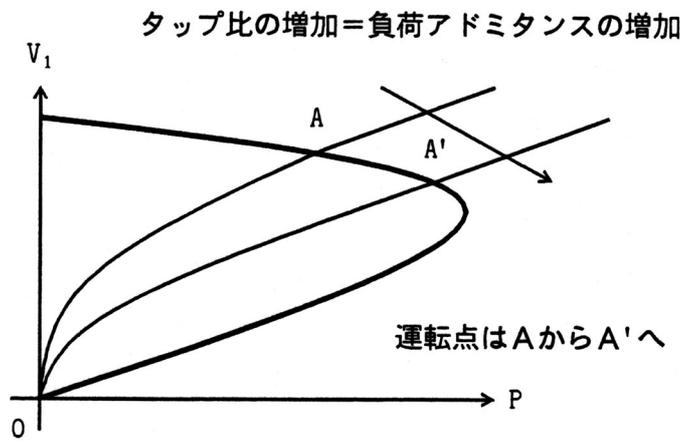


図 3.31 タップの変化による 1 次電圧の変化

一方、図 3.30 (b) 図で、変圧器 1 次および 2 次母線で潮流方程式を立ててみると、

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{V}_0 - \dot{V}_1}{jX_L} = \frac{n(\dot{V}_1 - \dot{V}_2)}{jX_T} + \frac{n^2 - n}{jX_T} \dot{V}_1 \quad (3.40)$$

$$\dot{i}_2 = \frac{n(\dot{V}_1 - \dot{V}_2)}{jX_T} = \left(g + \frac{1-n}{jX_T} \right) \dot{V}_2 \quad (3.41)$$

を得る。(3.40)、(3.41)式から \dot{V}_1 を消去すると、

$$\frac{n\dot{V}_0 - \dot{V}_2}{j(n^2 X_L + X_T)} = g \dot{V}_2 \quad (3.42)$$

が得られ、図 3.30 (d) のような等価モデルが作成できる。

この等価モデルの意味するところは、タップ比 n の増加は、等価的には、送電端電圧 V_0 と送電線インピーダンス X_L+X_T がそれぞれ、 $n V_0$ および $n^2 X_L+X_T$ に増加することに相当する、ということである。図 3.26 に各パラメータを変化させた時の P-V カーブの変化の様子を示したが、タップ比の増加は、図 3.26 の(a)と(d)が複合した動きとなる。この結果、2次側で見た P-V カーブは、図 3.32 に示すように、高め解領域では外側にふくらみ、低め解領域では内側にしぼむような変化を示す。

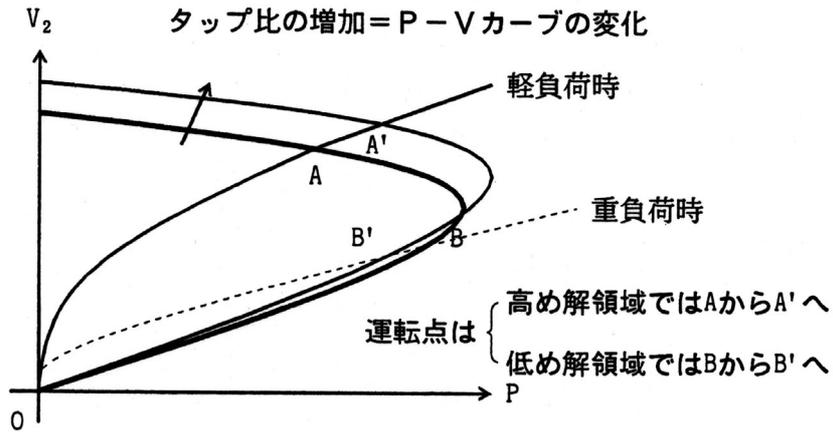


図 3.32 タップの変化による 2 次電圧の変化

図 3.32 から分かる通り、負荷が軽くタップ動作前の運転点が A 点である場合には、タップ動作後は A' 点に移るため 2 次側母線電圧は上昇する。

一方、タップ比が増加する前の運転点が低め解領域の B 点であったとすれば、動作後は B' 点に移るため、2 次側母線電圧は低下する。本来、タップを上げると 2 次電圧が上昇するが、低め解領域では逆の結果を生むのである。この結果、2 次電圧を整定範囲に収めようとする制御がいつまでも完結せず、無限に(もちろんタップの上限まで)タップの上げ動作を繰り返す。この時、タップの上げ動作は 1 次母線側から見ると負荷アドミタンスの増加に相当するため(図 3.31)、1 次電圧は同図の P-V カーブに沿って低下して行く。

この現象は「**タップの逆動作現象**」として知られるもので、電圧不安定現象の支配的要因となる。もちろん通常の運転状態では低め解領域で運転されることはないが、例えば送電線事故によって、それが厳しければ、運転点が低め解領域に移行する場合がある。送電線の開放は発電機と負荷間のインピーダンスの増加を意味し、P-V カーブが全体に左側につぶれた形に変化する(図 3.26(a)参照)からである。このような場合、電圧は図 3.33 の、

A(事故前) → B(事故直後) → C(タップ動作中)

のような動きとなり、ついには**電圧崩壊**に至る。

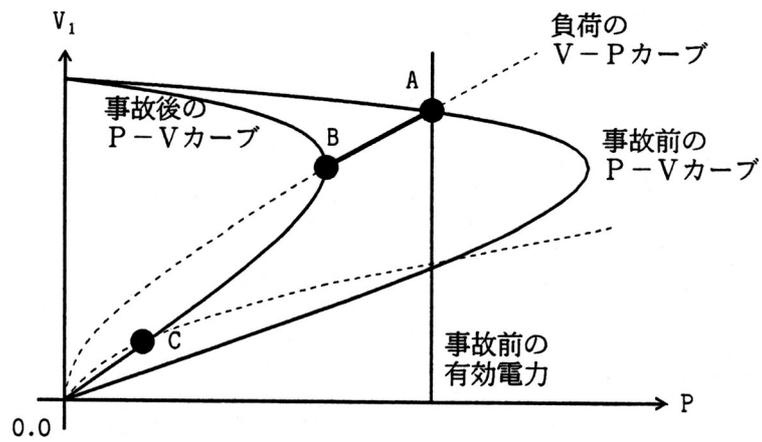


図 3.33 送電線事故時の電圧の動きの例

このように、変圧器タップの動作も対象となる数 10 秒から分単位以上の長時間の電圧安定性を考える場合には、タップ動作も含めた系統負荷の動的な特性を考慮することが極めて重要である。