UDC 621.315.051.2: 621.3.015.1
621.311.1

論 文

50-B 48

電力系統の受電端電圧の異常低下現象

電力中央研究所 長 尾 待 士

1. ま え が き

近年、内外で系統受電端電圧の異常低下現象の報告がいくつかなされている。この現象は一般に電圧安定度という言葉で論じられ、電源および負荷の電圧-無効電力特性 (dQ/dV)、送電端電圧 E と受電端電圧 V の特性 (dV/dE) などに着目したいいくつかの判定規程が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながらこれらの提案は、その前提となる系統条件や電圧を崩壊させる動的要因などに対する検討が不十分であり、なお、多くの議論を呼んでいる。最近、この問題に対する総合的な解明が各方面から要望されている。

本論文は電圧安定度の概念に対する基本的な考察、実際に生じている電圧異常低下現象の解明およびこのような現象の起こり得る系統条件の一般的な検討を行なうとともに、実系統の計画・運用上の留意点を明確にしたものである。

2. 需要-受電端電圧の基本特性

電圧の安定性を論ずる前に、需要-受電端電圧の基本特性をはあくしておく必要がある。ここでは第1図のような単一電源線と補償用調相器 (S.C.) を考える。送電端電圧 V_s は電流の AVR により一定に保たれ、線路の電圧降下は S.C. により補償されている。

〈2.1〉基本式とその概要 負荷に供給される有効、無効電力 ($P_L + jQ_L$) は、線路インピーダンス

第1図 モデル系統
Fig. 1. Model system.

Voltage Collapse at the Load End of Power Systems. By T. NAGAO, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry)

長尾待士: 正員, 電力中央研究所

x_l (第1図~14図中の x_l) 調相器アドミタンス Y_c , 送電端電圧 V_s , 受電端電圧 V_r , 送受電端相角 δ に対し

$$\left. \begin{aligned} P_L &= \frac{V_s V_r}{x_l} \sin \delta \\ Q_L &= \frac{V_s V_r}{x_l} \cos \delta - \left(\frac{1}{x_l} - Y_c \right) V_r^2 \end{aligned} \right\} \dots \dots (1)$$

で表わされる。 $\sin^2 \delta + \cos^2 \delta = 1$ なる関係を用いて、(1)式をまとめると

$$P_L^2 + \left\{ Q_L + \left(\frac{1}{x_l} - Y_c \right) V_r^2 \right\}^2 = \left(\frac{V_s V_r}{x_l} \right)^2 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $S = \sqrt{P_L^2 + Q_L^2}$, $pf = P_L/S$ とすると

$$\begin{aligned} S^2 \pm 2S\sqrt{1-pf^2} \left(\frac{1}{x_l} - Y_c \right) V_r^2 \\ + \left(\frac{1}{x_l} - Y_c \right)^2 V_r^4 - \left(\frac{V_s V_r}{x_l} \right)^2 = 0 \dots (3) \end{aligned}$$

ただし、複号は Q_L の付号と同じである。(3)式が基本式となる。

(3)式は一般に S と V_r^2 に関してだ円となり、特殊な場合として

$$1/x_l - Y_c = 0 \text{ あるいは } Pf = 0$$

のときは放物線となる。 Y_c , pf , x_l をパラメータとして $S-V_r^2$ 曲線を描くと第2図のようになる。これらの曲線の縦軸をルートに開くと、 $S-V_r$ 曲線が得られる。 $S-V_r$ 曲線の原点における傾きは

$$\left(\frac{dV_r}{dS} \right)_0 = \sqrt{\left(\frac{d^2(V_r^2)}{dS^2} \right)_0} / 2 = \frac{x_l}{V_s} \dots \dots \dots (4)$$

また、供給可能電力の上限を与える。 $S_{\max}$ とそれに対応する V_r は

$$\left. \begin{aligned} S_{\max} &= \frac{(V_s/x_l)^2}{|1/x_l - Y_c|} \frac{1 \mp \sqrt{1-pf^2}}{2pf^2} \\ V_r(S=S_{\max}) &= \frac{(V_s/x_l)^2}{|1/x_l - Y_c|} \sqrt{\frac{1 \mp \sqrt{1-pf^2}}{2pf^2}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

で与えられる。複号は同順で $Q_L(1/x_l - Y_c) > 0$ のとき上側、 $Q_L(1/x_l - Y_c) < 0$ のとき下側となる。

第2図 各パラメータによる $S-V_r^2$ 曲線の変化

Fig. 2. Relations between $S-V_r^2$ curves and parameters.

〈2・2〉 具体例 電圧の安定性が論じられるのは受電端電圧変動率の大きな場合であるから、比較的長距離の送電線を想定しなければならない。ここでは具体的検討のベースとして

$$x_l = 0.5 \text{ p.u.}, Y_c = 0.2 \text{ p.u.}$$

を採用する。この値は、275kV, 610mm² 複導体2回線、1,000MVAベースに換算すれば、線路こう長230km, S.C.容量200MVAに相当する。なお、 Y_c の値は線路をII形等価回路表示したときの受電端静電容量（通常 $yc/2$ で表わされ、この場合は60MVA程度）を含むものとする。

(1) Y_c と $S-V_r$ 特性 (第3図) S.C. 容量 Y_c を増すと一般に $S-V_r$ 曲線は直線

$$S = \frac{V_s/x_l}{\sqrt{2(1+\sqrt{1-pf^2})}} V_r$$

に沿って右上方向に膨らんでくる。共振点 $Y_c = 1/x_l$ となると $S-V_r$ 曲線は

$$S = \frac{V_s V_r}{x_l} \equiv P_{\max}$$

なる直線になる。 Y_c を更に増せば、再び S に最大値が生じ、直線

$$S = \frac{V_s/x_l}{\sqrt{2(1-\sqrt{1-pf^2})}} V_r$$

に沿って縮小してくる。換言すれば一般に S.C. 容量の増大に伴ない、潮流バランスから見た送電容量は増

第3図 Y_c と $S-V_r$ 曲線
Fig. 3. $S-V_r$ curves with Y_c .

第4図 pf と $S-V_r$ 曲線
Fig. 4. $S-V_r$ curves with pf .

加するが、共振点 $1/x_l$ を越すとその効果は減少し更には逆効果にもなる。

(2) pf と $S-V_r$ 特性 (第4図) 遅れ領域で負荷力率を良くしてゆくと、 Y_c の増加時にやや似て $S-V_r$ 曲線は放物線

$$S = (1/x_l - Y_c) V_r^2$$

に沿って右上方向に膨らんでくる。その変化率は力率が良くなるほど大きく、 $pf=100\%$ 付近(実負荷はこれに近い)では力率変化に対してかなり敏感になっている。負荷力率が進みになると、 $S-V_r$ 曲線は更に大きく膨らむ。

(3) x_l と $S-V_r$ 曲線 (第5図) 線路インピーダンスが小さくなると、 $S_{\max}$ はほぼ反比例で大きくなり、 $S-V_r$ 曲線は右方向に膨らんでくる。 x_l が大きくなると $S_{\max}$ は減少し、対応する電圧は大きくなる。 $x_l = 1/Y_c$ になると直線になるが、これは第4図の直線と同様、線路の共振状態を示している。 x_l の増大とともに無負荷電圧が上昇しているのは、 Y_c との

第5図 x_L と S - V_r 曲線Fig. 5. S - V_r curves with x_L .

共振点に近づくためである。

〈2・3〉 電圧変動率 需要が初期値

$$\dot{S} = P_L + jQ_L$$

から

$$\Delta \dot{S} = \Delta P_L + j \Delta Q_L = \Delta S (\cos \theta_d + j \sin \theta_d)$$

だけ増加するときの受電端電圧変動率は

$$\frac{\Delta V_r}{\Delta S} = \frac{\partial V_r}{\partial P_L} \cos \theta_d + \frac{\partial V_r}{\partial Q_L} \sin \theta_d \quad \dots \dots \dots (6)$$

で示される。 $\partial V_r / \partial P_L$, $\partial V_r / \partial Q_L$ は(2)式より

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial P_L} &= \frac{P_L}{(V_s/x_L)^2 V_r - 2\{Q_L + (1/x_L - Y_c)\} V_r^2} \\ \frac{\partial V_r}{\partial Q_L} &= \frac{Q_L + (1/x_L - Y_c) V_r^2}{(V_s/x_L)^2 V_r - 2\{Q_L + (1/x_L - Y_c) V_r^2\}} \end{aligned}$$

(1)式に留意して、これらを(6)式に代入すると

$$\frac{\Delta V_r}{\Delta S} = -\frac{\sin(\theta_d + \delta)}{2(1/x_L - Y_c) V_r \cos \delta - V_s/x_L} \quad (7)$$

ここで、 $\delta = \sin^{-1}(x_L \text{pf} S / V_s V_r)$

である。第6図にモデル系統の電圧変動率を示す。電圧が下がるにつれて、電圧変動率は負の値で増大し、 $S_{\max}$ の点で負の無限大から正の無限大へと移行する。これより電圧の低い領域では、電圧変動率は正（需要が増すと電圧が上がる）である。

また、 ΔP よりも ΔQ のほうが大きな電圧変動をもたらすことはよく知られているが、この例もそれを裏づけている。系統電圧に関する理論が常に無効電力に着目して展開されるのはこのためである。

3. 電圧安定度とは何か

系統の運転状態は、電源側の需要-電圧特性と負荷

第6図 V_r - S 特性と電圧変動率Fig. 6. V_r - S curve and voltage regulation.

の電圧特性の交点で決定される。 dQ/dV 理論と呼ばれるものは、この交点における電源側(添字 G で示す)と負荷側(添字 L で示す)の dS/dV_r を dQ_L/dV_r で代用し

$$\left(\frac{dQ_L}{dV_r}\right)_L > \left(\frac{dQ_L}{dV_r}\right)_G \quad \dots \dots \dots (8)$$

を安定条件とするものである。 dV/dE 理論と呼ばれるものは、送電端電圧 $E (= V_s)$ と受電端電圧につき

$$\frac{dV}{dE} = \frac{dV_r}{dV_s} > 0 \quad \dots \dots \dots (9)$$

を安定条件とするものであるが、付録に示すように、両者は理論的に同一のものである。潮流計算プログラムから簡単に求められる(8)式が通常用いられる。この際、 P に関する負荷特性は定電力特性とされることが多い。

厳密を期するため(8)式の Q_L を S で置き換え図示したのが第7図である。この図は同一線路に対し需要が $A \rightarrow B \rightarrow C$ と増大するにつれ、電圧維持のため、S.C. を次々と増設していった場合を想定している(第3図参照)。A点は安定、C点是不安定、B点はその境界となる。需要の増大に対して線路を増強していった場合は(8)式の不成立点は生じない(第5図参照)。

ここで問題となるのは、実系統で生じている電圧異常低下現象が(8)式の安定条件と対応しているかどうかである。果たして第7図のB点やC点が実系統に

第 7 図 dQ/dV (dS/dV) 理論による安定・不安定点

Fig. 7. Stable and unstable points by dQ/dV (dS/dV) theory.

出現し得るのであろうか。また、実際に系統受電端電圧を崩壊させてゆく動的要因は何んなのであろうか。

〈3・1〉 dQ/dV 理論と系統条件 第 7 図の B 点が生ずるためには、重負荷の長距離送電線と大調相容量を想定しなければならない。この関係は電圧階級や回線数によっておおむね決定されるが、負荷の電圧特性や力率によっても多少変化する。実測されている負荷特性値は対象地域や季節によってばらつきを見せているが、初期値 (添字 0 で示す) をベースにして、

$$\alpha \equiv \frac{dS/S_0}{dV_r/V_{r0}} = 0.6 \sim 1.4 \quad \dots\dots\dots (10)$$

大よそで与えられる⁽⁹⁾。また、重負荷時の負荷力率は通常遅れ領域で 90~100% と考えられる。これらの範囲で第 7 図の B 点が生ずるためには、少くとも受電端短絡容量 ($1/x_l$) の 50% 以上の S.C. 容量 (Y_c) が必要となる。一例を示せば 1,500MVA の負荷を 230 km, 275kV, 2 回線で送り、電圧維持のための受電端調相容量が 1,000MVA といった場合に相当する。このような系統は、線路の安全電流から見ても発電機の定態安定度から見ても許容されないものである。

また、このような系統で負荷側の事故を想定した場合、受電端開放電圧は定格の倍以上に跳ね上がり、線路や機器の保護上重大な問題となる。他方、落雷など線路側の事故を想定した場合も 1 回線しゃ断は供給不能を意味する上に、線路が共振点近くになるため、過電流、異常電圧などが発生し、安全性、信頼性のうえで重大な問題となる。さらに、系統の運転条件が B 点を越す以前に、微少な需要増加による、大幅な電圧低下、S.C. の投入による異常な電圧の跳ね上がりなど、極めて電圧変動率の大きな領域を通過しなければならない。このような系統に更に S.C. を増設することは系統運用上認められないことである。

特殊な場合として、負荷の dQ/dV_r 値 (dS/dV_r) が負となると、(8)式の不安定領域がかなり広がると

いわれており、負荷の大部分を占め、なおかつ、このような特性を持つものとして誘導電動機があげられている。しかしながら誘導機負荷がこのように逆特性を示すのは、すべりが相当大きくなったとき (停動トルク付近) であり、そのためには端子電圧の大幅な低下 (20% 以上) や過大な軸負荷 (定格の 150% 以上) を想定しなければならない。したがって、例外的にこのような誘導機が存在するとしても、誘導機負荷群としての総合特性がこのような条件になることは考えられない。

このようなことから、 dQ/dV 理論による不安定現象が実系統に存在する可能性は極めて小さい。

〈3・2〉 動的要因 電圧異常低下現象の報告はいくつかなされているがすべてに共通していることは、極めて長い時定数を持った現象であるということである。一例を第 8 図に示す。定格電圧から 10% の電圧低下に至るまでに約 30 分を要していることは注意に値する。

安定性を論ずるときは、対象としている系の持つ動的な要因を的確にはあくしておくことが重要である。電力系統に含まれる動的な要因とその時定数を列挙すれば、

- ① 電気回路の過渡現象 (数サイクル)
- ② 発電機の慣性 (秒単位)
- ③ 発電機の AVR (0.1~1 秒)
- ④ 発電機の調速機 (0.3~3 秒)
- ⑤ 事故および保護操作 (瞬時)
- ⑥ 受電端の変圧器タップ制御 (数 10 秒~分単位)
- ⑦ 受電端の S.C. 投入制御 (数秒~数分)
- ⑧ 需要家の電圧制御 (数 10 秒~分単位)
- ⑨ 負荷の動特性 (0.1 秒以下)
- ⑩ 需要の増減

のようである。このうち⑤は外乱として扱われる性質のものであり、①~④および⑨は対象としている現象

第 8 図 電圧異常低下現象の例

Fig. 8. An example of voltage collapse.

に対し極めて早い時定数を持つものである。特に③は系統の同期運転上の問題であり、これが関係する不安定現象は電圧の異常の他に異常潮流、系統分離など顕著な様相を呈するものであり、異質の問題であると考えられる。

したがって、このような現象を対象とする系統の表示に最も基本的な動的要因は、受電端の電圧制御（需要家の電圧制御も含めて）と需要の増減である。その他の要因も無関係とは言えないが、実際の現象をより詳細にシミュレートしようとするときに関係する副次的なものである。

前述の基本的要因のうち、最も安定性と関連の深いと思われる変圧器タップの安定性を検討してみよう。変圧器2次電圧を V_{r2} とし負荷特性を線形近似して

$$\frac{\Delta S}{\Delta V_{r2}} = \alpha \quad (\alpha: \text{通常正}) \quad (11)$$

また、系統側の特性も線形近似して

$$\frac{\Delta S}{\Delta V_r} = \beta \quad (\beta: \text{通常負}) \quad (12)$$

変圧比を n で表わすと

$$\begin{aligned} \Delta V_{r2} &= (n + \Delta n)(V_r + \Delta V_r) - nV_r \\ &\doteq V_r \Delta n + n \Delta V_r \quad (13) \end{aligned}$$

簡単のためタップ制御系の不感帯を無視して、限時リレーの時定数を T_n で表わすと

$$\Delta n = -\frac{1}{sT_n} \Delta V_{r2} \quad (14)$$

(11)～(14)式より ΔV_r , ΔV_{r2} , ΔS を消去すると

$$\Delta n \left(1 + \frac{V_r}{sT_n} \frac{\beta}{\beta - \alpha n} \right) = 0 \quad (15)$$

なる特性式が得られ、安定条件は

$$\frac{\beta}{\beta - \alpha n} > 0 \quad (16)$$

で示される。 $n=1$ (定常時) としたときの安定条件を第9図に示す。図より明らかなように $\beta < 0$ のときは考え得るすべての負荷特性に対して安定であり、 $\beta > 0$ のときは通常の負荷特性に対して不安定となる*。このことは、受電端変圧器タップの安定性は(8)式と無関係に β の正負で決定されることを意味する。

しかしながら、前節で述べた理由と同じ理由で β が負となる領域が実系統に出現する可能性は極めて小さい。したがって、実系統で生じている電圧異常低下現象は、単に変圧器タップの安定性によるものではなく負荷の急増や S.C. の投入に変圧器タップの動きが相乗した複合的な現象と考えるべきである。

*: 軽負荷進み力率のとき生ずる $\beta > 0$ の領域は安定であり、この限りでない (第4図参照)。

第9図 負荷特性値 α と変圧器タップの安定性
Fig. 9. Stability of transformer tap control.

4. 電圧異常低下現象

今までに報告された電圧異常低下現象はすべて分単位以上の極めて長い時定数の現象であり、これらの現象を解明するには、それに対応した時定数の動的要因を基本とすべきである。系統の各種の動的要因の中でこれに該当するものは、変圧器のタップ制御と S.C. の投入制御である。

現象の起因となる外乱条件には、負荷の急増や電源脱落など種々のものが考えられるが、ここでは主に昼休み後の負荷の急激な立ち上りを想定して、30分間で40～50%程度の負荷の回復としている。この値は比較的大きいが、変電所単位で見れば、起こり得ることである。負荷特性としては通常値を採用し、電圧の0.6～1.4乗とする。

また、基本となる系統条件も種々のケースが考えられるが、受電端電圧の変動率が無限大となる電圧が、定格の85%付近となるまでの範囲に抑えている。これ以上の系統条件は、線路の安全電流や発電機の定態安定度、その他の系統運用上の問題から見て極めて稀と考えられるが、その場合は以下の検討結果より更に深刻な問題となろう。

〈4.1〉 シミュレーション手法 基本構成図と負荷曲線を第10図に示す。変圧器タップは1次変電所、2次変電所および需要家の電圧制御を纏めたものと見放す。S.C. は1次変電所で制御するものとし、その等価な位置として変圧器の1次側に設置する。各部の特性の詳細は以下のとおりである。

(1) 変圧器タップ制御特性 変圧器タップの制御特性は、動作感度と動作時間で決まる。2次側電圧偏差 ΔV_{r2} が設定された許容値を越し、その状態が時間 T_n の間継続するとタップを動作させる。上限、下限は $n_{\max}$, $n_{\min}$ で与えられる。

(2) S.C. 制御特性 S.C. の制御特性もタップと同様である。1次側電圧偏差 ΔV_{r2} が制御感度で決まる不感帯を越すと、時間 T_c 後に ΔY_c 単位で投入、シャ断が行なわれる。上限、下限は $Y_{c\max}$, $Y_{c\min}$

第 10 図 基本構成図と負荷曲線

Fig. 10. Simulation block diagram and load curve.

で与えられる。

(3) 系統特性と負荷特性 系統特性は(3)式で与えられる。負荷特性は本来定格電圧で消費されるべき電力 S_a とその電圧特性との積で与えられる。

$$S = S_a V_{r2}^\alpha = S_a n^\alpha V_r^\alpha \quad (17)$$

〈4・2〉 解析結果 簡単のため、変圧器タップ速度を 20s/タップ、タップ感度を2次側電圧の $\pm 1\%$ 、S.C. 投入感度を1次側電圧 $\pm 2\%$ に固定し、S.C. 投入速度のみをパラメータとする。これらの値は常識的なものであるが、タップ速度はもっと遅いものでありその場合は、以下の解析結果はやや緩やかなものになる。

(1) 単純系統 第1図のモデル系統につき、負荷特性を 0.6 乗とし負荷の立上りを 30 分間で 55→100% としたときの解析例を第11図に示す。S.C. 投入速度が4分のときは最低電圧は 90% 以上であるが、5分のときは 80% を切る。この現象の差は S.C. の投入経過の違いによってタップ位置、したがって、電源側から見た負荷状態に差異を生ずるためであり、遅れて、S.C. を投入したときの電圧回復効果の悪さを示している。この解析結果を S - V_r 曲線上の軌跡で示したのが第12図である。S.C. の容量が増大し、 S_{max} に対応する電圧が上がってくると電圧が急激に低下してゆく傾向がよく分る。このような可能性の生ずる状態は、S.C. 容量が短絡容量の 25% に達する付近である。

同一条件に対し、負荷の電圧特性値 α を変えてみた場合の解析例を第13図に示す。負荷の急増に対する電圧の落ち込みは α が大きいとやや緩やかになるが、負荷が落ち着いてからの電圧の回復は逆に悪くなる。これは α が大きいと電圧の低下に伴う消費電力の減少も大きくなることと、電圧が上昇に向うときはこれが逆に作用することのためである。いずれにしても、通常の α 値範囲では、電圧異常低下の可能性は負荷特性に大して影響されない。

(2) 2次側に電源のある系統 都市部の大需要

第 11 図 電圧異常低下現象解析例

Fig. 11. Analysis of voltage collapse of the model system.

第 12 図 S - V_r 面で見える電圧異常低下現象

Fig. 12. Loci of voltage collapse in S - V_r plane.

第 13 図 負荷特性と電圧異常低下現象

Fig. 13. Influence of load characteristics.

第 14 図 2 次側に電源のある系統の電圧異常低下現象

Fig. 14. Analysis of voltage collapse with a power source in secondary system.

地帯を考えると 2 次側にも電源のある場合が多い。ここでは 2 次側にケーブルを介した火力の進相発電機を考える。解析の一例を第 14 図に示す。この場合はタップ動作が 1 次側から見た負荷状態を変えるだけでなく、1 次電源と 2 次電源の無効電力バランスを変えるため (1) よりも顕著な現象が現われている。また、ケーブル系統の静電容量がバイアス分として働いたため、(1) で述べた S.C. 容量と短絡容量の比の問題は、ここではケーブルの静電容量を加えた話としなければならない。

(3) 一般系統 さらに複雑な系統、たとえば都市部の外輪線など場合は単純に S.C. 容量-短絡容量比の問題に帰着させることは難しい。このような場合は (2・3) 節で述べた電圧変動率が無限大となる点が、定格電圧の何%の所に存するかということが問題となる。今回の解析では、この値が 80% 以上になると、大幅な電圧低下の可能性がでてきた。電圧異常低下現象の要因は S.C. とタップの制御協調の問題と考えられるから、この関係は系統が複雑になっても変わらない。

外輪系のように負荷が分布している場合、前記の値は各負荷点でチェックされなければならない。この場合、需要の増加に対する S.C. 補償地点をどこにするかは大切なことになる。S.C. 補償はなるべく重負荷地点を選ぶことが電圧維持上効果的であるが、その配

置があまり偏ると、一部に電圧変動率の大きな危険な地点が生じ得る。したがって、S.C. 補償地点の選択は電圧維持効果と電圧変動率双方のかね合いを見つ決定する必要がある。

5. ま と め

以上、最近問題になっている系統受電端電圧の安定性について総合的な検討を行なったが、結果をまとめると以下ようになる。

(1) 電圧安定度と呼ばれる dQ/dV 理論あるいは dV/dE 理論による不安定領域が生ずるためには、系統側の条件としていくつかの問題点がある。

① これらの判定法は主として受電端の電圧変動率が正 (需要が増すと電圧が上がる) となる領域に着目したものであるが、そのためには重負荷の長距離送電線と大調相容量 (短絡容量の 50% 以上) を想定しなければならない。このような系統は送電線の安全電流や発電機の定態安定度から見て、通常の系統条件を遙かに逸脱したものである。

② このような系統では受電端の開放電圧が定格の倍以上に跳ね上がる。

③ 1 回線しゃ断時には共振点近くになるため過電流、異常電圧が発生する。

④ このような系統を構成する以前に電圧変動率が極めて大きな領域を通過しなければならない。

⑤ 負荷の dQ/dV 値が負となる場合は、前述の不安定領域が広がるとされているが、系統から見た負荷の総合特性が、このような条件になるとは考えられない。

このようなことから、 dQ/dV 理論や dV/dE 理論による不安定現象が実系統に存在する可能性は極めて小さい。

(2) 電圧不安定現象が dQ/dV 理論や dV/dE 理論のいうように、系統と負荷の固有な不安定平衡点に起因するものであれば、その現象は 0.1 秒以下の短い時定数を持つべきものである。実系統で生じている電圧異常低下現象は極めて長い時定数を持った現象である。電力系統に含まれる種々の動的要因のうち、このような現象に対応するものは、需要の急増や受電端の電圧制御である。

負荷急増時の受電端電圧制御は変圧器タップと調相器 (S.C.) 投入で行なわれるが、S.C. 投入が遅れ変圧器タップが大幅に先行すると、通常の運転条件、通常の負荷特性値であっても、異常な電圧低下の生ずる可能性がある。

(3) 電圧の異常低下現象の起こり得る系統条件の

一般的な検討を行なった結果、実システムの計画・運用上の留意点として以下の事項を提言する。

① 需要の急増に伴う S.C. の投入はできるだけ速やかに行なうのがよい。電圧が一たん大幅に低下した後、S.C. を投入しても効果は少い。この傾向は、2 次側に電源のある場合、さらに厳しくなる。

② S.C. 容量がある値を越すと電圧異常低下現象の可能性も大きくなる。その目安は、単純系統では短絡容量の 25% 程度である。複雑な系統の場合は $dQ/dV=0$ (電圧変動率無限大) となる点が定格電圧の 80% 程度となると危険と考えられる。

③ 外輪系のように受電端が分布している場合、S.C. 補償地点はどこでもよいわけではなく、なるべく重負荷地点を選ぶことが電圧維持上効果的である。しかし、その配置が偏ると、一部に dQ/dV の小さな危険な地点が生ずる。したがって S.C. 補償地点は電圧維持効果と電圧変動率の双方のかね合いを見つつ決定する必要がある。

終わりに、本論文の作成にあたり終始懇切なご指導を戴いた上之園 博氏、有益なご討論と助言を戴いた尾出和也氏、小宮康雄氏、大庭靖雄氏および東地域電源調整会議送電小委員会各位、ならびに計算に協力戴いた浅田 実氏に深甚なる感謝の意を表します。(昭和 49 年 10 月 30 日受付、同 50 年 2 月 27 日再受付)

文 献

- (1) В. А. ВЕНИКОВ, 他: Изв. АКАд. Наук СССР (Энергетика и Автоматика) No. 4, p. 19 (1962)
- (2) B. M. Weedy, et al: Proc. Instn Elect. Engrs, 115, p. 528 (1968-4)
- (3) 長尾・上之園: 電中研技報, No. 72118 (昭 48)

付 録

dQ/dV 理論と dV/dE 理論

第 1 図のモデル系統において、負荷端から電源側を見た潮流条件は、(1) 式で与えられている。

$$P_L = \frac{V_s V_r}{x_l} \sin \delta$$

$$Q_L = \frac{V_s V_r}{x_l} \cos \delta - \left(\frac{1}{x_l} - Y_C \right) V_r^2 \quad \dots\dots (1)$$

また、これらの P_L, Q_L は負荷特性によって V_r の関数で示される。混同を避けるために負荷特性によって表示される P_L, Q_L を P_r, Q_r で示す。

$$P_r = f_p(V_r), \quad Q_r = f_q(V_r) \quad \dots\dots (付 1)$$

(1) 式および(付 1) 式より V_r, δ の微小変化に対する P_L, Q_L, P_r, Q_r の変動分は、

$$\Delta P_L = \frac{\partial P_L}{\partial V_r} \Delta V_r + \frac{\partial P_L}{\partial \delta} \Delta \delta \quad \dots\dots (付 2)$$

$$\Delta Q_L = \frac{\partial Q_L}{\partial V_r} \Delta V_r + \frac{\partial Q_L}{\partial \delta} \Delta \delta \quad \dots\dots (付 3)$$

$$\Delta P_r = \frac{\partial P_r}{\partial V_r} \Delta V_r \quad \dots\dots (付 4)$$

$$\Delta Q_r = \frac{\partial Q_r}{\partial V_r} \Delta V_r \quad \dots\dots (付 5)$$

$\Delta P_L = \Delta P_r$ を条件式と考えて(付 2) 式と(付 4) 式より $\Delta \delta$ を求めると

$$\Delta \delta = \Delta V_r \left(\frac{\partial P_r}{\partial V_r} - \frac{\partial P_L}{\partial V_r} \right) / \frac{\partial P_L}{\partial \delta}$$

これを(付 3) 式に代入し、 ΔV_r で割ると

$$\frac{\Delta Q_L}{\Delta V_r} = \frac{\partial Q_L}{\partial V_r} + \frac{\partial Q_L}{\partial \delta} \left(\frac{\partial P_r}{\partial V_r} - \frac{\partial P_L}{\partial V_r} \right) / \frac{\partial P_L}{\partial \delta} \quad \dots\dots (付 6)$$

(付 5) 式より

$$\frac{\Delta Q_r}{\Delta V_r} = \frac{\partial Q_r}{\partial V_r} \quad \dots\dots (付 7)$$

(付 6), (付 7) 式より

$$\frac{\Delta Q_r}{\Delta V_r} - \frac{\Delta Q_L}{\Delta V_r} = \frac{1}{\frac{\partial P_L}{\partial \delta}} \left[\frac{\partial P_L}{\partial \delta} \left(\frac{\partial P_r}{\partial V_r} - \frac{\partial P_L}{\partial V_r} \right) \right] / \left[\frac{\partial Q_L}{\partial \delta} \left(\frac{\partial P_r}{\partial V_r} - \frac{\partial P_L}{\partial V_r} \right) \right] \quad \dots\dots (付 8)$$

実系統で線路両端の相差角が 90° を越えることは無いから(付 8) 式の右辺の係数は正、したがって

$$\frac{\Delta Q_r}{\Delta V_r} > \frac{\Delta Q_L}{\Delta V_r} \quad \dots\dots (付 9)$$

となるためには、(付 8) 式の行列式の部分が正となることが条件となる。この行列式は Weedy 氏が文献(2) で示した dV/dE 理論の判別式と全く一致する。(付 9) 式で Q_r, Q_L で区別した量を添字 G, L を用いて書き直したものが(8) 式である。

$$(dQ_L/dV_r)_L > (dQ_L/dV_r)_G \quad \dots\dots (8)$$

(8) 式の左辺は負荷特性そのものである。右辺は潮流計算の指定値を、わずかに変化することで求められる。すなわち、 P, V 指定のときは V の値を、 P, Q 指定のときは Q をわずかに変化させ、収束結果から $\Delta Q/\Delta V$ を求めればよい。このとき、収束結果の V を用いて P 指定値を修正して繰り返せば、より完全であるが、通常は P_L の負荷特性を無視している。また、この値は潮流計算結果と伝達アドミタンス行列を用いて直接(付 8) 式の行列式から算定することもできる。