UDC 621.311.15.011.716

論 文
60-B68

系統負荷構成要素の動態安定度に及ぼす影響

正 員 阿久津 勝 美 (群馬大)

正 員 松 岡 昭 男 (群馬大)

正 員 田 尻 栄 一 (群馬大)

1. ま え が き

電力系統の動態安定度を解析するに当って、系統の各構成要素をどのように表現するかは極めて重要なことであり、解析の対象となる構成要素の動特性表現方式は、従来、次の四つの部分に分け検討されてきた。すなわち、発電機、発電機制御系、送電線路並びに系統負荷などの各モデル化である。これらのうち、前3者については、数多くの研究が行なわれ、詳細な検討がなされてきた。しかし、系統負荷特性についての検討は、安定度解析上重要な部門でありながら、他の構成要素に比べ、若干立ちおくれの感があった。もちろん、系統負荷特性のモデル化についても、既にかんがりの検討がなされ、筆者らも幾つかの考察を行ってきた^{(12)~(14)}。

ここに、系統負荷特性のモデル化を検討するに当って、実系統に適合したモデルを作る場合、特に留意しなければならないものの一つに、負荷地点における同種負荷要素*の%構成 (load window) がある。すなわち、負荷特性の安定度に与える影響は、同種負荷の電圧、周波数特性そのものと、これらの同種負荷の各負荷地域における%構成との両者によって決定され、特に、これを実系統に適用する場合には当該地域負荷の%負荷構成に則したモデルを作ることが重要である。しかるに、まだ、系統負荷の同種負荷%構成に重点をおいた負荷のモデル化と、これの動態安定度に及ぼす影響についての系統立った検討がなされた例は少ない。

よって、本文は、この問題を明らかにする一助とし

て系統負荷の各同種負荷の%構成が、どのように安定度に影響を及ぼすかに論点の中心をおき、地域負荷の%構成を大きく左右する地域的特色および季節問題並びにこれに関連した判定判別処理方式などについて検討を試みようとするものである。

次に、本文で得られた結果の概要を述べる。

解析の対象となる各系統負荷を同種負荷の%構成によって主工業、主商業、主住宅、主農業および平均的混在の各地域に、また季節を冬期と夏期とに分ける。

(1) 冬期においては、主工業地域が安定条件最もか酷で、混在、主商業地域がこれに次ぎ、主住宅、主農業地域が最も安定性が良くなっている。

(2) 夏期においては、主住宅、主商業地域が最もか酷で、混在、主工業、主農業地域の順にゆるやかになっており、かつ、これらの間の差は冬期に比べ小さい。

(3) 冬、夏両期の各地域についての安定性は、その度合はもちろん、その順位をも異にし、かつ、冬期に比べ夏期の方がか酷である。

(4) 安定判別処理方式におけるそれぞれの安定条件も、系統負荷の%構成によって、その様相がかなり違ってくる。

(5) 安定性に対する電圧への依存度は、周波数のそれに比べ、格段に大きく、前者は安定性の大幅な低下、後者は一般に若干の増加をもたらす。

などである。

2. 系統負荷の並列アドミッタンス表示(1)

負荷特性のモデル設定に関与する要素には、

(1) 各同種負荷の電圧、および周波数に対する依存度、(2) これら依存度の電圧、周波数の変動の範囲および外乱後の時間(過渡、中間領域、定態)⁽⁶⁾による変化、(3) 低電圧リレーにより生じる1部負荷の分離による電圧負荷係数、(4) 系統負荷の合成特性における、同種負荷の種類、割合、稼動状態およびそれらの地域的、季節的变化に関する特性

などがあり、本文においては、以上(1)~(4)の諸要

*: 系統負荷の構成要素の単体 (例えば、白熱灯、誘導機など) を同種負荷、幾つかの同種負荷から合成された負荷 (例えば、工業地区、商業地区など) を合成負荷、幾つかの合成負荷の%構成から成り立つ一つの系統負荷 (例えば、主工業地域など) を地域負荷と呼ぶ。

Influence of Composite Elements of System Loads on Dynamic Stability. By Katsumi Akutsu, Member & Akio Matsuoka, Member & Eiichi Tajiri, Member (College of Technology Gunma University).

阿久津勝美: 正員, 群馬大学工業短期大学部

松岡昭男: 正員, 群馬大学工業短期大学部

田尻栄一: 正員, 群馬大学工業短期大学部

素について次のように取り扱った。

すなわち、(1) 電圧依存度は、電圧に関する指数表示とする。周波数依存度は、電圧のそれに比べて格段に小さいので、周波数変化分にかかる係数（電圧依存度と周波数依存度との割合を示すもので、周波数傾斜係数と呼ばれる）をもって、その特性を表わすものとする^{(4)(5)(9)~(11)}。(2) 電圧負荷指数は電圧の関数、周波数傾斜係数は周波数の関数として表わす。また、対象とする時間は、過渡領域（0~1.0 秒程度）と、これに続く中間領域（1.0~5.0, 10.0 秒程度）に対応する時間帯とする。なお、定態領域においては、その不安定現象は、系統内に潜在している固有の不安定モードにより引き起こされ、外乱の大きさには依存せず、また、本論文のような数値積分法以外にも種々の間接法⁽¹¹⁾⁽¹⁵⁾も有用視されているので今後の検討課題とする。すなわち、安定、不安定の確然としている場合は 1.0, 2.0 秒まで、限界近くにある場合は 5.0, 10.0 秒程度までを解析の対象としている。(3) 1 部負荷の分離については、電圧負荷係数を電圧の関数として表わす。(4) 系統負荷の合成負荷モデルを作るには、まず feeder レベルの同種負荷の load window を作り、これらの load window における各同種負荷の特性、および割合と、各 feeder の容量とを考慮して決定する⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁸⁾。地域的、季節的变化については実態調査、理論的解析を勘案して検討する⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾。

以上、要約すると、同種負荷については、電圧負荷指数は電圧の関数、電圧負荷係数は電圧の関数、周波数傾斜係数は周波数の関数で表わされる。系統負荷は各 feeder の同種負荷と、電圧の関数である feeder 負荷の容量とからなるものの集合体で表わされる。

従って、任意の同種負荷の有効、無効電力を

$$K_{11}(v)(E_{11}/E_{110})^{m_{11}(v)+2}(1+L_{11}(f)\cdot\Delta f)$$

$$K_{12}(v)(E_{11}/E_{110})^{n_{11}(v)+2}(1+L_{12}(f)\cdot\Delta f)$$
 で表わせば、系統負荷並列アドミタンス Y_i は

$$Y_i = \sum_h N_h(v) \left\{ \sum_i K_{11}(v)(E_{11}/E_{110})^{m_{11}(v)} \right. \\ \times (1+L_{11}(f)\cdot\Delta f) - j \sum_i K_{12}(v) \\ \times (E_{11}/E_{110})^{n_{11}(v)}(1+L_{12}(f)\cdot\Delta f) \Big\} \quad (1)$$

で表わされ、これを送電線路の 1 部として、その中に組みこむことができる。

ここに、 $N_h(v)$: 各 feeder の負荷の容量、
 $K_i(v)$: 一つの feeder の同種負荷の電圧負荷係数の割合 (load window), $m_i(v), n_i(v)$: 電圧負荷指数, $L_i(f)$: 周波数傾斜係数, E_{11} :

負荷点電圧, E_{110} : 同基準電圧, Δf : 周波数変化分

3. 負荷点における電圧および周波数

〈3・1〉 負荷点の電圧 n なる瞬時における外乱点の各対称分電圧を求め、対称分回路を用いて負荷点の対称分電圧を求めて、負荷点における各相電圧, $E_{11a,n}, E_{11b,n}, E_{11c,n}$ を構成する。負荷の非線形性を考慮しているので、厳密には重ね合せの考えは成り立たないが、実際計算においては各瞬時を step-by-step で計算し、この step 時間を 0.01 秒程度にとり、非線形を微小線形の集まりと考えると処理しても誤差は小さいと思われる。ここで問題になるのは、外乱点における各瞬時の仮想非外乱時電圧* であり、これは次のようにして求められる。

すなわち、図 1 に示すように、 N 箇のノードをもつ系統において、 l ブランチに系統負荷を有し、 k ブランチに外乱が生じたものとする、外乱発生後任意の n 時における外乱点の仮想非外乱時電圧 (図 1 において Y_{fn} を除いた場合の F 点の電圧) $E_{kf,n}$ は、一般多機系回路を有する点 (この場合は外乱点) の電圧について解くことによって、外乱発生後各 step を通じて一定である回路定数 (負荷をもたないブランチの定数 $-A_{Ll} \sim D_{Ll}$ など) と各 step ごとに変化し、その step 内においては一定であると見なされる回路定数 (負荷を有し、これをも含めたブランチの定数 $-A_{Ll,n} \sim D_{Ll,n}$) および各ノード電圧 ($E_{11a,n}, E_{11b,n}, E_{11c,n}$) などの関数として、次のように表わされる。

$$E_{kf,n} = \left\{ B_{Lk2} x_{kq} / \Delta_1 + (x_{kd}' x_{kq} D_{Lk1} \right. \\ \left. D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq k, l}^N D_{Lj} \right. \\ \left. + x_{kq} B_{Lk1} \right) \left(\frac{D_{Lk} x_{kd} + B_{Lk}}{x_{kd} - x_{kd}'} \right) \times \left(\frac{D_{Lk} x_{kd} + B_{Lk}}{D_{Lk} x_{kd}' + B_{Lk}} - 1 \right) \\ \left. / \Delta_2 \right\} E_{kd,n'} + \left\{ B_{Lk2} (x_{kd}' + x_{kq}) / \Delta_1 + (x_{kd}' x_{kq} D_{Lk1} \right. \\ \left. D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq k, l}^N D_{Lj} \right. \\ \left. + x_{kq} B_{Lk1} \right) \left\{ \left(\frac{D_{Lk} x_{kd}' + B_{Lk}}{D_{Lk} x_{kd}' + B_{Lk}} \right) \left(D_{Lk} - \frac{B_{Lk}}{x_{kq}} \right) \right\}$$

*: (1) 外乱時における各対称分回路を作る場合、外乱点における対称分電圧を求めることが必要であり、この電圧は、外乱点の外乱前の電圧 (外乱が生じていないと仮定した回路の外乱点電圧) と、外乱点からみた系統の対称分インピーダンスから構成される。そして (2) 系統負荷の諸特性を考慮した場合は、外乱後における系統の諸量 (各ノード電圧およびその位相角、ノード間の伝達インピーダンスなど) は絶えず変化して行く。(3) 本論文は、これを step 的に変化すると考え、各 step ごとに、(1), (2) の考え方を適用した。そして各 step における外乱点の外乱前の電圧 (外乱が生じていないと仮定した回路の外乱点電圧) に相当するものを仮想非外乱時電圧と表現した。

図 1 系統図

Fig. 1. Transmission system.

$$\begin{aligned}
 & \left. \frac{D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l}^N D_{Lj}}{x_{kq}} \right\} \Big/ \Delta_2 \Big] E_{ktq,n} \\
 & + (x_{kd}' x_{kq} D_{Lk1} + x_{kq} B_{Lk1}) \\
 & \times \left[\left(\frac{D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l}^N D_{Lj}}{x_{ld} - x_{ld}'} \right) \left(\frac{D_{Ll,n} x_{ld} + B_{Ll}}{D_{Ll,n} x_{ld}' + B_{Ll}} - 1 \right) \right] \\
 & \times E_{1d,n}' + \left\{ \left(\frac{D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l}^N D_{Lj}}{D_{Ll,n} x_{ld}' + B_{Ll}} \right) \left(D_{Ll} - \frac{B_{Ll}}{x_{1q}} \right) \right. \\
 & \left. + \frac{D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l, N}^N D_{Lj}}{x_{1q}} \right\} \times E_{1tq,n} + \dots \\
 & + \left\{ \left(\frac{\prod_{j=1, j \neq l}^N D_{Lj}}{x_{ld} - x_{ld}'} \right) \left(\frac{D_{Ll,n} x_{ld} + B_{Ll,n}}{D_{Ll,n} x_{ld}' + B_{Ll,n}} - 1 \right) \right. \\
 & \left. \times E_{1d,n}' + \left(\frac{\prod_{j=1, j \neq l}^N D_{Lj}}{D_{Ll,n} x_{ld}' + B_{Ll,n}} \right) \right. \\
 & \left. \times \left(D_{Ll,n} - \frac{B_{Ll,n}}{x_{1q}} \right) + \frac{\prod_{j=1, j \neq l}^N D_{Lj}}{x_{1q}} \right\} E_{1tq,n} + \dots \\
 & + \frac{D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l, N}^N D_{Lj}}{x_{Nd} - x_{Nd}'} \left(\frac{D_{LN} x_{Nd} + B_{LN}}{D_{LN} x_{Nd}' + B_{LN}} - 1 \right) \\
 & \times E_{Nd,n}' + \left\{ \left(\frac{D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l, N}^N D_{Lj}}{D_{LN} x_{Nd}' + B_{LN}} \right) \right. \\
 & \left. \times \left(D_{LN} - \frac{B_{LN}}{x_{Nq}} \right) + \frac{\prod_{j=1, j \neq l, N}^N D_{Lj}}{x_{Nq}} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\times E_{Ntq,n} \Big/ \Delta_2 \dots \dots \dots (2)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_1 &= D_{Lk2} (x_{kd}' x_{kq} D_{Lk1} + x_{kq} B_{Lk1}) \\
 &+ B_{Lk2} (x_{kd}' x_{kq} C_{Lk1} + x_{kq} A_{Lk1}) \\
 \Delta_2 &= C_{L1} D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l}^N D_{Lj} + \dots + C_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l}^N D_{Lj} \\
 &+ \dots + C_{LN} D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l, N}^N D_{Lj} \\
 &+ D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l, N}^N D_{Lj} \Big/ (D_{Ll} x_{ld}' + B_{Ll}) + \dots \\
 &+ \prod_{j=1, j \neq l}^N D_{Lj} \Big/ (D_{Ll,n} x_{ld}' + B_{Ll,n}) + \dots \\
 &+ D_{Ll,n} \prod_{j=1, j \neq l, N}^N D_{Lj} \Big/ (D_{LN} x_{Nd}' + B_{LN})
 \end{aligned}$$

但し、 $A_{Lj} \sim D_{Lj}$: 任意のブランチの回路定数、 $A_{Lk1} \sim D_{Lk1}$, $A_{Lk2} \sim D_{Lk2}$: 外乱発生の際のブランチの外乱点までおよびそれ以降の回路定数、 $A_{Ll,n} \sim D_{Ll,n}$: 系統負荷をもつ l ブランチの回路定数、 $E'_{jd,n}$, $E_{jtq,n}$: 任意の j ノードの同期機の n 時の直軸過渡リアクタンス背後の電圧、同端子電圧の横軸分、 x_{jd} , x'_{jd} , x_{jtq} : 同上の同期機、直軸過渡および端子横軸リアクタンス

$E'_{jd,n}$, $E_{jtq,n}$ の導出法については文献(13)参照。

(2)式を用いて外乱点における各瞬時の対称分電圧を求め、対称分回路を用いて負荷点の対称分電圧を求めて負荷点の各相電圧を構成する。

〈3・2〉 負荷点の周波数 負荷点の n 時における周波数 $f_{lt,n}$ は、負荷点における各相電圧から、次のように表わされる (文献(7)参照)。

$$\begin{aligned}
 \sin \omega \delta &= [1 / \{3 \sqrt{3} \{ (E_{lta,n}^2 + E_{ltb,n}^2 \\
 &+ E_{ltc,n}^2) / 3 - (E_{lta,n} + E_{ltb,n} \\
 &+ E_{ltc,n})^2 / 3 \} \} \{ (E_{lta,n} - E_{lta,n-1}) \\
 &\times (E_{ltc,n} - E_{ltb,n}) + (E_{ltb,n} \\
 &- E_{ltb,n-1})(E_{lta,n} - E_{ltc,n}) \\
 &+ (E_{ltc,n} - E_{ltc,n-1})(E_{ltb,n} \\
 &- E_{lta,n}) \} \dots \dots \dots (3)
 \end{aligned}$$

$$\omega \delta \simeq \sin \omega \delta + (\sin \omega \delta)^3 / 6 \dots \dots \dots (4)$$

$$f_{lt,n} = (\omega \delta) / (2\pi \delta) \dots \dots \dots (5)$$

$\omega \delta$: $(n-1)$ 時 $\sim n$ 時における電圧の位相角の

〈3・3〉 系統負荷の並列アドミッタンス表示(2)

外乱時における各相電圧は不平衡であるから、系統負荷を電圧、周波数の関数と考えると、例えば外乱前の

各相の負荷が平衡していたとしても、外乱時においては負荷点に接続される系統負荷アドミタンスは不平衡となるが、本文では近似的に、次の(6)式で示すように平衡負荷アドミタンス表現された負荷が接続されるものと考えた。

$$\begin{aligned}
 Y_{li,n} = & \sum_h N_{h,(v)} \{ \sum_i K_{i1,(v)} (E_{lta,n}/E_{lt0})^{m_{i,(v)}} \\
 & \times (1 + L_{i1,(v)} \cdot \Delta f) + \sum_i K_{i1,(v)} (E_{ltb,n}/E_{lt0})^{m_{i,(v)}} \\
 & \times (1 + L_{i1,(v)} \cdot \Delta f) + \sum_i K_{i1,(v)} (E_{ltc,n}/E_{lt0})^{m_{i,(v)}} \\
 & \times (1 + L_{i1,(v)} \cdot \Delta f) \} - j \{ \sum_i K_{i2,(v)} \\
 & \times (E_{lta,n}/E_{lt0})^{n_{i,(v)}} (1 + L_{i2,(v)} \cdot \Delta f) + \sum_i K_{i2,(v)} \\
 & \times (E_{ltb,n}/E_{lt0})^{n_{i,(v)}} (1 + L_{i2,(v)} \cdot \Delta f) + \sum_i K_{i2,(v)} \\
 & \times (E_{ltc,n}/E_{lt0})^{n_{i,(v)}} (1 + L_{i2,(v)} \cdot \Delta f) \} \} / 3 \quad (6)
 \end{aligned}$$

4. 過渡動揺時の電力式の表現

$$\begin{aligned}
 [P_n] = & R \begin{bmatrix} E_{1t,n} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & E_{Nt,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{11,n} & Y_{1N,n} \\ \vdots & \vdots \\ Y_{N1,n} & Y_{NN,n} \end{bmatrix} \\
 & \times \begin{bmatrix} E_{1t,n} \\ \vdots \\ E_{Nt,n} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)
 \end{aligned}$$

$E_{li,n}$ は第3章の負荷点電圧の求め方を各ノードに適用して求める。

$$\begin{aligned}
 Y_{li,n} = & R \{ (A_{Li} B_{Li} B_{Lk,n} B_{Ll,n} \prod_{j=1, i, k, l}^N B_{Lj} \\
 & + \dots + A_{Lk,n} B_{Li} B_{Ll,n} \prod_{j=1, i, k, l}^N B_{Lj} \\
 & + \dots + A_{Ll,n} D_{Li} B_{Lk,n} \prod_{j=1, i, k, l}^N B_{Lj} \\
 & + \dots + A_{L,N-1} D_{Li} B_{Lk,n} B_{Ll,n} \\
 & \times \prod_{j=1, i, k, l}^N B_{Lj} + C_{Li} B_{Lk,n} B_{Ll,n} \\
 & \times \prod_{j=1, i, k, l}^N B_{Lj} / \Delta_3 \} \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{ij,n} = & - \{ R (B_{Lk,n} B_{Ll,n} \prod_{p=1, j, k, l}^N B_{Lp} / \Delta_3) \\
 & \times \cos(\theta_i - \theta_j) + I (B_{Lk,n} B_{Ll,n} \\
 & \times \prod_{p=1, j, k, l}^N B_{Lp} / \Delta_3 \sin(\theta_i - \theta_j)) \} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\Delta_3 = A_{Li} B_{Lk,n} B_{Ll,n} \prod_{j=1, i, k, l}^N B_{Lj} + \dots$$

$$\begin{aligned}
 & + A_{Lk,n} B_{Ll,n} \prod_{j=1, i, k, l}^N B_{Lj} + \dots \\
 & + A_{Ll,n} B_{Lk,n} \prod_{j=1, i, k, l}^N B_{Lj} + \dots \\
 & + A_{LN} B_{Lk,n} B_{Ll,n} \prod_{j=1, i, k, l}^N B_{Lj}
 \end{aligned}$$

$A_{Lk,n} \sim D_{Lk,n}$: k ブランチの外乱時等価正相回路の $A \sim D$ に相当するもので電圧、周波数、時間の関数

系統の安定判別、および動揺過程中的の諸要素の変動は、回転子の方程式を Runge-Kutta-Gill 法によって求める。

なお、本論文における安定判別処理方式は、実際の負荷状態に最も近いと考えられる電圧、周波数ともに考慮する場合を主とするが、従来、負荷特性を定インピーダンス、定電流、定電力または電圧の関数で表現している処理方式も多いので、これらとの比較、更に電圧、周波数個々の影響をも併せ検討するため、電圧のみ考慮、周波数のみ考慮および電圧、周波数ともに考慮せずの各場合も考えている。

5. 数値解析結果およびその考察

数値解析例の対象を、表1～4に示す諸量をもつ3機系とする。すなわち、大容量発電所から1需用地に長距離送電され、負荷地点には一つの同期調相機と、多くの同期電動機を縮約した等価同期電動機（以上の

表1 系統の諸量

Table 1. Constants of system.

275-250 kV 系			
発電機単位容量, 台数		60,000 kVA, 12 台	
" 同期, 過渡リアクタンス		160%, 30%	
" 単位慣性定数		8 kW _s /kVA	
" 界磁開回路時定数		5.5 s	
" 制動係数		3.0 p.u.	
調相機容量		480,000 kVA	
" 同期, 過渡リアクタンス		120%, 40%	
" 単位慣性定数		3 kW _s /kVA	
" 界磁開回路時定数		4.0 s	
同期電動機容量		900,000 kVA	
" 同期, 過渡リアクタンス		110%, 45%	
" 単位慣性定数		3.5 kW _s /kVA	
発電機一次遅れ AVR		調相機一次遅れ AVR	
利 得	時 定 数	利 得	時 定 数
20	1.5	10	1.2

表 2 同種負荷の微係数(指数)

Table 2. Differential coefficients (exponents) of the homogeneous loads.

負 荷	dP/dV^{*1}	dQ/dV	dP/df	dQ/df
白 熱 灯	≈ 2.00	≈ 0.00	≈ 0.00	≈ 0.00
放 電 灯	≈ 1.00	2.0~3.0	-0.5~-1.0	-2.0~-3.0
テ レ ビ	≈ 2.00	≈ 2.00	≈ 0.00	-3.0~-4.0
熱 抵 抗	≈ 2.00	≈ 0.00	≈ 0.00	≈ 0.00
家庭用小形モータ	≈ 0.05	2.0~3.0	0.1~0.5	≈ -1.6
static コンバータ	0.1~1.0	0.0~0.5	≈ -0.5	≈ 0.5
アーク炉	1.6~2.0	1.0~4.0	≈ -1.0	≈ -1.0
誘導機 ^{*2}	0.1~0.5	1.0~1.5	2.0~3.0	1.0~3.0

*1: 電圧、周波数特性は、それぞれの微係数、または指数表示され、電圧、周波数に基準値をとれば微係数の値は、指数の値と等しくなる⁽¹⁾⁽²⁾。例えば、 $dP/dV = m_{iv} + 2$ (電力表現式参照)。

*2: 極小形機(家庭用小形モータなどを除く)。

表 3 合成負荷の同種負荷%構成

Table 3. Percentage composition of the homogeneous loads in the composite loads.

(1) 冬期の一例

	% 構 成			
	工業地区	商業地区	住宅地区	農業地区
白 熱 灯	3	10	10	12
放 電 灯	5	30	15	15
テ レ ビ	2	5	5	5
熱 抵 抗	10	30	65	50
家庭用小形モータ	5	10	5	5
static コンバータ	10	0	0	0
アーク炉	10	5	0	3
誘導機	55	10	0	10

(2) 夏期の一例

	% 構 成			
	工業地区	商業地区	住宅地区	農業地区
白 熱 灯	3	10	5	8
放 電 灯	5	25	12	12
テ レ ビ	2	3	4	5
熱 抵 抗	8	12	25	22
家庭用小形モータ	10	35	54	20
static コンバータ	7	0	0	0
アーク炉	10	5	0	3
誘導機	55	1.0	0	30

諸量表1) および(6)式、表2~4で与えられる系統負荷があるものとする。

なお、外乱として、送電線の中央における1線接地故障を想定した。

系統負荷の特性および構成要素が安定度に影響を与える要因には種々のものが考えられるが、その主なるものとして、負荷特性については電圧、周波数特性、構成要素としては地域構成と季節による構成とが考えられるので、これらに重点をおいて検討する。

同種負荷の電圧、周波数特性(指数関数表示)は現在までに検討されている理論的および実測の結果から勘案して、表2に示すような値とする⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾⁽¹¹⁾。また、合成負荷別の同種負荷%構成の代表的な一例を表3に示す⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾。なお、季節による合成負荷の構成の変化は最近特に著しく、本例では冬、夏両期のものを示した。更に、地域別による各合成負荷の%構成の代表的な一例を表4に示す⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁸⁾。従って、表3、表4から各系統負荷についての同種負荷の%構成を求めることができる。

まず、各季節における地域負荷の特性および構成の安定度を与える影響を考え、更に、季節別による負荷構成の変化をも併せ考察する。

表 4 系統負荷の合成負荷%構成

Table 4. Percentage composition of the composite loads in the system loads.

	工業地区	商業地区	住宅地区	農業地区
主工業地域	80	10	10	0
主商業地域	10	70	20	0
主住宅地域	5	20	70	5
主農業地域	10	20	10	60
混在地域	25	25	25	25

初期条件 (外乱発生時負荷状態)

(横軸は発電機、電動機間相角φ)

図 2 各負荷地域についての安定性

Fig. 2. Stability limit in each load area.

〈5・1〉 冬期について

(1) 図2に示すように、系統負荷が主工業地域である場合安定条件が最もか酷であり、主商業、代表的混在地域がこれに次ぎ、主住宅、主農業地域が安定性が最も良くなっている。

(2) 安定判別処理方式からみると、図3(a)に示すように、各処理方式によりその安定条件が、「Vのみ考慮」→「V, F考慮」→「V, F考慮せず」→「Fのみ考慮」の四つの段階（この順に安定性を増す）になるグループ（主工業、混在）と図3(b)のように「Vのみ考慮」→「V, F考慮」→「V, F考慮せず」、「Fのみ考慮」の3段階に分かれるグループ（主商業、主住宅、主農業）とがある。

(3) 外乱発生時の負荷状態からみた各地域負荷の安定条件に対する影響は、中間負荷において大きく、軽負荷、重負荷において比較的小さい。すなわち、図2にみるように、軽負荷（故障発生時相差角 26° ）においてはすべての地域において安定。重負荷（同 30° ）においてはすべての地域で不安定。中間負荷（同 28° ）においては主工業、主商業、混在地域において不安定であるのに、主住宅、主農業地域では安定である。

〈5・2〉 夏期について

(1) 図4(a)に示すように、系統負荷が主商業、主住宅地域の場合安定条件が最もか酷、混在地域がこれにつぎ、主工業、主農業地域が最も安定性が良くなっている。

(2) 各地域負荷に対する安定性を判別処理方式からみると、図4(b)のようにいずれの地域も四つの段階になる（図は、主商業地域の場合を示した）。

(3) 外乱時負荷状態の安定度に対する影響は、冬期ほど著しくはないが、中間負荷において大きく、軽、

図3 安定判別処理法についての安定性

Fig. 3. Stability limit about the method of discriminating stability.

図4 各負荷地域および安定判別処理法についての安定性

Fig. 4. Stability limit in each load area and about the method of discriminating stability.

重負荷において比較的小さい。すなわち、図4(a)に示すように、軽負荷（ $26^\circ, 27^\circ$ ）においては、すべての地域で安定、中間および重負荷においては、すべての地域で不安定となっているが、各地域の極限しゃ断時間をみると、その差は重負荷より中間負荷において若干大きくなっている。

〈5・3〉 両季節間の安定性の相違について

(1) 冬、夏両期における各地域負荷についての安定性は、その度合はもちろん順位をも異にしている。例えば、冬期においては主工業地域の場合が最もか酷であったが、夏期においては主商業、主住宅地域がこれに代っている。

(2) 安定条件が冬期より夏期において全般的にか酷になっている。すなわち、図5、図6に示すように安定時における相差角の振幅においても、不安定時に

図5 安定時最大相違角の比較

Fig. 5. Comparison of maximum phase difference in stable state.

おける極限しゃ断時間についても、夏期の方がか酷になっている。更に、この傾向を各負荷地域について検討すると主住宅、主商業地域（特に主住宅）において著しく、主工業地域では小さい。

(3) 図2と図4(a)との比較からわかるように、各負荷地域間の安定条件についての差違は、夏期においては冬期に比べかなり小さい。

(5-4) 安定性に及ぼす電圧と周波数の影響の比較

図7は、安定性に対する電圧への依存度が、各負荷地域、両季を通じて、周波数への依存度に比べ格段に大きく、かつ、電圧依存度は安定性減少に、周波数依存度は全体として安定性増加に作用していることを示している。これは、前出の図3、図4(b)において、「V, F 考慮せず」を基準として、これと「V のみ考慮」、「F のみ考慮」の場合を比較してみれば明らかである。次に、その内容について検討してみる。まず、

図6 不安定時しゃ断時間の比較

Fig. 6. Comparison of interrupting time in unstable state.

図7 電圧、周波数の影響の比較

Fig. 7. Comparison of influence between voltage and frequency.

安定時最大相角については、図7(a), (b) から両季ともに周波数の影響は、電圧のそれに比べて非常に小さく、主工業地域において若干の影響があるが、他の地域では僅かである。これに比べ電圧の影響は格段に大きく、冬期の主工業地域および夏期の全地域において、その様相が著しい。安定極限しゃ断時間についても安定時最大相角の場合と同様な傾向をもつ。

以下、上記検討結果についてその理由を考察する。

まず、電圧、周波数特性の安定度に及ぼす影響について考える。

(1) 電圧の影響 電圧が減少する場合、その影響は一般に安定性を減少させる（電圧の減少→系統負荷並列アドミタンスの増大→伝達インピーダンスの増大→安定性の低下）。そして、その傾向は一定電力負荷 (dynamic load) において特に著しい⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

(2) 周波数の影響

(a) 有効電力に関しては、static load (熱負荷など) は、あまり周波数に依存せず、dynamic load (誘導機など) は static load に比べ依存度が大きく、かつ、 dP/df が正で絶対値が大きいほど安定性増大、負で絶対値が大きいほど安定性減少。(b) 無効電力については、現象が複雑で、かつ、資料に乏しいが、一般に dQ/df が負で絶対値が大きいほど安定性増大、正で絶対値の大きいほど安定性減少⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾。従って、表2～4にみるように、負荷地域における周波数の影響は、各地域の構成要素である同種負荷の間および各同種負荷の有効分と無効分との間の安定化部分と不安定化部分とが相殺されて、その影響が小さくなる場合が多い。なお、実際には dQ/df の影響は、主に並列リアクタンス部分（一般に $dQ/df < 0$ ）によって決定されることが多いとされている。(c) 回転機についての周波数依存度は、有効電力については安定化、無効電力については不安定化であるが、全体として安定化の傾向にある⁽⁹⁾。

(3) 安定性に対する電圧と周波数との影響を比べると、前述のように電圧の影響の方が格段に大きい。

次に、本例で外乱としてとりあげた、1線接地故障（短絡、2線接地なども同じ）において、電圧、周波数の変動の様相と上記(1)～(3)の諸性質および表2の同種負荷の指数（微係数）などを併せ考えると、

(1) 電圧特性考慮による安定性減少の傾向が著しいのは誘導機、家庭用小形モータ、static コンバータなどであり放電灯がこれに次ぎ、

(2) 周波数特性考慮による安定性増加の傾向をもつものは誘導機、家庭用小形モータ（特に、誘導機であるが、これも大きな値ではない）であり、他の同種

負荷は不変または有効分、無効分略々相殺 (static コンバータは若干減小) などが考えられる。

従って、上記の諸様相と表 3、表 4 から導出される各負荷地域における同種負荷の % 構成とを併せ考えることによって、上記数値例の検討結果の各項を理論づけることができる。例えば、冬期の様相の理由は

(1) 各負荷地域に対する安定性について 工業地区においては誘導機、static コンバータの % が多く熱負荷が少ない。商業地区では、住宅、農業地区に比べ放電灯、誘導機、家庭用小形モータなどの総 % が多く、熱負荷が比較的少ない。従って、安定条件は主工業地域が最もか酷になり、以下主商業 (≒混在)、主住宅 (≒主農業) 地域の順に安定性が良くなる。

(2) 判別処理方式について 主工業、混在地域においては dynamic load (電圧の影響による安定性低下大きく、周波数の影響によって変動する、一般に若干の増加) の % が多く、主商業、主住宅、主農業地域において static load (電圧の影響による安定性の低下小、周波数の影響も極めて小さい) の % が多い。従って主工業、混在などの場合は 4 段階に、主商業、主農業などは 3 段階に分かれる。

(3) 系統負荷状態について 軽負荷の場合は、系統の動揺が小さく、重負荷の場合は動揺が非常に大きく直ちに極限状態に至るため、ともに地域負荷の特性およびその % 構成の入り込む余地が少ない。なお、影響の大きい中間負荷において、各負荷地域の安定性にかんがりの差があるのは、地域負荷の dynamic load と static load の % 構成の相違によるものである。

また、夏期において、主商業、主住宅地域の安定条件が最もか酷であるのは、電圧特性考慮による安定性減少の性質をもつ誘導機、家庭用小形モータ、放電灯などの総 % は各地域とも 60~70% で大差はないが、周波数考慮による安定化傾向の比較的大きい誘導機が主工業、主農業地域において多いからである。他の各項についても、同様な方法で理論づけることができる。

6. む す び

電力系統の動態安定度を解析するに当って、その対象となる重要な事項の一つに系統負荷の実態調査に則した負荷のモデル化とその安定度に与える影響があげられる。本文は、この問題を解明する一助として、系統負荷の構成要素である同種負荷の電圧、周波数特性および系統の各負荷地域における同種負荷の % 構成について検討し、これらの動態安定度に及ぼす影響について考察した。本論で得られた結果の概要は、まえがきに摘記したので略する。

なお、数値例として 1 線接地をとりあげたが、他のタイプの外乱、例えば、線間短絡、2 線接地など大部分の故障の場合も各要素の変動の様相および安定性に関する挙動は本例と同様な傾向をもち、かつ、1 線接地に比べ、これらの故障による現象の熾烈さを考えるとその影響も大きく現われてくることが類推される。

次に、本解析法の現有系統への適用であるが、本 3 機系の計算時間およびメモリは 10 秒、80 KB であった。これから類推して⁽¹³⁾、東大の大型ジョブは 60 分、7 MB であるので、誤差の小さい範囲での系統縮約を行えば、現有計算能力で十分処理できる。

本研究にあたって、種々御指導を賜った電力中央研究所常務理事 梅津裕照博士、早稲田大学 田村康男教授、新エネルギー総合開発機構太陽技術開発室長 堀米孝博士、東洋大学 日高一彦教授に深く感謝を表するとともに、計算に御協力を載いた、本学研究室 清水浩子氏、東大計算機室および本学計算機室の各位に感謝します。

(昭和 59 年 6 月 18 日受付、同 60 年 2 月 16 日再受付)

文 献

- (1) C. Concordia: "Representation of Loads" *IEEE Special Publication* 75-CHO-970-4-PWR pp. 41, PES, Winter Meeting, New York, Jan. (1975)
- (2) G. R. Quan, et al.: "Load Representation for Transient Stability Studies Digital Modeling" *IEEE Paper* A 75-583-5, PES, Summer Meeting, San Francisco, July. (1975)
- (3) S. Sinha, et al.: "Dynamic Models for Power System Load" *IEEE PES Winter Meeting and Tesla Symposium*, New York, Jan. (1976)
- (4) K. Hotrabhavananda: "Power System Stability Study with Dynamic Load" *University of Missouri-Columbia, Dissertation*, August (1975)
- (5) C. T. Nguyen, et al.: "Determination of Power System Load Characteristics Using a Real-Time Digital Data Acquisition System" *CIGRE 1978 General Session*
- (6) G. Shackshaft, et al.: "The Influence of Load Characteristics on Power System Performance-AC, E.G.B. Viewpoint" *Proc Int Conf Large High Voltage Electr Syst.* (1978)
- (7) C. T. Nguyen: "On-Line Load Behaviour Modelling Natural Variation" *IEEE PES Winter Meeting*, New York, Jan. 29~Feb. 3 (1978)
- (8) M. S. Chen, et al.: "Determinating the Static and Dynamic Characteristics of Power System Load" *Proc Int Conf Large High Voltage Electr Syst* (1978)
- (9) R. A. Gawler, et al.: "Load Modelling for Electrical Power System Studies" *Preper Pap Aust Conf Contral Eng* (1979)
- (10) 関根, 他: 「最近における電力系統解析技術」電学誌, 100, 1, 1 (昭 55-1)
- (11) 電気協同研究会: 「電力系統の安定度」電気協同研究, 34, 5 (昭 53-1)
- (12) 阿久津, 他: 「動態安定度における AVR の最適利得」電学論 B, 102, 1, 1 (昭 57-1)
- (13) 阿久津, 他: 「系統負荷の電圧特性面からみた動的過渡安定度」電学論 B, 98, 10, 815 (昭 53-10)
- (14) 阿久津: 「系統の負荷特性を考慮した動的過渡安定度」電学誌, 86, 11, 1883 (昭 41-11)
- (15) 関根, 他: 「電力システム技術の新しい動向」電学誌, 104, 11, 937 (昭 59-11)