UDC 621.311.1.016.352:621.316.72

論文

57-B80

電力系統の緊急制御におけるエネルギー法に基づいた制御量決定アルゴリズム

正員 西田 正 吾 (三菱電機)

正員 武田 捷 一 (三菱電機)

1. ま え が き

電力系統は、近年、電源の遠隔化・大容量化や負荷の偏在が進み、そのふるまいも複雑化しつつある。そのため、系統の安定度上の問題も、その影響が局所的にとどまらず、全系に波及する恐れがあり、事故発生後、早期に適切な処置をして、全系への波及を防止する必要がある。

この系統の安定化対策としては、大きく分けると機器の設置によるものと、系統操作によるものに分類できる。前者は例えばダンピングレジスタ、超速応励磁、中間調相機 etc. を設置するもので、系統の体質を強めて、安定度を強化するものである⁽¹⁾。一方、後者の系統操作によるものは、事故時に電源制限や負荷しゃ断により系統を安定化させるもので、制御の早さと制御量の正確さが要求されることになる。

本論文ではこの後者の緊急制御における制御量の決定、つまり電源制限・負荷しゃ断の量について過渡安定度を維持する立場から決定するアルゴリズムについて述べることにする。本論文でベースにする手法は、エネルギー関数法であり^{(3)~(9)}、ここでは、緊急制御が実施される電力系統固有の性質を用いて、いかに現実的なアルゴリズムが構成できるかという点に重点を置いて、制御量決定のロジックを述べる。なお、電源制限・負荷しゃ断については、従来より電源・負荷のバランスをとって周波数を維持する立場に立つものが多かったが⁽²⁾、過渡安定度が維持されたあとでは、当然このことを考慮する必要がある。つまり、ここでの立場は、まず過渡安定度を維持できる最小限の電源制限・負荷しゃ断で系統の脱調を防ぎ、その後必要なら電源

・負荷バランスをとって、トータルとしての電源負荷しゃ断量を最小にすることを目的としている。

2. エネルギー法に基づいた制御量決定アルゴリズム

〈2.1〉 エネルギー法による安定判別 ここでは、 n 機系について考える。また、事故後 1~2 秒の過渡安定度を問題にしているので、発電機モデルは、 x_d' 背後電圧一定、機械入力一定とする。このとき、各発電機の運動方程式は、慣性定数を M_i 、 x_d' 背後アングルを δ_i 、機械入力を P_{Mi} 、電気出力を P_{ei} ($i=1\sim n$) とすると、

$$M_i \ddot{\delta}_i = P_{Mi} - P_{ei} \quad (i=1\sim n) \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで、発電機の脱調は、発電機間の相対関係で決まるので、同期平衡の立場で、エネルギー関数 V を作ると、

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \dot{\theta}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_{Mi} (\theta_i - \theta_{is}) + \sum_{i=1}^n \int_{\theta_{is}}^{\theta_i} P_{ei} d\theta_i \dots\dots\dots (2)$$

となる。但し、

$$M_T \triangleq \sum_{i=1}^n M_i \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta_o \triangleq \left(\sum_{i=1}^n M_i \delta_i \right) / M_T \dots\dots\dots (4)$$

$$\theta_i \triangleq \delta_i - \delta_o \dots\dots\dots (5)$$

である。なお、(2)式において、 θ_{is} ($i=1\sim n$) は安定平衡点のアングルを表す。また不安定平衡点のアングルを θ_{ic} ($i=1\sim n$) とすると、不安定平衡点のポテンシャルを V_c として、

$$V_c = - \sum_{i=1}^n P_{Mi} (\theta_{ic} - \theta_{is}) + \sum_{i=1}^n \int_{\theta_{is}}^{\theta_{ic}} P_{ei} d\theta_i \dots\dots\dots (6)$$

となる。そこで、事故クリア後のエネルギー V と V_c との大小関係により、

A Method to Construct a Control Strategy in Emergency Control of Power Systems on the Bases of Energy Function. By Shogo Nishida, Member & Shoichi Takeda, Member (Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation).

西田正吾：正員，三菱電機株式会社中央研究所
武田捷一：正員，三菱電機株式会社中央研究所

$$V > V_c \rightarrow \text{不安定} \dots\dots\dots (7)$$

$$V \leq V_c \rightarrow \text{安定} \dots\dots\dots (8)$$

の形で安定判別が可能となる。

ここで、 V_c の決め方については、次節で改めて検討することにし、(2)式の V について考察する。この V は、事故クリア時のエネルギーを示すのであるが、今、各発電機の事故中の電気出力を P_{fi} ($i=1 \sim n$) とし、事故時間 t_f の間は一定と考える。これは、実際の系統では主保護クリアの場合、事故時間は 70 ~ 100ms であり、この間、電気出力はほぼ一定になるという事実に基づいている。すると(1)式より、事故クリア時の $\dot{\delta}$ は

$$\dot{\delta}_i = (P_{Mi} - P_{fi}) t_f / M_i \dots\dots\dots (9)$$

となる。また(2)式の V の第1項は、(3)(4)式を用いて

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \dot{\delta}_i^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\dot{\delta}_i - \dot{\delta}_0)^2 \dots\dots (10)$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \dot{\delta}_i^2 - \frac{1}{2} M_T \dot{\delta}_0^2 \dots\dots\dots (11)$$

となる。故に、(9)式の関係を用いると

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \dot{\delta}_i^2 &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} t_f^2 \frac{(P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i} \\ &\quad - \frac{1}{2} t_f^2 \left\{ \sum_{i=1}^n (P_{Mi} - P_{fi}) \right\}^2 \dots\dots (12) \\ &\quad M_T \end{aligned}$$

が得られる⁽⁹⁾。一方、(2)式の V の第2項、第3項は、rotor ポテンシャルエネルギーと系統に蓄えられるエネルギーを表わすが、一般には事故時間 t_f が上述したように短いため、事故中に動くアングルはかなり小さい。

そのため、(2)式の第2項、第3項の値も小さくなり第1項と比較すると、ほとんど無視できる程度となる。更に、事故中に動くアングルの大きさと、事故クリア後に1回線が開放されることによる安定平衡点の移動とが、互いに打ち消しあって、等価的に事故中のアングルの動きを小さくすることもこのことに寄与していると考えられる。なお、このことは、第4章の例題において改めて定量的に示すことにする。そこで、

$$\begin{aligned} V &\doteq \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \dot{\delta}_i^2 \\ &= \frac{1}{2} t_f^2 \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{(P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i} - \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n (P_{Mi} - P_{fi}) \right\}^2}{M_T} \right\} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

と近似でき、

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} t_f^2 \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{(P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i} - \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n (P_{Mi} - P_{fi}) \right\}^2}{M_T} \right\} \\ &> V_c \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

なら不安定、不等号の向きが逆なら安定と判別できる。次に(14)式の評価にあって、次のような性質を持つことが証明できる。(証明は付録)

「発電機のうち、事故中の加速が同じもの、つまり、 $(P_{Mi} - P_{fi})/M_i$ が等しいもの ($i=1 \sim m$) に対してはこれを等価な1機の発電機とみなして、 $M = \sum_{i=1}^m M_i$ 、

$P_M = \sum_{i=1}^m P_{Mi}$ 、 $P_f = \sum_{i=1}^m P_{fi}$ とおくことができる。」

このことは、(14)式を評価するにあたって、あらかじめ事故中の加速がグループ分けできる時には、発電機数をかなり減らして考えることが可能であることを示しており、実用上は便利な性質であるといえる。これについては、第4章の例題で具体的に示す。

〈2・2〉 V_c の決定について V_c については、式の上では(6)式のように表現できるが、実際には V_c の値を決定する要素としては次のようなものがある。

〔1〕 事故前の系統状態……送電線の使用状態、発電機の並列台数、潮流状態など。

〔2〕 事故クリア時に開放される送電線……どの送電線が開放されるかにより、事故後の状態がかわるため、

〔3〕 負荷特性……負荷特性としては、定インピーダンス特性、定電流特性、定電力特性などが考えられ V_c の値はこれらの影響をうける。

〔4〕 脱調モード……系統につながっている発電機群が、どのようなグループに分かれて脱調するかというところで、脱調モードが異なると、それに対応する不安定平衡点も異なるので、 V_c の値もかわることになる。

以下では、〔1〕～〔4〕の要素が確定している場合に V_c を求める簡便な方法について述べる。〈2・1〉節で述べた n 機系を考え、㉠グループ (発電機 1 ~ m) と㉡グループ (発電機 $m+1 \sim n$) に分かれる脱調モードが問題になっているものとする。このとき、各発電機の $x_{a'}$ 背後の初期アングルを δ_{i0} ($i=1 \sim n$) とすると、㉠グループと㉡グループに分離することがわかっているため、

$$\delta_i = \delta_{i0} + \delta_a \quad (i=1 \sim m) \dots\dots\dots (15)$$

$$\delta_i = \delta_{i0} + \delta_b \quad (i=m+1 \sim n) \dots\dots\dots (16)$$

と書き表わせる。これを(1)式に代入すると、

$$M_i \ddot{\delta}_a = P_{Mi} - P_{ei} \quad (i=1 \sim m) \dots\dots\dots (17)$$

$$M_i \ddot{\delta}_b = P_{Mi} - P_{ei} \quad (i=m+1 \sim n) \dots\dots (18)$$

となる。故に、

$$\left. \begin{aligned} M_a &= \sum_{i=1}^m M_i, P_{Ma} = \sum_{i=1}^m P_{Mi}, P_{ea} = \sum_{i=1}^m P_{ei} \\ M_b &= \sum_{i=m+1}^n M_i, P_{Mb} = \sum_{i=m+1}^n P_{Mi}, \\ P_{eb} &= \sum_{i=m+1}^n P_{ei} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

とおくと、

$$M_a \ddot{\delta}_a = P_{Ma} - P_{ea} \dots\dots\dots (20)$$

$$M_b \ddot{\delta}_b = P_{Mb} - P_{eb} \dots\dots\dots (21)$$

となる。これより、

$$\frac{P_{Ma} - P_{ea}}{M_a} = \frac{P_{Mb} - P_{eb}}{M_b} \dots\dots\dots (22)$$

となる $\delta_a - \delta_b$ を求めることにより、安定平衡点に対応する $(\delta_a - \delta_b)_s$ と不安定平衡点に対応する $(\delta_a - \delta_b)_c$ が求まる。具体的には、負荷が非線形の場合まで考慮するため、 n 機の発電機のアングルをそれぞれ $\delta_{i0} + \delta_a (i=1 \sim m)$, $\delta_{i0} + \delta_b (i=m+1 \sim n)$ とし、 $\delta_a - \delta_b$ を変化させたときの潮流計算を繰返し行ない、各発電機の電気出力 $P_{ei} (i=1 \sim n)$ を求める(このとき、事故クリア時に開放される送電線は、開放した状態で潮流計算を行なう。この潮流計算は、発電機ノードは、すべて V, θ 指定、負荷ノードは P, Q の V に対する特性のみが与えられる形となるが、通常の Newton Raphson 法で解くことができる)。そして、(19)式のように、各グループごとの和をとって P_{ea}, P_{eb} を計算し、 $\delta_a - \delta_b$ と P_{eb} の関係を図1のような形で求める。この図1より(22)式を満たす $(\delta_a - \delta_b)_s, (\delta_a - \delta_b)_c$ が求まり、(3)~(5)式より安定平衡点 θ_{as}, θ_{bs} は、

$$\theta_{as} = \frac{M_b(\delta_a - \delta_b)_s}{M_a + M_b}, \quad \theta_{bs} = \frac{-M_a(\delta_a - \delta_b)_s}{M_a + M_b} \dots\dots\dots (23)$$

また、不安定平衡点 θ_{ac}, θ_{bc} は、

$$\theta_{ac} = \frac{M_b(\delta_a - \delta_b)_c}{M_a + M_b}, \quad \theta_{bc} = \frac{-M_a(\delta_a - \delta_b)_c}{M_a + M_b} \dots\dots\dots (24)$$

となる。故に、 V_c は(6)式より、

$$\begin{aligned} V_c &= -P_{Ma}(\theta_{as} - \theta_{ac}) - P_{Mb}(\theta_{bs} - \theta_{bc}) \\ &\quad + \frac{M_b}{M_a + M_b} \int_{(\delta_a - \delta_b)_s}^{(\delta_a - \delta_b)_c} P_{ea} d(\delta_a - \delta_b) \\ &\quad - \frac{M_a}{M_a + M_b} \int_{(\delta_a - \delta_b)_s}^{(\delta_a - \delta_b)_c} P_{eb} d(\delta_a - \delta_b) \end{aligned} \dots\dots\dots (25)$$

となる。(25)式の積分は、図1の $\delta_a - \delta_b$ と P_{ea}, P_{eb} の関係を示すカーブより、数値積分ができるので、 V_c

図1 $\delta_a - \delta_b$ と P_{ea}, P_{eb} の関係

Fig. 1. Relations between $\delta_a - \delta_b$ and P_{ea}, P_{eb} .

が求まることになる。このようにして、(1)~(4)の要素が確定したときには、 V_c が求まるが、現実の系統では必ずしも(1)~(4)が確定しているとは限らない。これについては、第3章の応用に関する部分で、改めて述べることにする。

〈2.3〉 電源制限における制御量決定アルゴリズム

〈2.1〉節で述べたように、

$$\frac{1}{2} t_f^2 \left[\sum_{i=1}^n \frac{(P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i} - \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n (P_{Mi} - P_{fi}) \right\}^2}{M_T} \right] > V_c \dots\dots\dots (26)$$

のときに、系統は不安定となり脱調する。但し、〈2.2〉節で述べた(1)~(4)の要素は確定しており、 V_c は(25)式のような形で求まるものとする。ここで、この脱調を防ぐため、相対的に加速する発電機の一部をしゃ断して安定化することを考える。このとき、加速発電機の一部しゃ断により、各発電機の慣性定数および機械入力 $M_i, P_{Mi} (i=1 \sim n)$ から M_i', P_{Mi}' になったとする(但し、しゃ断が行なわれないものは $M_i' = M_i, P_{Mi}' = P_{Mi}$ である)。

また、加速発電機の一部しゃ断が事故クリアと同時にに行なわれたものとする。しゃ断後のエネルギー V' は、(11)式より、

$$V' = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i' \dot{\delta}_i^2 - \frac{1}{2} M_T' \dot{\delta}_0^2 \dots\dots\dots (27)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} t_f^2 \left[\sum_{i=1}^n \frac{M_i' (P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i'^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n (P_{Mi} - P_{fi}) \frac{M_i'}{M_i} \right\}^2}{M_T'} \right] \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

となる。但し(28)式は、 $\dot{\delta}_i$ は発電機の周波数であるため瞬時には変わらず、また、(4)式で定義される $\dot{\delta}_0$ は各発電機の周波数の慣性定数による加重平均であるため、一部しゃ断により変化する性質を用いている。なお、 $M_T' = \sum_{i=1}^n M_i'$ である。(28)式においても、〈2.1〉節で扱ったように、事故中に動くアングルが小さいため、事故クリア時のポテンシャルの項は、運動エネルギーの項に比べて十分に小さいという近似を用いている。また、加速発電機の一部しゃ断が、事故クリアよ

り遅れて行なわれる場合も、その間のアングルの動きが十分に小さい場合は、やはり(28)式により、エネルギーを評価することが可能となる。

一方、 V_c は、発電機の容量が変化するため、(19)式の M_a, M_b, P_{Ma}, P_{Mb} が変化し、また(22)式より求める $(\delta_a - \delta_b)_s, (\delta_a - \delta_b)_c$ も変化するため、(25)式の V_c も別の値になる。これを区別するため、一部しゃ断後の V_c を V_c' とすると、一部しゃ断後の安定・不安定は、

$$\frac{1}{2} t_f^2 \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{M_i' (P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i^2} \right. \\ \left. \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n (P_{Mi} - P_{fi}) \frac{M_i'}{M_i} \right\}^2}{M_T'} \right\} > V_c' \dots\dots (29)$$

で判定でき、(29)式の不等号が成立するとき不安定となる。そこで、何段階かのしゃ断量とそれに対応した V_c' の値を、あらかじめ計算しておく、事故中の各発電機の電気出力 $P_{fi} (i=1 \sim n)$ がわかれば各段階に対応して(29)式が計算でき、(29)式の不等号が成立しなくなるしゃ断量が、安定化するために必要なしゃ断量ということになる。

このことを直観的に示すため、 $n=2$ の場合を考え、発電機1側を電源制限するものとする。このとき、

$$X_1 = P_{M1} - P_{f1}, X_2 = P_{M2} - P_{f2} \dots\dots (30)$$

とおくと、(26)式は、

$$\frac{1}{2} t_f^2 \frac{(M_2 X_1 - M_1 X_2)^2}{M_1 M_2 (M_1 + M_2)} > V_c \dots\dots (31)$$

となる。そこで、 $M_2' = M_2$ とし、 $M_1' < M_1$ となる電源制限を発電機1について考えると、

$$\frac{1}{2} t_f^2 \frac{M_1' (M_2 X_1 - M_1 X_2)^2}{M_1'^2 M_2 (M_1' + M_2)} > V_c' \dots\dots (32)$$

が一部しゃ断後の不安定領域となる。(31)、(32)式は、直線を示し、また $V_c' > V_c$ となるため、図2のようなになる。図2において直線 A、B は、それぞれ(31)、(32)式に対応し、①～③の領域は、

- ①……電源制限なしで安定
- ②…… $M_1 \rightarrow M_1'$ に電源制限すると安定
- ③…… $M_1 \rightarrow M_1'$ に電源制限しても不安定

ということになる。この図2のようなカーブをあらかじめ作成しておけば、 X_1 と X_2 、つまり事故中の電気出力 P_{f1} と P_{f2} がわかれば、電源制限の有無や必要量を選択することが可能となる。なお、(26)、(29)式の安定判別カーブが $P_{Mi} - P_{fi} (i=1 \sim n)$ に対して直線となるのは、 $n=2$ のときのみであり、 $n \geq 3$ では、二次曲面となる。

図2 電源制限における制御量決定カーブの例
Fig. 2. An example of control curves for generation shedding.

図3 負荷しゃ断における制御量決定カーブの例

Fig. 3. An example of control curves for load shedding.

〈2.4〉 負荷しゃ断における制御量決定アルゴリズム

△ 〈2.3〉節では、相対的に加速する発電機をしゃ断して、安定化することを考えたが、逆に相対的に減速する発電機の至近端負荷をしゃ断して安定化することも考えられる。この場合には、エネルギー V は変化せず、 V_c のみが増加して V_c' になる。故に、負荷しゃ断後の安定・不安定は、

$$\frac{1}{2} t_f^2 \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{(P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i} - \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n (P_{Mi} - P_{fi}) \right\}^2}{M_T} \right\} > V_c' \dots\dots (33)$$

で判定でき、(33)式の不等号が成立するとき、不安定となる。そのため、何段階かの負荷しゃ断と、それに対応した V_c' の値を、あらかじめ計算しておけば、事故中の各発電機の電気出力 $P_{fi} (i=1 \sim n)$ より、安定化するのに必要な負荷しゃ断量が選択できる。例として、 $n=2$ の場合を考え、減速側発電機の至近端負荷のしゃ断を考えると、 X_1, X_2 を(30)式のようにおけば、前節と同様にして図3のような制御量決定カーブが得られる。ここで、①～③は、それぞれ

- ①……負荷しゃ断なしで安定
- ②……負荷しゃ断をすると安定
- ③……負荷しゃ断をしても不安定

を示すことになり、事故中出力 P_{f1}, P_{f2} より、必要制御量が選択できる。

3. 制御量決定アルゴリズムの緊急制御への応用

緊急制御とは、電力系統に事故が発生したとき、もし必要な場合には、早期に電源制限・負荷しゃ断などの安定化対策を行なうものである。このとき、前述の

アルゴリズムにより、電源制限・負荷しゃ断の必要制御量を求めることができるが、具体的な使用形態としては応用される系統の状況によって、種々のものが考えられる。但し、どのような形態で使われるにせよ、図4のような形をとることになる。図4のような形を想定した場合、事故検出部としては、例えば、

(A) 事故中の各発電機の電気出力 $P_{fi} (i=1\sim n)$

(B) 事故発生送電線の保護リレー信号

などが考えられ、その場合は、制御量設定は(A)(B)に対応して

(A) 図2、図3のようなカーブを事前に設定しておく。

(B) 事前に、オフライン計算により事故点・事故種別と $P_{fi} (i=1\sim n)$ との関係を求め、図2、図3のようなカーブを用いて必要制御量を決定する。そしてその結果を設定しておく。ことになる。

ここで、〈2・2〉節で述べた V_c を決定する、〔1〕～〔4〕の要因が、実際のシステムで、どのような形で扱われるかについて、以下で議論する。

〔1〕 事故前の系統状態……実現の系統は時々刻々変化していくものであるため、代表的なパターンをいくつか用意しておき、現実の状態が、どのパターンに属するかを、何らかの情報で判定することが必要となる。この情報として、特定のラインの事前潮流・発電機の運転パターンなどを利用するやり方や、または、季節・時間帯によりパターンを設定してしまうやり方などが考えられる。

〔2〕 事故クリア時に開放される送電線……事故発生送電線を区別する情報が使用可能な場合は、開放される送電線ごとに V_c を求めておき、それぞれの正確な値を使用することも可能である。但し、通常の運用状態では、2回線のうち、1回線が開放される場合が多いので、最も影響の大きい送電線（つまり、重潮流で長距離の送電線）が開放されるものと仮定して、 V_c を決め、 V_c は開放される送電線によらないものとして扱うのが实际的であろう。

〔3〕 負荷特性……負荷特性は、過去の事故時の波形や実測データより、推測して決める必要がある。但し、 V_c が負荷特性により、どのように影響を受けるかについては、系統が特定された場合、調べることが可能となる。

〔4〕 脱調モード……一般論としては、 n 機系の場合、脱調モード、つまり発電機の分かれ方の組合せの数は、 2^{n-1} 存在することになる。但し、現実の系統においては、系統を特定すれば、脱調モードの数は、非常に限定され、しかも送電線保護リレーが設置されて

図4 電力系統の緊急制御の概念図

Fig. 4. Schematic diagram of emergency control for power systems.

いることを考えると、実際に問題となる脱調モードはせいぜい一つか二つ位であろう。そのため、脱調モードを特定することは、現実の電力系統の緊急制御を考える場合、必ずしも問題とはならない。

但し、複数の脱調モードが存在し、これらが同時に問題となる場合には、各脱調モードに対応して、別々の制御量判定カーブが得られることになる。この場合には、何らかの情報を用いて、脱調モードを判別するか（脱調モードは、発電機の分かれ方に対応するので事故中の各発電機の電気出力 $P_{fi} (i=1\sim n)$ より予測することなどが考えられる）、または、各制御量判定カーブの $\bar{O}R$ をとって、必ず安定となるように制御するなどの対策が考えられる。

4. 例題

ここでは、〈2・3〉節で述べた電源制限システムにおける制御量決定アルゴリズムを、図5の系統に適用した例を示す。図5の系統は各ライン共2回線より構成されているものとし、図中に各ラインの2回線分のインピーダンス (p.u. 1,000 MVA)、各発電機の出力 (MW) と定格 (MVA) および各負荷の有効電力 (MW)、無効電力 (MVar) を示した。また、発電機の定数は、自己容量ベースで $M=8$ 秒、 $x_d'=0.3$ 、変圧器 $x=0.11$ 、負荷特性は、有効電力は定電流特性、無効電力は定インピーダンス特性としている。ここで、事故として 3 LG、事故時間 $t_f=0.1$ 秒、事故後1回線開放をとり図5の系統のふるまいを調べてみると、G1~G4とG5~G8は、それぞれほぼ同じ動きをし、系統が不安定になる場合も、やはり G1~G4とG5~G8に分かれ、G1~G4が一団となって加速脱調することが事前のシミュレーションよりわかる。そこで、電源制限システムとして、加速脱調するG1~G4のうち、一部をしゃ断して安定化させるシステムを考え、その制御量決定アルゴリズムを定めることを考える。

まず、事故中の $(P_{Mi}-P_{fi})/M_i (i=1\sim 8)$ について調べてみると、G1~G4, G5~G7 については、それぞれほぼ同じ値になっていることが、表1よりわかる。そこで〈2.1〉節で述べたように、事故中のエネルギー計算に関しては、G1~G4, G5~G7 の発電機は慣性定数、機械入力、事故中出力がそれぞれ (M^A, P_M^A, P_f^A) (M^B, P_M^B, P_f^B) の等価発電機におきかえることができる。但し、

$$\left. \begin{aligned} M^A &= \sum_{i=1}^4 M_i, P_M^A = \sum_{i=1}^4 P_{Mi}, P_f^A = \sum_{i=1}^4 P_{fi} \\ M^B &= \sum_{i=5}^7 M_i, P_M^B = \sum_{i=5}^7 P_{Mi}, P_f^B = \sum_{i=5}^7 P_{fi} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

である。このようにおくと、(14)式の安定判別式は、

$$\frac{1}{2} t_f^2 \left\{ \frac{X_A^2}{M^A} + \frac{X_B^2}{M^B} + \frac{X_8^2}{M_8} - \frac{(X_A + X_B + X_8)^2}{M^A + M^B + M_8} \right\} > V_c \quad (35)$$

となる。ここで、

$$\left. \begin{aligned} X_A &= P_M^A - P_f^A \\ X_B &= P_M^B - P_f^B \\ X_8 &= P_{M8} - P_{f8} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

である。次に V_c を求める具体的手順を示す。但し、事故後1回線開放されるラインは④-⑦とする。最初に述べたように図5の系統では、G1~G4 と G5~G8 が、それぞれほぼ同じ動きをするため、〈2.2〉節の(15)、(16)式のように、

$$\left. \begin{aligned} \delta_i &= \delta_{i0} + \delta_a \quad (i=1\sim 4) \\ \delta_i &= \delta_{i0} + \delta_b \quad (i=5\sim 8) \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

と書き表わすことができる。そこで、図5の系統について $P_{ea} = \sum_{i=1}^4 P_{ei}$, $P_{eb} = \sum_{i=5}^8 P_{ei}$ と $\delta_a - \delta_b$ の関係を求めると、図6のようになる ($\delta_a - \delta_b$ は 9° ずつ動かして計算した)。図6より(22)式を満たす $(\delta_a - \delta_b)_s$, $(\delta_a - \delta_b)_c$ が求まり、 $(\delta_a - \delta_b)_s = 4^\circ$, $(\delta_a - \delta_b)_c = 64^\circ$ となる。

よって、(23)~(25)式と図6より、

図5 例 題

Fig. 5. A system for example.

表1 各発電機の $(P_{Mi}-P_{fi})/M_i$ の値
(単位: P. U/S)

Table 1. Values of $(P_{Mi}-P_{fi})/M_i$ for each generator.

発電機 事故点	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
①-③ の中点	0.091	0.091	0.085	0.085	0.004	0.004	0.005	0.003
②-④ の中点	0.086	0.086	0.092	0.092	0.005	0.005	0.005	0.003
③-⑥ の中点	0.075	0.075	0.072	0.072	0.025	0.023	0.023	0.008
④-⑦ お中点	0.088	0.088	0.091	0.091	0.032	0.030	0.032	0.011
⑥-⑨ の中点	0.074	0.074	0.071	0.071	0.085	0.083	0.079	0.018
⑦-⑨ の中点	0.078	0.078	0.078	0.078	0.081	0.084	0.080	0.024

$$V_c = 0.1421$$

が得られる。全く同様に、G1 をしゃ断したときの V_c' , G1 と G3 をしゃ断したときの V_c'' は、

$$V_c' = 0.1902, V_c'' = 0.3884$$

となり (この場合も、事故後1回線開放されるライン④-⑦とした)、それぞれの場合の安定判別式は(29)式より、

$$\frac{1}{2} t_f^2 \left\{ \frac{M^A X_A^2}{(M^A)^2} + \frac{X_B^2}{M^B} + \frac{X_8^2}{M_8} - \frac{(M^A X_A / M^A + X_B + X_8)^2}{M^A + M^B + M_8} \right\} > V_c' \quad (38)$$

$$\frac{1}{2} t_f^2 \left\{ \frac{M^A X_A^2}{(M^A)^2} + \frac{X_B^2}{M^B} + \frac{X_8^2}{M_8} - \frac{(M^A X_A / M^A + X_B + X_8)^2}{M^A + M^B + M_8} \right\} > V_c'' \quad (39)$$

となる。但し、 $M^A = M_2 + M_3 + M_4$, $M^B = M_2 + M_4$ である。ここで、〈2.2〉節で述べた V_c を決定する〔1〕~〔4〕の要因について考えてみると、

〔1〕 事故前の系統状態……図5の状態に固定

〔2〕 事故クリア時に開放される送電線……事故クリア時に開放されるラインにより、 V_c がどのようにかわるかを調べたのが表2である。図5の系統では、④-⑦のラインの1回線開放が一番厳しくなり、かつ他

図6 例題における $\delta_a - \delta_b$ と P_{ea} , P_{eb} の関係

Fig. 6. Relations between $\delta_a - \delta_b$ and P_{ea} , P_{eb} in a system for example.

のラインの1回線開放とあまり大きな差はないので制御量決定アルゴリズムに用いる上では、④-⑦ 1回線開放のときの値を用いれば十分であることがわかる。

〔3〕 負荷特性……有効電力は定電流特性、無効電力は定インピーダンス特性に固定。

〔4〕 脱調モード……G1~G4とG5~G8の分離モードのみが問題となるので、このモードのみを取扱っている。

ということになる。ここで、(35)、(38)、(39)式に、実際の数値を代入し、左辺-右辺を $F_1 \sim F_3$ とおくと、

$$F_1 = 0.0892 X_A^2 + 0.0714 X_B^2 + 0.0196 X_8^2 - 0.0132 (X_A + X_B + X_8)^2 - 0.1421 \dots\dots\dots (40)$$

$$F_2 = 0.0669 X_A^2 + 0.0714 X_B^2 + 0.0196 X_8^2 - 0.0136 (0.75 X_A + X_B + X_8)^2 - 0.1902 \dots\dots\dots (41)$$

$$F_3 = 0.0446 X_A^2 + 0.0714 X_B^2 + 0.0196 X_8^2 - 0.0142 (0.5 X_A + X_B + X_8)^2 - 0.3884 \dots\dots\dots (42)$$

となる。故に、(40)~(42)式を用いて、

$F_1 \leq 0$ ……電源制限なしで安定

$F_1 > 0, F_2 \leq 0$ ……G1 シャ断で安定

$F_1 > 0, F_2 > 0, F_3 \leq 0$ ……G1, G3 シャ断で安定

という判定が可能となる。

例として、図5の系統において、次の3ケースの事故について判定した結果を表3に示す。

〔ケース 1〕 ①-③ の中点で 3LG。0.1秒後1回線開放

表 2 開放されるラインのちがいによる V_c の値の比較

Table 2. Comparison of values of V_c for different open lines.

1回線開放されるライン	V_c の 値
④ - ⑦	0.1421
② - ④	0.1440
① - ③	0.1462
③ - ⑤	0.1465
⑥ - ⑨	0.1488

表 3 各ケースに対する F_1, F_2, F_3 の値
Table 3. Values of F_1, F_2, F_3 for each case.

	X_A	X_B	X_8	F_1	F_2	F_3
ケース 1	1.552	0.105	0.330	0.024	-0.061	-0.299
ケース 2	1.550	0.656	0.302	0.022	-0.058	-0.291
ケース 3	1.366	1.768	1.915	-0.017	-0.072	-0.280

〔ケース 2〕 ④-⑦ の中点で 3LG。0.1秒後1回線開放

〔ケース 3〕 ⑦-⑨ の中点で 3LG。0.1秒後1回線開放

表3には、各事故に対する X_A, X_B, X_8 の値および F_1, F_2, F_3 の値を示す。これより〔ケース 1〕,〔ケース 2〕は、電源制限なしで不安定、G1 シャ断で安定。〔ケース 3〕は電源制限なしで安定ということがわか

図 7 ケース 1 のシミュレーション結果
Fig. 7. Simulation results for Case 1.

図 8 ケース 2 のシミュレーション結果
Fig. 8. Simulation results for Case 2.

図 9 ケース 3 のシミュレーション結果
(電源制限なしの場合)
Fig. 9. Simulation results for Case 3.

表 4 例題における事故クリア時の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの比較

Table 4. Comparison between kinetic energy and potential energy in an example system.

ケース	事故クリア時のポテンシャルエネルギー E_p	事故クリア時の運動エネルギー E_k	E_p/E_k
[ケース 1]	0.0072	0.1661	0.043
[ケース 2]	0.0068	0.1641	0.041
[ケース 3]	0.0021	0.1251	0.017

る。

このことを確認するため、[ケース 1]～[ケース 2]について、電源制限なしの場合と G1 シャ断の場合のシミュレーション結果を図 7～図 9 に示す（但し、[ケース 3] は電源制限なしの場合のみ）。図 7～図 9 は、G8 のアングルを基準して測った G2, G4, G6, G7 の相対アングルおよび G2, G7, G8 の周波数の時間変化を示しており、 $F_1 \sim F_3$ により判定した結果と一致している。

このように、(40)～(42)式の判定式によって、図 5 の系統の電源制限による安定化の制御量決定が可能であることが確認できる。なお、第 1 章で述べた、(2)式の第 1 項の運動エネルギーの項と第 2 項、第 3 項のポテンシャルエネルギーの項を、この例題の [ケース 1]～[ケース 3] について比較してみると表 4 のようになり、実用上無視できることが確認できる。

5. あとがき

本論文では、電力系統の緊急制御における電源制限や負荷シャ断の制御量決定アルゴリズムとして、エネルギー法に基づいた方式を提案し、この方式により制御量が決定できることを、例題により確認した。ここで述べた制御量決定アルゴリズムは、種々の応用が可能であり、例えばセキュリティ監視において、想定事故に対する安定・不安定の判別を行なう際に使用することも可能である。

(昭和 56 年 9 月 22 日受付、同 57 年 3 月 19 日再受付)

文 献

- (1) 電気協同研究、第 34 巻第 5 号、電力系統の安定度 (昭 54-1)
- (2) 電力中央研究所報告、委員会報告: 178001、事故波及防止方式 (昭 54-7)
- (3) P. D. Aylett: "The Energy-integral Criterion of Transient Stability limits of Power Systems", *Proc. Inst. Elect. Engrs*, **105**, pp. 527 (1958)
- (4) A. H. El-Abiad, et al: "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* **PAS-85**, No. 2, pp. 159 (1966)
- (5) J. L. Willems, et al: "The Application of Lyapunov Methods to the Computation of Transient Stability Re-

geons for Multimachine Power Systems" *ibid.* **PAS-89**, No. 5/6, pp. 795 (1970)

- (6) F. S. Prabakara, et al: "A Simplified Determination of Transient Stability Regions for Lyapunov Methods", *ibid.* **PAS-94**, No. 3/4, pp. 672 (1975)
- (7) T. Athay, et al: "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability", *IEEE PES Winter Meeting F 78*, 251-1 (1978)
- (8) T. Athay, et al: "Transient Energy Stability Analysis", *Engineering Foundation Conference-System Engineering for Power*, Henniker (1977)
- (9) M. Sato: "A Pattern Recognition Approach For Transient Security Assessment", *Purdue University Report TR-EE 79-9*, PCTR 77-79, Dec. (1978)

付 録

1. $(P_{Mi} - P_{fi})/M_i (i=1 \sim n)$ のうち、 $i=1 \sim m$ が等しいとする。すると、

$$\frac{P_{M1} - P_{f1}}{M_1} = \dots = \frac{P_{Mm} - P_{fm}}{M_m} = \frac{\sum_{i=1}^m (P_{Mi} - P_{fi})}{\sum_{i=1}^m M_i} \quad \dots\dots\dots (付 1)$$

とおくことができる。ここで、(12)式を

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \dot{\theta}_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} t_f^2 \frac{(P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i} + \sum_{i=m+1}^n \frac{1}{2} t_f^2 \\ & \times \frac{(P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i} - \frac{1}{2} t_f^2 \\ & \times \left\{ \left(\sum_{i=1}^m P_{Mi} - \sum_{i=1}^m P_{fi} \right) + \sum_{i=m+1}^n \right. \\ & \left. \times \frac{(P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i} \right\} \dots\dots\dots (付 2) \end{aligned}$$

に分けると、(付 2)式の第 1 項は(付 1)式の関係より

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} t_f^2 \frac{(P_{Mi} - P_{fi})^2}{M_i} \\ &= \frac{1}{2} t_f^2 \frac{\left(\sum_{i=1}^m P_{Mi} - \sum_{i=1}^m P_{fi} \right)^2}{\sum_{i=1}^m M_i} \dots\dots\dots (付 3) \end{aligned}$$

となる。故に本文のようなことが言える。

*

*