電力系統の過渡安定度解析のための故障計算手法

正 員 田 中 和 幸 (九州工大・電力中研)

正 員 浅 田 実 (電力中研)

Fault Calculation Method for Transient Stability Study of Electric Power System

Kazuyuki Tanaka, Member (Kyushu Institute of Technology, CRIEPI), Minoru Asada, Member (CRIEPI)

As concerns faults analysis in transient stability study, balanced fault condition such as 3-lines grounded has been adapted for long time in Japan. So transient stability software calculating only balanced fault has been utilized. However, with the advance of system protective control technologies such as multi-phase reclosing system for faulted transmission line, the stability software are needed which enable to calculate unbalanced faults including multiple faults conditions.

This report presents the newly developed calculation method of system faults which enable to calculate unbalanced single or multiple faults with the addition of balanced faults, and the validity of presented method was shown through the comparison to the results of test simulator. Moreover the report describes how transient stability limits are different for various faults conditions.

キーワード：過渡安定度解析，故障計算，対称座標法

1. ま え が き

我が国では、長距離・大電力の輸送を担う基幹電力系統のほとんどが架空送電線で構成されている。これらの送電線は地理的に大きな広がりを持ち、また空間的に無防備な状態にさらされているため、雷を主とする外部からの影響（系統外乱）を受ける危険が避けられない。この系統外乱は、一般に送電線への地絡故障として多く現れ、その対処いかんは供給支障と密接な関係がある。従って、電力系統の拡充計画や運用計画にあたっては、ある一定の厳しさまでの系統外乱を受けても供給支障を生じないような設備構成や運用の指針が設定されている。指針の対象となる系統外乱の基準は、一般に想定故障条件と呼ばれている。

この指針は設備増強や潮流調整などの対策として具体化され、その際の技術的要因に潮流過負荷や定態安定度、過渡安定度、電圧安定度などがあることはよく知られている。これらのなかで、広域な連系により大規模系統を構成している我が国においては過渡安定度

が最大のネックの一つとなっている。

従来、過渡安定度解析における想定故障条件の多くは送電線の三相地絡故障/三相主保護遮断 (3LG/3LO) である⁽¹⁾。しかし表1に示すように、我が国の超高圧基幹系統における最近の故障実績は一相地絡故障 (1LG) が総故障数の大半を占め、一方で2回線にまたがる同時故障の発生頻度が無視しえない状況にあるなど、故障実態と想定故障レベルとの乖離が見受けられる。

また、最近の超高圧基幹送電線の多くは、地域的に方式の差異はあるものの、故障送電線の高速復旧を目的とした単相ないしは2回線にまたがる多相再開路方式の採用により、供給信頼度の向上が図られている。こうしたことから、より効率的な系統計画・運用の実現のため、あるいはまた関連業務における検討精度のいっそうの向上のため、過渡安定度解析で想定する故障条件について従来の3LG/3LOといった平衡故障に加えて、実態をより反映した各種の不平衡故障条件の設定が必要となっている。

安定度解析への適用を目的とした故障計算手法としては最近、相座標法⁽²⁾のような新しい手法も提案されてはいるが、教育の場や電気事業などの実務では長年、対称座標法⁽⁴⁾が広く用いられており、従って本論文でも対称座標法に基づく故障計算を対象とする。

従来、故障計算は電力系統保護の分野において、地絡・短絡・断線の単純故障のほか、2異地点での同時地絡（多重地絡故障）や断線を伴う地絡などの多重故障について、ノードインピーダンス行列（以下、Z行列と呼ぶ）を用いた計算手法が開発されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、大規模電力系統の過渡安定度解析への適用を前提とし、送電線の多相再閉路シミュレーションなどに必要な2異地点での同時断線計算を含む多種多様な故障計算手法が開発・実用化された例はこれまで見当たらない。なお、安定度解析では、この断線計算の多くが故障送電線の開放遮断を目的として使用される。

この断線計算が多く用いられてこなかった理由として、特に不平衡断線故障に関する従来の計算方法が、今日定着しているノードアドミタンス行列（以下、Y行列と呼ぶ）ベースでの過渡安定度解析には不向きなことが指摘できる。

従来の不平衡断線計算では、いったん各対称分回路の断線点を開放する必要がある。断線点の開放は断線点ノードの追加を意味するが、これをY行列ベースで行う場合、次数の増加に伴いノードの順序付けや三角化行列への分解など多くの再計算を必要とする。その結果、全体のプログラム構成や計算効率の大きな悪化をまねくことになる（ちなみに、計算のベースがZ行列であれば次数の変更は容易。しかし大規模系統への適用は困難）。特に過渡安定度解析では、計算の時間軸に沿って故障様相が様々に移り変わり得る、すな

わちY行列の再計算が頻繁に生じることが前提となることを考えれば、Y行列ベースでの計算の困難さが推察される。

本論文では、大規模電力系統の過渡安定度解析への適用を前提として、従来手法の延長ではその適用が困難な断線計算を含む故障計算の新しい定式化と、それに基づく効率的な計算法を提案する。また、モデル実験による提案手法の精度検証、更に各種の事故様相と過渡安定度限界との関係について考察する。

次章では、まず安定度解析における故障計算の概要と、提案する故障計算手法について述べる。

2. 故障計算手法

本章では、対称座標法に基づく単純・多重故障計算の新しい計算手法を提案する。

対象とする故障は、表2に示す48の故障種類である。以下では、この48種類の故障の計算が、わずか9種類の統一された計算式の下で効率的に行い得ることを示す。

提案する故障計算は過渡安定度解析中の系統計算と密接なかわりがあるため、まず次節で過渡時の系統計算について触れる。

〈2・1〉 過渡時系統計算と故障計算 過渡安定度解析を数値積分により行う場合、積分刻み時間の断面

表 2 取扱う故障条件の範囲
Table 2. Classification of system faults.

	取り扱う故障条件	提案手法に基づく故障の分類
単純故障	1 LG, 1 LO, 1 LA	1 L
	2 LG, 2 LO, 2 LA	2 L
	3 LG, 3 LO, 3 LA	3 L
多重故障	1 LG, 1 LG 1 LO, 1 LO 1 LA, 1 LA	1 L — 1 L
	1 LG, 2 LG 1 LO, 2 LO 1 LA, 2 LA	1 L — 2 L
	1 LG, 3 LG 1 LO, 3 LO 1 LA, 3 LA	1 L — 3 L
	2 LG, 2 LG 2 LO, 2 LO 2 LA, 2 LA	2 L — 2 L
故障	2 LG, 3 LG 2 LO, 3 LO 2 LA, 3 LA	2 L — 3 L
	3 LG, 3 LG 3 LO, 3 LO 3 LA, 3 LA	3 L — 3 L
計	48 種類	9 種類

表 1 187 kV 以上の2回線送電線の雷事故実績⁽³⁾ (1980年4月～1985年3月, 電力10社)
Table 1. The record of lightning faults on double circuits over 187 kV.

故障様相		雷事故	
相数	地絡数	件数	割合 (%)
1 φ	1 LG	481	72.8
	2 LG	35	5.3
2 φ	2 LG	(8) 66	10.0
	3 LG	21	3.2
	4 LG	14	2.1
3 φ	3 LG	(1) 20	3.0
	4 LG	8	1.2
	5 LG	7	1.1
	6 LG	9	1.4
合計		661	100.0

(注) () 内は2回線にまたがる事故件数

(注) G: 地絡, O: 線路開放, A: SrC 短絡

ごとに系統のノード電圧やブランチ電流を計算することが必要となる。本論文では、この計算を過渡時系統計算と呼ぶ。通常、過渡時系統計算は負荷特性や後述の系統故障計算を含み、また発電機の動揺方程式から導かれるノードへの注入電流を計算条件とする理由などから、一般の潮流計算と異なり次式のような Y 行列ベースでの計算となる。

$$i_1 = \dot{Y}^{(1)} \dot{V}_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、添字1：正相分、 $\dot{Y}^{(1)}$ ：正相 Y 行列、 i_1 ：ノードの注入電流ベクトル、 $\dot{V}_1$ ：ノード電圧ベクトル（いずれの変数も複素数）

(1)式で、 $\dot{Y}^{(1)}$ と i_1 を既知としてノード電圧 $\dot{V}_1$ を計算することがその時間断面における系統計算である。 i_1 の各要素は、例えば系統負荷がすべて定インピーダンス特性（消費電力が電圧の2乗に比例）モデルでかつ故障がない場合は、ベクトル i_1 の発電機ノードに対応する位置だけに注入電流が設定され、その他はすべてゼロ値という特徴を有する。もし、過渡安定度の数値積分法として四次のルンゲクッタ法を用いるならば、積分刻み時間だけ計算を進めるために(1)式の計算が最小限4回は必要となる。

なお、(1)式による $\dot{V}_1$ の求解には、今日ではもっぱら Y 行列の疎性に着目した効率的な方法（三角化行列への分解手順による方法）が用いられる⁽⁷⁾。

さて、次節以下の故障計算は(1)式の過渡時系統計算に含まれるが、故障計算には大別して次の二つの方法が考えられる。

- (i) 故障様相に応じて Y 行列要素を変更する方法（故障点への故障等価抵抗の挿入）
- (ii) 故障様相に応じた故障電流値を計算し、注入電流として計算する方法（故障点への故障等価電流の注入）

一般に、不平衡故障を含む故障計算方法として両者を比較すると、故障条件が単純故障であってかつ正相分のみに関する系統諸量が得られれば十分な場合は前者が扱いやすい。一方、多重故障も考慮する場合、あるいは同時に系統各部における各相電圧・電流諸量も必要とする場合は後者が優れている。特に不平衡の多重故障計算に関しては、一般の大規模電力系統モデルの場合、前者の方法では挿入する等価抵抗に相互分が生じ、これによる計算は容易ではない⁽⁸⁾。

従って、以下では(ii)を前提とした故障計算手法について述べる。この場合、故障計算は(1)式をベースとして、正相分については

$$i_1 + \Delta i^{(1)} = \dot{Y}^{(1)} \dot{V}_1 \quad \dots\dots\dots (2a)$$

逆相分、零相分についてはそれぞれ

$$\Delta i^{(2)} = \dot{Y}^{(2)} \dot{V}_2 \quad \dots\dots\dots (2b)$$

$$\Delta i^{(0)} = \dot{Y}^{(0)} \dot{V}_0 \quad \dots\dots\dots (2c)$$

により各対称分のノード電圧 $\dot{V}$ を求めることになる。 Δi は系統故障を模擬するための故障点ノードへの注入電流ベクトルである。従って、各々の故障条件に応じた Δi を求めることが故障計算の目的となる。

〈2・2〉 単純故障計算 単純故障計算の基本計算式を表3に示す。なお、対称座標法の基本論理、あるいは故障位相が非基準相の場合の計算などについては、例えば文献(9)などの関係著書を参照されたい。以下では特に断らない限り、故障位置はノード端、故障位相は基準相（1線故障の場合は a 相、2線故障の場合は bc 相）を指すものとする。また、記述にあたって複素記号は省略する。

表3の地絡故障および直列コンデンサ (SrC) 短絡故障の基本式は、既に広く用いられている方法である。しかし、断線計算は本論文で提案するものであり、以下に定式化の手順を述べる。まず、従来の断線計算の基本式は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} V_k^{(0)} &= -[Z_{ss}^{(0)} + Z_{tt}^{(0)}]I_k^{(0)} \\ V_k^{(1)} &= -[Z_{ss}^{(1)} + Z_{tt}^{(1)}]I_k^{(1)} + E_k \\ V_k^{(2)} &= -[Z_{ss}^{(2)} + Z_{tt}^{(2)}]I_k^{(2)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 t ：断線による回路変更に伴い新しく追加されたノード、 E_k ：断線点を開いた状態でのノード s と t 間の電位差、 Z ：断線状態の各対称分回路の Z 行列要素〔図1(a)〕

このように、従来の方法では計算にあたっていったん回路変更計算を行う必要がある。また、求めるべき変数も電流値 I_k として定式化されている。

提案する方法では、まず(3)式を次のように書換える。

$$\left. \begin{aligned} I_k^{(0)} &= -V_k^{(0)} / (Z_{ss}^{(0)} + Z_{tt}^{(0)}) \\ I_k^{(1)} &= -V_k^{(1)} / (Z_{ss}^{(1)} + Z_{tt}^{(1)} + E_k / (Z_{ss}^{(1)} + Z_{tt}^{(1)})) \\ I_k^{(2)} &= -V_k^{(2)} / (Z_{ss}^{(2)} + Z_{tt}^{(2)}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

上の式で、右辺の V_k にかかる係数は、実は各対称分回路の断線点から直列に回路を覗いたときのアドミタンスに等しい。すなわち、

$$Y_{kk}^{(n)} = 1 / (Z_{ss}^{(n)} + Z_{tt}^{(n)}) \quad (n=0, 1, 2,) \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、正相分方程式の右辺第2項は、断線前に当該点を流れていた電流 C_k に等しい。すなわち、

$$C_k = E_k / (Z_{ss}^{(1)} + Z_{tt}^{(1)}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

表 3 単純故障計算式
Table 3. Fundamental equation of single contingency.

	(a) 地絡故障	(b) SrC 短絡故障	(c) 断線故障	(d) 統一的表现
零相, 正相, 逆相 の基本計算式	$V_k^{(0)} = -Z_{kk}^{(0)} I_k^{(0)}$ $V_k^{(1)} = -Z_{kk}^{(1)} I_k^{(1)} + E_k$ $V_k^{(2)} = -Z_{kk}^{(2)} I_k^{(2)}$	$V_k^{(0)} = -R_{sr}^{(0)} I_k^{(0)}$ $V_k^{(1)} = -R_{sr}^{(1)} I_k^{(1)} + E_k$ $V_k^{(2)} = -R_{sr}^{(2)} I_k^{(2)}$	$I_k^{(0)} = -Y_{kk}^{(0)} V_k^{(0)}$ $I_k^{(1)} = -Y_{kk}^{(1)} V_k^{(1)} + C_k$ $I_k^{(2)} = -Y_{kk}^{(2)} V_k^{(2)}$	$U_k^{(0)} = -X_{kk}^{(0)} W_k^{(0)}$ $U_k^{(1)} = -X_{kk}^{(1)} W_k^{(1)} + S_k$ $U_k^{(2)} = -X_{kk}^{(2)} W_k^{(2)}$
故障条件式	$1LG \begin{cases} V_k^{(0)} + V_k^{(1)} + V_k^{(2)} = 0 \\ I_k^{(0)} = I_k^{(1)} = I_k^{(2)} \end{cases}$ $2LG \begin{cases} V_k^{(0)} = V_k^{(1)} = V_k^{(2)} = 0 \\ I_k^{(0)} + I_k^{(1)} + I_k^{(2)} = 0 \end{cases}$ $3LG \begin{cases} V_k^{(0)} = V_k^{(1)} = V_k^{(2)} = 0 \end{cases}$	$1LA \begin{cases} V_k^{(0)} + V_k^{(1)} + V_k^{(2)} = 0 \\ I_k^{(0)} = I_k^{(1)} = I_k^{(2)} \end{cases}$ $2LA \begin{cases} V_k^{(0)} = V_k^{(1)} = V_k^{(2)} = 0 \\ I_k^{(0)} + I_k^{(1)} + I_k^{(2)} = 0 \end{cases}$ $3LA \begin{cases} V_k^{(0)} = V_k^{(1)} = V_k^{(2)} = 0 \end{cases}$	$1\gamma O \begin{cases} I_k^{(0)} + I_k^{(1)} + I_k^{(2)} = 0 \\ V_k^{(0)} = V_k^{(1)} = V_k^{(2)} \end{cases}$ $2LO \begin{cases} I_k^{(0)} = I_k^{(1)} = I_k^{(2)} = 0 \\ V_k^{(0)} + V_k^{(1)} + V_k^{(2)} = 0 \end{cases}$ $3LO \begin{cases} I_k^{(0)} = I_k^{(1)} = I_k^{(2)} = 0 \end{cases}$	$1L \begin{cases} U_k^{(0)} + U_k^{(1)} + U_k^{(2)} = 0 \\ W_k^{(0)} = W_k^{(1)} = W_k^{(2)} \end{cases}$ $2L \begin{cases} U_k^{(0)} = U_k^{(1)} = U_k^{(2)} = 0 \\ W_k^{(0)} + W_k^{(1)} + W_k^{(2)} = 0 \end{cases}$ $3L \begin{cases} U_k^{(0)} = U_k^{(1)} = U_k^{(2)} = 0 \end{cases}$
未知変数	$I_k^{(0)}, I_k^{(1)}, I_k^{(2)}$	$I_k^{(0)}, I_k^{(1)}, I_k^{(2)}$	$V_k^{(0)}, V_k^{(1)}, V_k^{(2)}$	$W_k^{(0)}, W_k^{(1)}, W_k^{(2)}$
零相, 正相, 逆相 の電圧・電流分布 計算式	$\begin{cases} V_{i0} = -Z_{ik}^{(0)} I_k^{(0)} \\ V_{i1} = -Z_{ik}^{(1)} I_k^{(1)} + E_i \\ V_{i2} = -Z_{ik}^{(2)} I_k^{(2)} \\ I_{j0} = -Y_{jk}^{(0)} I_k^{(0)} \\ I_{j1} = -Y_{jk}^{(1)} I_k^{(1)} + C_j \\ I_{j2} = -Y_{jk}^{(2)} I_k^{(2)} \end{cases}$	$\begin{cases} V_{i0} = -Z_{ik}^{(0)} I_k^{(0)} \\ V_{i1} = -Z_{ik}^{(1)} I_k^{(1)} + E_i \\ V_{i2} = -Z_{ik}^{(2)} I_k^{(2)} \\ I_{j0} = -Y_{jk}^{(0)} I_k^{(0)} \\ I_{j1} = -Y_{jk}^{(1)} I_k^{(1)} + C_j \\ I_{j2} = -Y_{jk}^{(2)} I_k^{(2)} \end{cases}$	$\begin{cases} V_{i0} = -Z_{ik}^{(0)} V_k^{(0)} \\ V_{i1} = -Z_{ik}^{(1)} V_k^{(1)} + E_i \\ V_{i2} = -Z_{ik}^{(2)} V_k^{(2)} \\ I_{j0} = -Y_{jk}^{(0)} V_k^{(0)} \\ I_{j1} = -Y_{jk}^{(1)} V_k^{(1)} + C_j \\ I_{j2} = -Y_{jk}^{(2)} V_k^{(2)} \end{cases}$	$\begin{cases} V_{i0} = -Z_{ik}^{(0)} W_k^{(0)} \\ V_{i1} = -Z_{ik}^{(1)} W_k^{(1)} + E_i \\ V_{i2} = -Z_{ik}^{(2)} W_k^{(2)} \\ I_{j0} = -Y_{jk}^{(0)} W_k^{(0)} \\ I_{j1} = -Y_{jk}^{(1)} W_k^{(1)} + C_j \\ I_{j2} = -Y_{jk}^{(2)} W_k^{(2)} \end{cases}$
各変数の意味 ($n = 0, 1, 2$)	$I_k^{(n)}$: 地絡電流 $V_k^{(n)}$: 地絡点ノード電圧 Z_{ik} , Y_{jk} : 地絡点 k に単位電 流注入時のノード i 電圧、 ブランチ j 電流 $C_k^{(n)}$: 地絡なしの系統状態での 地絡点ノード電圧	$I_k^{(n)}$: 保護ギャップ通過電流 $V_k^{(n)}$: SrC 両端の電位差 Z_{ik} , Y_{jk} : SrC 両端ノード s と r にそれぞれ単位電流注 入・注出時のノード i 電圧、 ブランチ j 電流 R_{sr} : Z_{ik} - Z_{rk} E_k : 短絡なしの系統状態での SrC 両端の電位差	$V_k^{(n)}$: 断線間電位差 $I_k^{(n)}$: 断線点通過電流 Z_{ik} , Y_{jk} : 断線点 k に単位電 圧源挿入時のノード i 電圧、 ブランチ j 電流 $C_k^{(n)}$: 断線なしの系統状態での 断線点通過電流	

よって, (4)~(6)式より次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} I_k^{(0)} &= -Y_{kk}^{(0)} V_k^{(0)} \\ I_k^{(1)} &= -Y_{kk}^{(1)} V_k^{(1)} + C_k \\ I_k^{(2)} &= -Y_{kk}^{(2)} V_k^{(2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

この式が提案する断線計算式である。本方法では、従来の方法と異なり断線点 k を開放する必要がない。すなわち、(7)式中のアドミタンス値 Y_{kk} は、図 1(b)に示すように断線点に単位電圧源を挿入したときの k 点通過電流として得ることができる。このブランチ挿入電圧源の計算は、よく知られているように、当該ブランチの両端ノードへの等価注入電流 (Norton の電流源) 計算として容易に行うことができ、 Y 行列要素の再計算は不要である。

更に、(7)式は表 3 中のほかの計算式と全く同形であるため、次のような利点がある。すなわち、単純故障の故障様相として考えられる表 2 の 9 タイプそれぞれの未知変数 Δi を求めるにあたって、個別に九つの計算式を用意する必要がない。本方法では、表 3(d)に示す統一的表现形式について、以下のように 1L, 2L および 3L 故障の 3 タイプのみに関する求解式を用意しておきさえすればよい。

(a) 従来の方法

(b) 提案する方法

図 1 断線故障計算方法

Fig. 1. Calculating technique of line open.

未知変数ベクトル Δi は、故障ノードの未知変数 W_k を除いて他はすべてゼロである。この W_k は、表 3(d)の統一的表现式に対して

表 4 単純故障計算の係数 C (表 3(d) に対応)
Table 4. Coefficients used for single fault calculation.

故障タイプ	1 L	2 L	3 L
C_1	$\frac{1}{X_{kk}^{(0)} + X_{kk}^{(1)} + X_{kk}^{(2)}}$	$\frac{X_{kk}^{(0)} + X_{kk}^{(2)}}{X_{kk}^{(0)} X_{kk}^{(1)} + X_{kk}^{(1)} X_{kk}^{(2)} + X_{kk}^{(2)} X_{kk}^{(0)}}$	$\frac{1}{X_{kk}^{(1)}}$
C_0	1	$-\frac{X_{kk}^{(2)}}{X_{kk}^{(0)} + X_{kk}^{(2)}}$	0
C_2	1	$-\frac{X_{kk}^{(0)}}{X_{kk}^{(0)} + X_{kk}^{(2)}}$	0

表 5 多重故障計算式
Table 5. Fundamental equation of multiple faults.

	(a) 地絡 / 地絡 故障	(b) 地絡 / 断線 故障	(c) 断線 / 断線 故障	(f) 統一 的 表 現
零相, 正相, 逆相の基本計算式	$\begin{bmatrix} V_k^{(0)} \\ V_\ell^{(0)} \\ V_k^{(1)} \\ V_\ell^{(1)} \\ V_k^{(2)} \\ V_\ell^{(2)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{kk}^{(0)} Z_{k\ell}^{(0)} \\ Z_{\ell k}^{(0)} Z_{\ell\ell}^{(0)} \\ Z_{kk}^{(1)} Z_{k\ell}^{(1)} \\ Z_{\ell k}^{(1)} Z_{\ell\ell}^{(1)} \\ Z_{kk}^{(2)} Z_{k\ell}^{(2)} \\ Z_{\ell k}^{(2)} Z_{\ell\ell}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k^{(0)} \\ I_\ell^{(0)} \\ I_k^{(1)} \\ I_\ell^{(1)} \\ I_k^{(2)} \\ I_\ell^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_k \\ E_\ell \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} V_k^{(0)} \\ V_\ell^{(0)} \\ V_k^{(1)} \\ V_\ell^{(1)} \\ V_k^{(2)} \\ V_\ell^{(2)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{kk}^{(0)} Z_{k\ell}^{(0)} \\ Y_{\ell k}^{(0)} Y_{\ell\ell}^{(0)} \\ Z_{kk}^{(1)} Z_{k\ell}^{(1)} \\ Y_{\ell k}^{(1)} Y_{\ell\ell}^{(1)} \\ Z_{kk}^{(2)} Z_{k\ell}^{(2)} \\ Y_{\ell k}^{(2)} Y_{\ell\ell}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k^{(0)} \\ I_\ell^{(0)} \\ I_k^{(1)} \\ I_\ell^{(1)} \\ I_k^{(2)} \\ I_\ell^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_k \\ E_\ell \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} I_k^{(0)} \\ I_\ell^{(0)} \\ I_k^{(1)} \\ I_\ell^{(1)} \\ I_k^{(2)} \\ I_\ell^{(2)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{kk}^{(0)} Y_{k\ell}^{(0)} \\ Y_{\ell k}^{(0)} Y_{\ell\ell}^{(0)} \\ Y_{kk}^{(1)} Y_{k\ell}^{(1)} \\ Y_{\ell k}^{(1)} Y_{\ell\ell}^{(1)} \\ Y_{kk}^{(2)} Y_{k\ell}^{(2)} \\ Y_{\ell k}^{(2)} Y_{\ell\ell}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k^{(0)} \\ V_\ell^{(0)} \\ V_k^{(1)} \\ V_\ell^{(1)} \\ V_k^{(2)} \\ V_\ell^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_k \\ C_\ell \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} U_k^{(0)} \\ U_\ell^{(0)} \\ U_k^{(1)} \\ U_\ell^{(1)} \\ U_k^{(2)} \\ U_\ell^{(2)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_{kk}^{(0)} X_{k\ell}^{(0)} \\ X_{\ell k}^{(0)} X_{\ell\ell}^{(0)} \\ X_{kk}^{(1)} X_{k\ell}^{(1)} \\ X_{\ell k}^{(1)} X_{\ell\ell}^{(1)} \\ X_{kk}^{(2)} X_{k\ell}^{(2)} \\ X_{\ell k}^{(2)} X_{\ell\ell}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_k^{(0)} \\ W_\ell^{(0)} \\ W_k^{(1)} \\ W_\ell^{(1)} \\ W_k^{(2)} \\ W_\ell^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_k \\ S_\ell \end{bmatrix}$
故障条件式	$\begin{cases} V_k^{(0)} + V_k^{(1)} + V_k^{(2)} = 0 \\ I_k^{(0)} = I_k^{(1)} = I_k^{(2)} \\ V_\ell^{(0)} = V_\ell^{(1)} = V_\ell^{(2)} \\ I_\ell^{(0)} + I_\ell^{(1)} + I_\ell^{(2)} = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} V_k^{(0)} + V_k^{(1)} + V_k^{(2)} = 0 \\ I_k^{(0)} = I_k^{(1)} = I_k^{(2)} \\ I_\ell^{(0)} = I_\ell^{(1)} = I_\ell^{(2)} \\ V_\ell^{(0)} + V_\ell^{(1)} + V_\ell^{(2)} = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} I_k^{(0)} + I_k^{(1)} + I_k^{(2)} = 0 \\ V_k^{(0)} = V_k^{(1)} = V_k^{(2)} \\ I_\ell^{(0)} = I_\ell^{(1)} = I_\ell^{(2)} \\ V_\ell^{(0)} + V_\ell^{(1)} + V_\ell^{(2)} = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} U_k^{(0)} + U_k^{(1)} + U_k^{(2)} = 0 \\ W_k^{(0)} = W_k^{(1)} = W_k^{(2)} \\ U_\ell^{(0)} = U_\ell^{(1)} = U_\ell^{(2)} \\ W_\ell^{(0)} + W_\ell^{(1)} + W_\ell^{(2)} = 0 \end{cases}$
未知変数	$I_k^{(0)}, I_k^{(1)}, I_k^{(2)}, I_\ell^{(0)}, I_\ell^{(1)}, I_\ell^{(2)}$	$I_k^{(0)}, I_k^{(1)}, I_k^{(2)}, V_\ell^{(0)}, V_\ell^{(1)}, V_\ell^{(2)}$	$V_k^{(0)}, V_k^{(1)}, V_k^{(2)}, V_\ell^{(0)}, V_\ell^{(1)}, V_\ell^{(2)}$	$W_k^{(0)}, W_k^{(1)}, W_k^{(2)}, W_\ell^{(0)}, W_\ell^{(1)}, W_\ell^{(2)}$
零相, 正相, 逆相の電圧・電流分布計算式	$\begin{cases} V_{i0} = -Z_{ik}^{(0)} I_k^{(0)} - Z_{i\ell}^{(0)} I_\ell^{(0)} \\ V_{i1} = -Z_{ik}^{(1)} I_k^{(1)} - Z_{i\ell}^{(1)} I_\ell^{(1)} + E_i \\ V_{i2} = -Z_{ik}^{(2)} I_k^{(2)} - Z_{i\ell}^{(2)} I_\ell^{(2)} \\ I_{j0} = -Y_{jk}^{(0)} V_k^{(0)} - Y_{j\ell}^{(0)} V_\ell^{(0)} \\ I_{j1} = -Y_{jk}^{(1)} V_k^{(1)} - Y_{j\ell}^{(1)} V_\ell^{(1)} + C_j \\ I_{j2} = -Y_{jk}^{(2)} V_k^{(2)} - Y_{j\ell}^{(2)} V_\ell^{(2)} \end{cases}$	$\begin{cases} V_{i0} = -Z_{ik}^{(0)} I_k^{(0)} - Z_{i\ell}^{(0)} V_\ell^{(0)} \\ V_{i1} = -Z_{ik}^{(1)} I_k^{(1)} - Z_{i\ell}^{(1)} V_\ell^{(1)} + E_i \\ V_{i2} = -Z_{ik}^{(2)} I_k^{(2)} - Z_{i\ell}^{(2)} V_\ell^{(2)} \\ I_{j0} = -Y_{jk}^{(0)} V_k^{(0)} - Y_{j\ell}^{(0)} V_\ell^{(0)} \\ I_{j1} = -Y_{jk}^{(1)} V_k^{(1)} - Y_{j\ell}^{(1)} V_\ell^{(1)} + C_j \\ I_{j2} = -Y_{jk}^{(2)} V_k^{(2)} - Y_{j\ell}^{(2)} V_\ell^{(2)} \end{cases}$	$\begin{cases} V_{i0} = -Z_{ik}^{(0)} V_k^{(0)} - Z_{i\ell}^{(0)} V_\ell^{(0)} \\ V_{i1} = -Z_{ik}^{(1)} V_k^{(1)} - Z_{i\ell}^{(1)} V_\ell^{(1)} + E_i \\ V_{i2} = -Z_{ik}^{(2)} V_k^{(2)} - Z_{i\ell}^{(2)} V_\ell^{(2)} \\ I_{j0} = -Y_{jk}^{(0)} V_k^{(0)} - Y_{j\ell}^{(0)} V_\ell^{(0)} \\ I_{j1} = -Y_{jk}^{(1)} V_k^{(1)} - Y_{j\ell}^{(1)} V_\ell^{(1)} + C_j \\ I_{j2} = -Y_{jk}^{(2)} V_k^{(2)} - Y_{j\ell}^{(2)} V_\ell^{(2)} \end{cases}$	$\begin{cases} V_{i0} = -Z_{ik}^{(0)} W_k^{(0)} - Z_{i\ell}^{(0)} W_\ell^{(0)} \\ V_{i1} = -Z_{ik}^{(1)} W_k^{(1)} - Z_{i\ell}^{(1)} W_\ell^{(1)} + E_i \\ V_{i2} = -Z_{ik}^{(2)} W_k^{(2)} - Z_{i\ell}^{(2)} W_\ell^{(2)} \\ I_{j0} = -Y_{jk}^{(0)} W_k^{(0)} - Y_{j\ell}^{(0)} W_\ell^{(0)} \\ I_{j1} = -Y_{jk}^{(1)} W_k^{(1)} - Y_{j\ell}^{(1)} W_\ell^{(1)} + C_j \\ I_{j2} = -Y_{jk}^{(2)} W_k^{(2)} - Y_{j\ell}^{(2)} W_\ell^{(2)} \end{cases}$

(注) (d) 地絡/SrC 短絡, (e) 断線/SrC 短絡についても (a)~(c) と同形であるので省略する。

$$\left. \begin{aligned} W_k^{(1)} &= C_1 S_k \\ W_k^{(0)} &= C_0 W_k^{(1)} \\ W_k^{(2)} &= C_2 W_k^{(1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

と表すことができる。ここに、右辺の係数 C_n ($n=0, 1, 2$) は各々の故障条件式に基づいて算出できる。結果を整理して表 4 に示す。

安定度解析における故障計算で、同一故障が継続中の表 3 の Z と Y ベクトルおよび表 4 の係数 C_n は変わらない。よって実際の計算では、これらの値は外乱条件が変化する時点でのみ 1 回だけ算出しておけばよ

い。同一故障継続中の系統計算はいったん故障なしの状態の系統諸量 S_k (表 3 の E_k あるいは C_k) を求め、これから算出される上記 W_k を表 3(d) の電圧・電流方程式に代入する (故障なしの潮流分布に、故障による潮流分布変化分を重畳する) だけでよい。

〈2・3〉 多重故障計算 2 地点同時故障 (多重故障) 計算の場合も、基本的な計算手順は単純故障と変わるところはない。ただ、故障を k 点のみでなく同時に l 点 ($k=l$ でもかまわない) でも考慮する場合、互いの故障が影響を及ぼし合うため、一連の計算式が二次元になるという点、また故障位相が非基準相のと

表 6 多重故障計算の係数 D (表 5(f) に対応)
Table 6. Coefficients used for multiple faults calculation.

	1 L - 1 L	1 L - 2 L	1 L - 3 L	2 L - 2 L	2 L - 3 L	3 L - 3 L
D_{01}	1 0 0 1	1 0 $\frac{-X_{\ell k}^{(1)} + X_{\ell k}^{(2)}}{\Delta_1} \quad \frac{-X_{\ell \ell}^{(2)}}{\Delta_1}$	1 0 $\frac{-X_{\ell k}^{(2)}}{X_{\ell \ell}^{(0)}} \quad 0$	$\Delta_2 \begin{bmatrix} -X_{kk}^{(2)} - X_{k\ell}^{(2)} \\ -X_{\ell k}^{(2)} - X_{\ell \ell}^{(2)} \end{bmatrix}$	$-\frac{\Delta_4}{\Delta_5} X_{\ell \ell}^{(0)} \quad 0$ $\frac{\Delta_4}{\Delta_5} X_{\ell k}^{(0)} \quad 0$	0 0 0 0
D_{21}	1 0 0 1	1 0 $\frac{X_{\ell k}^{(1)} - X_{\ell k}^{(2)}}{\Delta_1} \quad \frac{-X_{\ell \ell}^{(1)}}{\Delta_1}$	1 0 $\frac{-X_{\ell k}^{(2)}}{X_{\ell \ell}^{(2)}} \quad 0$	$\Delta_2 \begin{bmatrix} -X_{kk}^{(1)} - X_{k\ell}^{(1)} \\ -X_{\ell k}^{(1)} - X_{\ell \ell}^{(1)} \end{bmatrix}$	$-\frac{\Delta_3}{\Delta_5} X_{\ell \ell}^{(2)} \quad 0$ $\frac{\Delta_3}{\Delta_5} X_{\ell k}^{(2)} \quad 0$	0 0 0 0
D_{00}	$X_{kk}^{(0)} \quad X_{k\ell}^{(0)}$ $X_{\ell k}^{(0)} \quad X_{\ell \ell}^{(0)}$	$X_{kk}^{(0)} \quad X_{k\ell}^{(0)}$ 0 0	$X_{kk}^{(0)} \quad X_{k\ell}^{(0)}$ 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
D_{11}	$X_{kk}^{(1)} \quad X_{k\ell}^{(1)}$ $X_{\ell k}^{(1)} \quad X_{\ell \ell}^{(1)}$	$X_{kk}^{(1)} \quad X_{k\ell}^{(1)}$ $X_{\ell k}^{(1)} \quad X_{\ell \ell}^{(1)}$	$X_{kk}^{(1)} \quad X_{k\ell}^{(1)}$ $X_{\ell k}^{(1)} \quad X_{\ell \ell}^{(1)}$	$X_{kk}^{(1)} \quad X_{k\ell}^{(1)}$ $X_{\ell k}^{(1)} \quad X_{\ell \ell}^{(1)}$	$X_{kk}^{(1)} \quad X_{k\ell}^{(1)}$ $X_{\ell k}^{(1)} \quad X_{\ell \ell}^{(1)}$	$X_{kk}^{(1)} \quad X_{k\ell}^{(1)}$ $X_{\ell k}^{(1)} \quad X_{\ell \ell}^{(1)}$
D_{22}	$X_{kk}^{(2)} \quad X_{k\ell}^{(2)}$ $X_{\ell k}^{(2)} \quad X_{\ell \ell}^{(2)}$	$X_{kk}^{(2)} \quad X_{k\ell}^{(2)}$ $-X_{\ell k}^{(2)} \quad -X_{\ell \ell}^{(2)}$	$X_{kk}^{(2)} \quad X_{k\ell}^{(2)}$ 0 0	$-X_{kk}^{(2)} \quad -X_{k\ell}^{(2)}$ $-X_{\ell k}^{(2)} \quad -X_{\ell \ell}^{(2)}$	$-X_{kk}^{(2)} \quad -X_{k\ell}^{(2)}$ 0 0	0 0 0 0

(注) $\Delta_1 = X_{\ell \ell}^{(1)} + X_{\ell \ell}^{(2)}$ $\Delta_2 = \begin{bmatrix} X_{kk}^{(0)} + X_{kk}^{(2)} & X_{k\ell}^{(0)} + X_{k\ell}^{(2)} \\ X_{\ell k}^{(0)} + X_{\ell k}^{(2)} & X_{\ell \ell}^{(0)} + X_{\ell \ell}^{(2)} \end{bmatrix}^{-1}$ $\Delta_3 = X_{kk}^{(0)} X_{\ell \ell}^{(1)} - X_{k\ell}^{(0)} X_{\ell k}^{(1)}$
 $\Delta_4 = X_{kk}^{(2)} X_{\ell \ell}^{(1)} - X_{k\ell}^{(2)} X_{\ell k}^{(1)}$ $\Delta_5 = X_{\ell \ell}^{(2)} \Delta_3 + X_{\ell \ell}^{(0)} \Delta_4$

きの取扱いに注意を要する点で相違がある。

表 2 の 39 タイプの多重故障に対応する基本方程式をまとめて表 5 に示す。同表における各変数の意味は、表 3 の単純故障の場合と同様である。なお、表 5 には故障条件式の一例として k 点-1 L と l 点-2 L の組合せのみを記述しているが、実際にはこのほかに 1 L~3 L について 5 通りの組合せが考えられる。

表 5(a)~(e) の方程式は前節の単純故障の場合と同様に全く同形であるため、考えられる多重故障のすべての組合せに対応する方程式を 39 のタイプ別に用意する必要はない。表 5(f) に示す統一的表现形式について 1 L~3 L の組合せからなる 6 タイプに関する求解式を用意しておきさえすればよい。

具体的に表 5(f) 中の未知変数 W_k, W_l を求めると

$$[D_{00}] \begin{bmatrix} W_k^{(0)} \\ W_l^{(0)} \end{bmatrix} + [D_{11}] \begin{bmatrix} W_k^{(1)} \\ W_l^{(1)} \end{bmatrix} + [D_{22}] \begin{bmatrix} W_k^{(2)} \\ W_l^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_k \\ S_l \end{bmatrix} \quad \text{..... (9 a)}$$

$$\begin{bmatrix} W_k^{(2)} \\ W_l^{(2)} \end{bmatrix} = [D_{21}] \begin{bmatrix} W_k^{(1)} \\ W_l^{(1)} \end{bmatrix} \quad \text{..... (9 b)}$$

$$\begin{bmatrix} W_k^{(0)} \\ W_l^{(0)} \end{bmatrix} = [D_{01}] \begin{bmatrix} W_k^{(1)} \\ W_l^{(1)} \end{bmatrix} \quad \text{..... (9 c)}$$

となる。ここで、 D で表した各係数は、それぞれ (2×2) の大きさの正方行列である。その要素値は各々の故障条件式に基づいて算出できる。結果を整理して表 6 に示す。求めるべき W は、(9b) 式と (9c) 式を (9a) 式に代入した次式により計算できる。

$$\begin{bmatrix} W_k^{(1)} \\ W_l^{(1)} \end{bmatrix} = [D'_{11}] \begin{bmatrix} S_k \\ S_l \end{bmatrix} \quad \text{..... (10)}$$

ここに、 $D'_{11} = (D_{00}D_{01} + D_{11} + D_{22}D_{21})^{-1}$ それぞれの W の計算手順は、まず (10) 式で故障なしの系統計算結果である S_k と S_l から $W^{(1)}$ を求め、次いでこの値を (9b) 式、(9c) 式に逆代入して残りの $W^{(2)}, W^{(0)}$ を算出する。最終的に系統故障時における各対称分の系統諸量は、どのような故障タイプであれ、この W を表 5(f) の電圧・電流分布計算式に代入することにより得ることができる。

安定度解析における故障計算では、同一故障が継続中は (9) 式の D は変わらない。よって実際の適用にあたっては、前節の単純故障における記述と同様の効率的な計算手順を用いることが可能である。

〈2・4〉 プログラム 表 2 の故障計算機能を、電力中央研究所で既開発の動特性安定度解析プログラム⁽¹⁰⁾に付加した。一つの故障についての指定項目は

次のとおりである。

- (1) 故障種類 (地絡, SrC 短絡, ブランチ開放)
- (2) 故障相 (a, b, c の任意の組合せ)
- (3) 故障地点 (ブランチの送端もしくは受端側)
- (4) 故障発生時間 (解析開始を 0.0 秒として)
- (5) 地絡故障の場合, 必要に応じ故障点抵抗値

故障指定は, 時系列的に任意の個数を設定できる。故障設定による安定度解析中の各時間断面の故障様相が単純か多重であるかは, プログラム内で自動的に判別して必要な処理・計算を行うこととしている。更に, 地絡故障が継続中の状態で当該ブランチの開放が指定された場合には, 自動的に地絡故障を除去するなど, 利便性を考慮した機能を備えている。

計算出力は, 不平衡の状態においてのみ, 各地点の各相ノード電圧と各相ブランチ電流を出力する。

取扱い得る系統規模は 1,000 ノード, 1,200 ブランチである。故障計算機能の付加による安定度プログラム容量の増分は, 全体の容量 (約 2 MB) に対して 400 kB 程度にすぎない。

計算時間は, 発電機モデルや負荷特性など他の条件設定に大きく依存するため厳密な比較は難しいが, 機能付加による計算時間増加を概略推定するため 872 ノード, 959 ブランチのモデルシステムを用いて試算を行った。その結果, 平衡計算と比べた不平衡計算時の系統計算 1 回あたりの計算時間は約 1.3 倍, 全体の計算を積分刻み (0.01 秒) だけ進めるのに要する時間でみて約 1.1 倍であった (富士通 M-200 使用時)。

3. 不平衡故障時の過渡安定度

冒頭で述べたように, 我が国における基幹送電線の多くは 2 回線構成が基本となっている。しかも, 同一鉄塔への 2 回線併架が大半であることから, 2 回線にまたがる送電線故障に対する過渡安定度を精度良く把握しておくことが必要である。しかしながら, これまで様々な故障の過渡安定度に及ぼす影響が詳細に検討・評価された例は見当たらない。そのため, その影響の度合いを明らかにしておくことは, 電力系統の計画・運用の検討に有益な指針を与え得ることになる。

本章では, 再閉路方式を有する電力系統の過渡安定度について, モデル実験との対比により前章で述べたシミュレーション解析手法の精度を検証すると共に, 種々の故障様相と過渡安定度との関係について考察する。

〈3・1〉 シミュレータによる実験 電力中央研究所の交・直流電力系統シミュレータ設備⁽¹⁾を用いたモデル実験システムを図 2(a)に示す。(b)図は対応する線

図 2 実験系統
Fig. 2. Model power system.

路定数であり, 計算機シミュレーションで回線間零相回路を正確に表現するため, ブランチ 20-30 に仮想のノード 25 を設けている。発電機には PSS 付きの標準的な AVR を設け, GOV 系は手動とした。

故障に関する実験条件は次のとおりである。

(1) 故障様相 図 3 の 8 種類の故障を対象とし, いずれも多相再閉路成功とする。故障様相選定の理由は, 我が国における多相再閉路方式採用の送電線では, 基本的に両回線にまたがる異相 2 相以上が健全であれば再閉路を実施しているという実態による。

(2) 故障条件 故障条件は, 我が国の基幹系統での現状を考慮して故障発生から遮断までの故障継続時間を 3 サイクル, 故障遮断から再閉路までの無電圧時間を 50 サイクルとした。また, 故障発生位置は図 2 の送電端に設定した。

実験は, 定格出力 90 kW の発電機の出力を 5 kW 単位で変化させ, 各出力ごとに上記故障を発生させて安定極限電力を求めた。

結果を図 3 に示す。図中の最大相差角 $\theta_{\max}$ は, 同じ安定極限電力となっている故障様相どうしの差異を類推するための参考として付した (一般に $\theta_{\max}$ が大きいほど, より安定度が厳しいと推定される)。図 3 から次のことがいえる。

(i) 単純に故障相の数が多いほど安定度が厳しいとはいえない。

(ii) 過渡安定度に及ぼす要因としては, 地絡に伴う発電機の加速よりも, 無電圧 (欠相) 状態が発電機加速に与える影響のほうが大きいと推察される。

図 3 故障様相別の過渡安定度限界
Fig. 3. Transient stability limits depending on the type of fault.

こうした特徴は、例えばケース 2 (片回線 3 LG) とケース 4 (aa' 相 2 LG) の結果に見ることができる。両者の比較では、後者は故障相の数で 1 相だけ少なく、しかも地絡時のショックは前者の 3 LG に対して後者は 1 LG と格段に小さいにもかかわらず、安定極限電力は後者が 10% 程度劣っている。

我が国における基幹送電線の故障遮断時間は、今後とも安定度のいっそうの向上に向け、短縮化の努力は行われよう。一方、故障遮断から再開路までの無電圧時間は、自然現象である残留アークの消滅時間との関係から、その短縮化は容易ではない。こうした点から、上記 (i), (ii) の傾向は今後いっそう顕著になるものと考えられる。

〈3・2〉 シミュレーション解析との対比 図 3 には、シミュレーション解析により安定極限電力を計算した結果を併せて示している。シミュレーションでは、1 kW 幅で発電機出力を変化させて安定極限電力を求めた。その結果は、ケース 4 (aa' 相 2 LG) を除くすべてのケースで十分に一致して (計算結果が ○ と × の間に) おり、シミュレーションの精度は十分と考えられる。

実験結果と比較的大きな差異が見られるケース 4 では、シミュレーションのほうがより厳しい結果となっ

ている。この主な理由としては、ケース 4 では無電圧時の状態が他のケースと比べ最も不平衡の度合い大きく、このため実際には発電機に大きな逆相電流が流れて 2 倍周波数成分の振動トルク (逆相トルク) が生じるが、シミュレーションではこの影響を考慮していないためと考えられる⁽³⁾。

〈3・3〉 故障条件と過渡安定限界 今後、必要性が高まると考えられる不平衡故障の検討に資するためには、図 3 で得た過渡安定限界の序列が送電距離の相違あるいは大規模な系統の場合に変わり得るかどうか、すなわちここでの結果に十分な一般性があるかどうかを明らかにしておくことが重要である。以下では、図 3 の結果に基づき、故障条件と過渡安定限界との関係について考察する。

一般に、安定送電限界がインピーダンス Z の逆数に比例することはよく知られている。例えばブランチの不平衡開放の場合、1 LO と 2 LO との比較では正相回路の開放点に挿入する等価インピーダンス Z (以下、等価 Z) がそれぞれ

$$Z_{1LO} = Z^{(0)} Z^{(2)} / (Z^{(0)} + Z^{(2)})$$

$$Z_{2LO} = Z^{(0)} + Z^{(2)}$$

であり、両値の比較では明らかに $Z_{1LO} < Z_{2LO}$ であるこ

図 4 不平衡開放の等価インピーダンス

Fig. 4. Equivalent impedance corresponding to unbalanced circuits open.

とから、送電限界は 2 LO の状態がより小さいことがいえる。一方、〈3・1〉節(2)項(ii)では安定度は無電圧状態の相違に大きく依存するという特徴を述べており、従って図 3 の安定限界の傾向の検討にあたっては、 Z_{1L0} や Z_{2L0} のように線路開放時の等価インピーダンスがふさわしいと考えられる。

しかし、2 回線にまたがるブランチの無電圧(多重断線)状態に対し、その等価 Z が必要とされる場合は多くない。しかも、 Z_{1L0} や Z_{2L0} のように数式化が容易でないため、めったに算出されることもない。だが、数値的には(10)式を用いることにより、正相回路における断線時の断線点間電位差 $V^{(1)}$ と通過電流 $I^{(1)}$ との関係式の係数として比較的容易に得ることができる。

図 4 に結果を示す。×—×で示す線が本モデル系統に対応する故障ブランチの等価 Z である。この抵抗 Z は図の左から右に向けて単調に増大して(安定度的に厳しくなっており、実験やシミュレーション結果の妥当性を裏付けたものとなっている。

この結果から、仮に系統規模が異なる場合、すなわ

ち故障ブランチ背後のインピーダンス値が異なる場合であっても、程度の差こそあれ図 4 と類似の結果が期待できると考えられる。ただし不平衡故障の場合、特に零相回路における回線間インピーダンスの影響が無視できないと考えられることから、参考までにこれが極端な値をとる場合(図 4 に示す △…△ および ○…○ のケース)も計算した。故障様相の一部でインピーダンス値の逆転が見られるものの、斜線で示すように全体として右上がりとなる傾向は変わらない。

また、電気事業の実務ではしばしば回線間インピーダンスを近似表現(両回線共に常に同じ電流が流れるものと仮定)した計算が行われることがあるので、参考までに零相回線間 Z 近似モデルの計算結果を図 4 に併せて示す。この場合、 Z はすべて大きめとなっていることから、安定度的には若干控えめな(悲観的な)計算となるものと推察され、実務上の問題は少ないと考えられる。

4. あとがき

対称座標法に代表される故障計算の基本論理が既に

成熟の域にあることはよく知られている。よって、従来不可能だった解析が本論文によって初めて可能となったとはいえない。

しかしながら、プログラム規模や演算時間などの計算労力で大きな負担増をまねくことなく、1,000 ノード程度の大規模システムモデルを取扱え、安定度解析が必要となる種々の故障様相の解析を簡便に行える実用的なツールはこれまでに見当たらない。更に、既に現実のものとなっている各種の故障について、それぞれの安定度の比較を詳細に検討された例もなかった。

前者については、従来極めて困難であった解析が本論文での提案により容易に行えるようになったといえよう。また後者については、一見して片回線3LG/3LOよりはより安定と考えられがちな2回線同相1LG/1LOが、実際にはより不安定であるなど、系統運用・計画の検討にあたっての有益な指針を提供した。

既に提案手法は(財)電力中央研究所が開発した動特性安定度解析(通称Y法)プログラムに組み込み、電力各社の系統運用・計画関連の実用業務に広く供している。

故障解析手法についての今後の課題としては、現行プログラムでは簡略扱いとなっている回線間零相互インピーダンスの詳細計算機能、あるいは現行ではノード端に限られている故障位置についてその線路中間点故障に対する計算機能などの拡充など、実用性を広げる課題がある。

最後に、本研究の遂行にあたり有益な御指導を賜った電力中央研究所 高橋一弘主席専門役、坪井 昭情報高度化担当に深甚なる謝意を表します。同じく電力シテム部の安定度解析グループの面々には、安定度解析プログラムへの適用の具体化に際して多くの助言をいただいた。ここに感謝いたします。

(平成3年7月22日受付)

文 献

- (1) 電気協同研究:「電力系統の安定度」, 電気協同研究会, 34 No. 5 (昭54)
- (2) 関根: 電力系統過渡解析論 (昭59) オーム社
- (3) 浅田, 他:「不平衡故障時の過渡安定度」, 電気学会電力技術研資, PE-88-6 (昭63)
- (4) 田中:「電力系統解析技術の基礎と応用(III故障解析)」, 電気評論, 74, No. 12, 56 (平元)
- (5) 坪井:「電力系統の各種事故に対する故障計算と保護継電システムの動作解析手法」, 電中研報告, 71070 (昭47)
- (6) H. Wayne Hong: "Application of the Two-step Compensation Method to Line-out and Line-end Fault Calculation", *IEEE Trans. Power Syst.*, PWR-2, No. 3 (1987)
- (7) 高橋: 電力シテム工学 (昭52) コロナ社
- (8) 柳橋, 他:「T分岐3端子線路における一般化された不平衡・多重故障計算法」, 電気学会電力技術研資, PE-87-96 (昭62)
- (9) 新田目: 電力系統技術計算の応用 (昭56) 電気書院
- (10) 高橋, 他:「大規模電力系統の安定度総合解析システムの開発」, 電中研総合報告, T14 (平2)
- (11) 町田, 他:「交流・直流電力系統シミュレータの開発」, 同上, T117 (昭59)

田 中 和 幸 (正員)

昭和26年12月30日生。51年3月九州大学大学院修士課程修了(電気工学)。同年4月(財)電力中央研究所入所。56年8月~57年9月アメリカ・テキサス大学アーリントン校客員研究員。主として、電力系統の計画・運用・制御に関する研究に従事。平成3年電気学会論文賞。平成3年10月九州工業大学客員助教授。

浅 田 実 (正員)

昭和27年11月20日生。46年3月東京都立小金井工業高校電気科卒業。同年4月(財)電力中央研究所入所。51年3月東京電機大学二部電気工学科卒業。主として、電力系統の計画・運用・制御に関する研究に従事。