

## 電力系統における複数線路開放時の系統分離の検出方法

日大生産工(院) ○関 博

日大生産工 佐藤 正弘

### 1 まえがき

電力系統は広い範囲に分布する発電所、変電所、送電線、需要家などから構成される大規模なシステムである。

電力系統には、一つの送電線の開放が他の送電線に電力変動や電圧低下をもたらし、次々と送電線が開放されると、電力系統がいくつかに分断になる。分離された系統に大きな需給アンバランスがあると、周波数や電圧などに異常が生じる。2003年8月14日、デトロイト、ニューヨーク、カナダの一部を含む広範囲が停電し、5000万人が被災、6000億円の損失をもたらした<sup>(1)</sup>。

本研究の目的は、このような広域停電を防止するために、線路の開放を示す情報から、系統が分断されたか否かを判定する方法を開発することである。Fig.1の系統の例で、放射状の系統で、×で示す線路が開放されれば系統は分離する。また、ループを構成する部分では、複

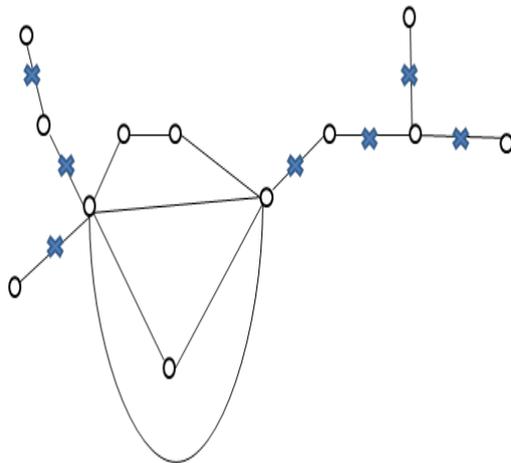


Fig.1 the example of System

数の線路が開放されると系統は分離する可能性がある。本研究は、ループを構成する部分で複数の線路が開放する場合に系統分離となるか否かを判断する方法の開発が主な目的である。Fig.2に、定常の系統運用時に、系統を構成する各線路の開閉を把握し、複数の線路が開放すると系統分離となるような複数線路の組み合わせを見つけ、表Aとして記憶する手順を示した。Fig.3には系統運用中に、線路が開放されたという情報をリアルタイムに得た場合、それらの線路の組み合わせが、表Aに記憶した組み合わせと一致すれば系統が分離したと判断する手順を示した。

### 2 系統分離判定方法

#### 〈2・1〉グラフ理論を用いた系統分離判定方法

ループを構成する系統の場合、いくつかの線路が開放すると系統が分離する可能性がある。系

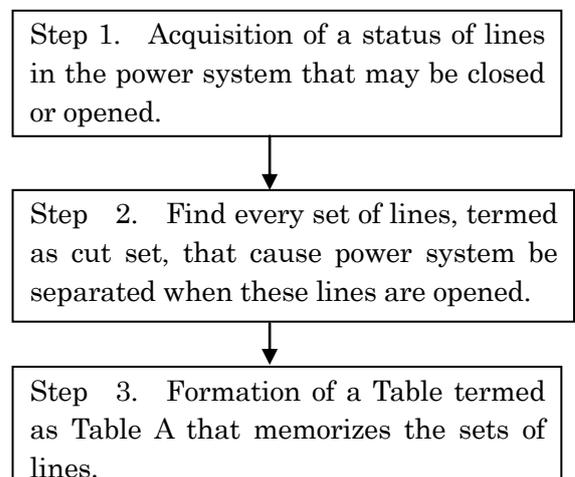


Fig.2 Procedure for forming a Table including every set of lines which may cause power system separation if they are opened

Detecting Method of System Separation by a sequence of line outages in the Electric Power System

Bo GUAN and Masahiro SATO

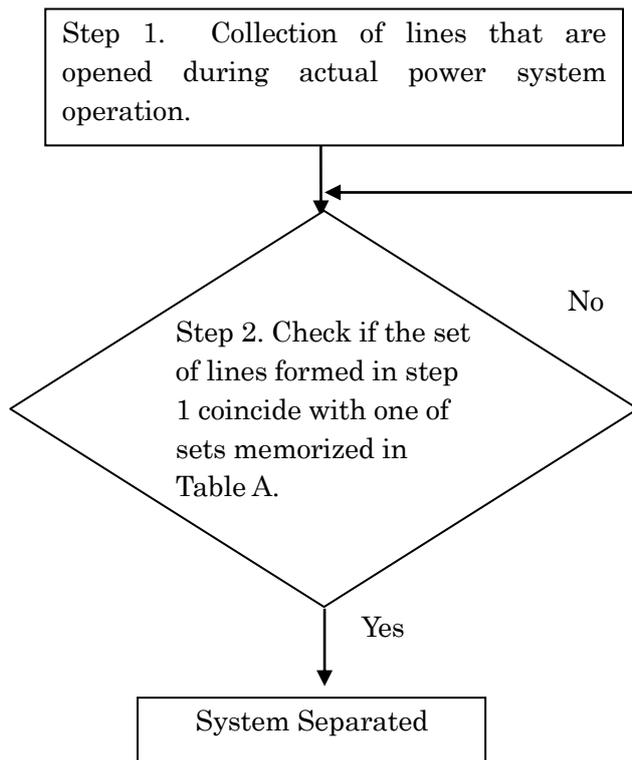


Fig.3 Procedure to detect power system separation by collecting lines that are opened during actual power system operation and finding if these lines coincide with lines memorized in the Table formed in Fig.2

統分離となるような線路の組み合わせを見つけため、グラフ理論に基づく方法を以下に述べる。

グラフ理論では、点とそれらをつなぐ線の集合をグラフという<sup>3)</sup>。例えば、電力系統は発電機と需要家などを点(ノード)、送電線を線(ブランチ)として表現した一種のグラフである。

全てのノードをつなぐグループを構成しないようにブランチの集合を「木」、 「木」を構成するブランチを枝路 (Edge)、そして枝路以外のブランチを連結枝 (Link) と呼ぶ。 Fig.4 の系統の太線が「木」、細線が連結枝である。

次に、基本カットセット (以下、基本CSと呼ぶ) について説明する。系統では、一つの枝路といくつかの連結枝を選び、これらを開にすると系統分離になる場合、これらの枝路と連結枝は基本CSと呼ぶ。例えば、 Fig.4 の系統においては枝路1と連結枝4、6を開放すると、系統は2つに分かれるので、ブランチ1、4、6は基本CSである。なお、基本CSのブランチ1、4、6とそれ以外のブランチ5を開放しても、系統

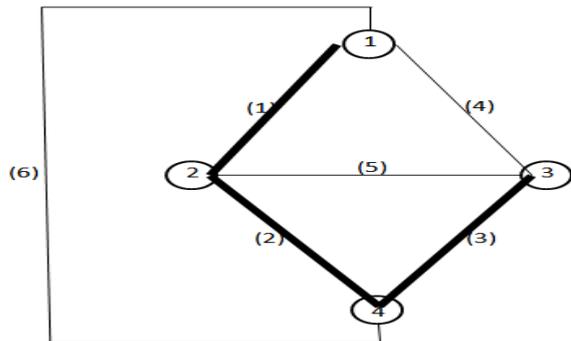


Fig. 4. Network with 4 nodes and 6 branches

Table 1. Principal Cut set.

Edge	Base Cutset
1	1, 4, 6
2	2, 4, 5, 6
3	3, 4, 5

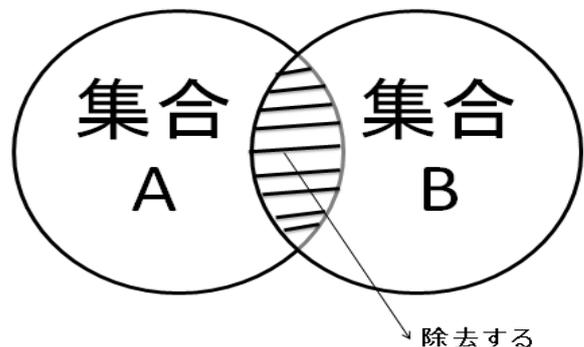


Fig. 5. System of A and B

分離となる。基本CSは系統分離になる最少数のブランチ数である。 Fig.4に示す系統では、枝路が3つであるので、基本CSは3つとなる。 Table 1にFig.4の系統の基本CSを示す。これ以降、1行目から3行目までの基本CSを各々基本CS1、基本CS2、基本CS3と呼ぶ。

### 〈2・2〉 基本CSを用いた系統分離判定方法

次に、基本CSを組み合わせることにより合成カットセット(以下、合成CSと呼ぶ)を求める方法を示す。

従来法<sup>4)</sup>は系統において全ての「木」から枝路を一つずつ選んで、各「木」ごとに、一つずつの基本CSを求めるものである。しかし、系統に「木」が多数あるので、計算量が膨大になる。

本稿では、一つの「木」の基本CSを用い、合成CSを求める方法を提案する。ブランチに

開と閉2つの状態がある。最初に、基本CS以外のブランチは全て閉の状態を想定する。次に、Table1.に示す基本CSが1, 2, 3と3つのグループがあるので、合成CSのグループ数は4つになる。合成CS1は基本CS 1と2, 合成CS2は基本CS 1と3, 合成CS3は基本CS 2と3, 合成CS4は基本CS 1と2と3である。基本CSの組み合わせの場合、ブール代数を用い、合成CSが得られる。次に、ブール代数を紹介する。Fig. 5に2つの集合AとBを示す。この2つの集合を一つの系統と想定する。交差する部分(斜線が示す部分)を除去すると、系統分離という、この一つの系統は2つの系統になる。残った部分をYとし、論理式は(1)で示す。

$$Y = (A + B) \cdot \overline{(A \cdot B)} \quad (1)$$

求めた論理式を用い、いくつかの組み合わせに用いる複数の基本CSの真理値表が作成できる。Table 2に基本CS 1と2を用い、合成CS1の真理値を求める例を示す。この場合、基本CS 1を集合Aとし、基本CS 2を集合Bとする。

開放したブランチの真理値を0, 閉の状態のブランチの真理値を1とする。基本CS 1に示す開放したブランチの番号は1, 4, 6, 基本CS 2に示す開放したブランチの番号は2, 4, 5, 6である。(1)によって、2つの入力の場合、両方が同じものである時に出力が0になる、両方が違うものである時に出力が1になる。その結果、合成CS1の真理値が得られた。真理値の値は1に対するブランチの番号を出力すると、1, 2, 5になる。それらは合成CS 1である。合成CS1に示すブランチ1, 2, 5を開放すると系統分離になる。合成CS 2と3も同じ方法で求める。特に、合成CS 4は、基本CS 1, 2, 3を用い、組み合わせるように、入力が3つになる。この複数の入力がある場合、0は奇数の時に出力が1になる、0は偶数の時に出力が0になる。そのように、4つの合成CSを求める。この合成CSは系統分離となる最少数のブランチから構成され、Table3に示す4番目のものになる。更に、基本CSの組み合わせることによって合成CSが作成できる。これらの基本CSと合成CSの合計カットセット(以下、合計CSと呼ぶ)は系統分離となる最少数のブランチから構成される。Table3にFig.4の系統の合計CSを示す。1行目から3行目までの基本CSが3つ、4行目から7行目までの合成CSが4つ、合計は7つである。合計CSの総数をZ, 基本CSの総数をn, 基本CSの組み合わせ数をmをとし、mは1からnの

Table 2. Truth Value

No.of Line	Base CS 1	Base CS 2	Compos e CS 1
1	0	1	1
2	1	0	1
3	1	1	0
4	0	0	0
5	1	0	1
6	0	0	0

Table 3. Cut Set representing every set of Cut set obtained by the proposed procedure

No.	ALL Cutset
1	1, 4, 6
2	2, 4, 5, 6
3	3, 4, 5
4	1, 2, 5
5	1, 3, 5, 6
6	2, 3, 6
7	1, 2, 3, 4

場合を対象とするので、Zは(2)で計算できる。Fig.4に示す系統に、基本CSの総数が3, それでnを3, mを1から3まで逐次に代入すると、Zは7になる。

$$Z = \sum_{m=1}^n {}_n C_m \quad (2)$$

### 3 シミュレーションによる有効性の確認 〈3・1〉モデル系統

Fig.6に示すEAST10モデルの発電機ノードを除去し、残った部分のみから構成した系統を計算の対象とした。作成した系統の放射状以外の部分に回路数が5, 基本CSが14, (2)を用い、計算すると合計CSが16383になる。また、いずれの場合もEAST10モデルにおいてFig.6の斜線が示すブランチ30, 31, 34が開となるケース1を想定した。ケース2の場合、EAST10モデルにおいてFig.6の斜線が示すブランチ19, 21, 30, 31, 34が開

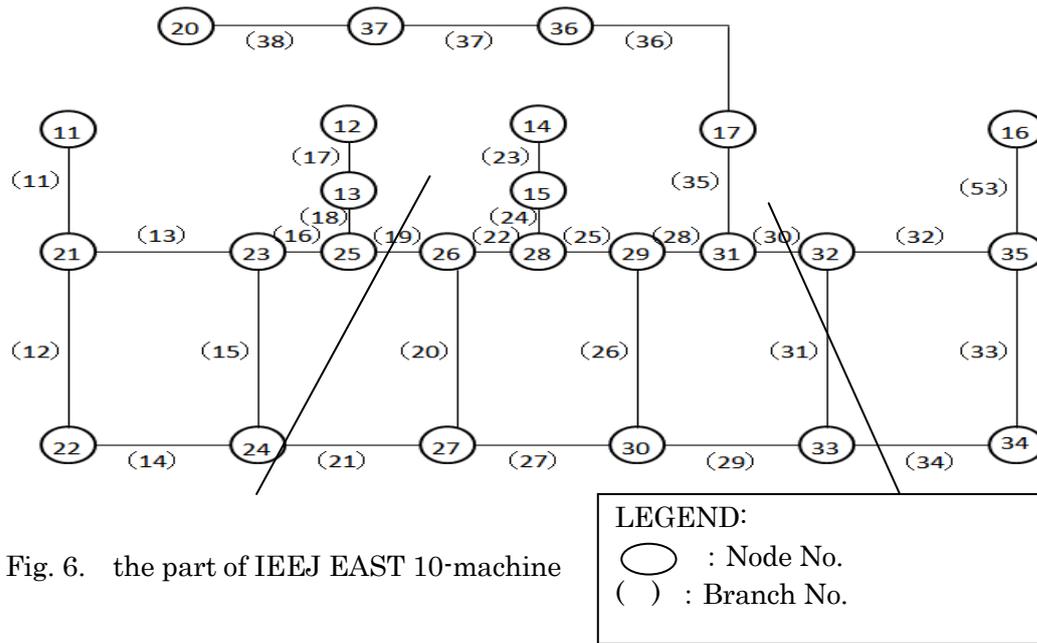


Fig. 6. the part of IEEE EAST 10-machine

Table 4. Group of generators that are belonged to any one of the separated power systems.

Group 1 (Total 21)	Group 2 (Total 4)
11, 21, 22, 23, 24, ...	35, 32, 34, 16

Table 5. Estimate of the generator groups.

Group 1 (Total 8)	Group 2 (Total 13)	Group 3 (Total 4)
11, 21, 22, 23, 24, ...	14, 15, 26, 28, ...	16, 32, 34, 35

となるケースを想定した。

### 〈3・2〉 系統分離判定

使用したPCはpentium4 (3.60GHz) でメモリ1GBである。作成した系統はブランチ数が28, ノード数が25の系統である。計算時間は0.031秒である<sup>6)</sup>。ケース1を用い, 2つの系統を分離したと判断する結果はTable4に示す。ケース2の場合, 3つの系統を分離したと判断する結果はTable5に示す。つまり, 分離した系統が複数の場合についても, 提案した方法有効であることを検証した。

## 4 まとめ

本稿では, 広域停電を防止するために, グラフ理論を用い, ブランチの開閉状態から系統分離を判断する手法を提案した。また, 電気学会EAST10モデルを基にしたモデル系統でシミュレーションを行い, 提案法の有効性を検証することができた。

系統においてブランチ数が多くなると, 全ての合計CSの計算することは困難である。今後は, 本手法を用い, 多数のブランチがある系統で, 高速な系統分離したと判断できる方法を開発する予定である。

### 「参考文献」

- 1) 北米北東部停電調査団, 「2003年8月14日北米北東部停電事故に関する調査報告」, エネルギー庁, 2004年3月
- 2) 坂入利保, 佐藤正弘, ”電力系統における需給アンバランスを最小化する系統分離線路の選定法”, 電気学会論文誌B, 130巻, No. 1, P17~24, 2010
- 3) 成田誠之助: 「システム工学の手法—システム問題解決の基礎理論」, pp. 49-59 (1970)
- 4) 戸川隼人: 「ザ・FORTRAN77」, サイエンス社, pp. 001-144 (2006)
- 5) 関博, 佐藤正弘, ”グラフ理論を用いた系統分離の検出方法”, 電気学会, 電力・エネルギー部門大会講演論文集 (CD・ROM版収録NO. 109) (2014)