

500kV変電所における誘導電圧・電流の計算

東京電力株式会社 北東京電力所	石	川	圭	司
〃	安全部	枝		司
〃	工務部	財	満	英
高岳製作所名古屋事業所 開発部	広	瀬	英	雄

内 容 梗 概

500kV変電所において使用される接地用具の電気的安全性を再確認する基礎資料を得るため、構内の誘導電圧、電流の分布を計算するプログラムの開発を行い、実際の変電所の運転状態を模擬し計算を行った。この結果、現在使用されている移動式作業用接地装置の電気的安全性が再検証された。

1. ま え が き

変電所において、母線の一部やしゃ断器を点検する際に停止された母線や送電線は誘導を受け、線路端が開放されていれば静電誘導電圧が誘起され、接地されていれば電磁誘導電流が流れる。したがって、接地装置はこの誘導作用からの安全性が保障されていなければならない。そこで、この安全性を再確認する基礎資料を得るため、実際の運転状態を模擬した500kV変電所について誘導電圧・電流の計算を、新しく開発した変電所誘導計算プログラムを用いて行った。

計算対象変電所としては、東京電力株式会社新古河変電所、新多摩変電所を選び、甲2母線、乙1母線、甲1、甲2母線の停止、送電線の停止、主要変圧器の停止の各場合について誘導電圧、電流を計算した。潮流は予想される最大値または実績の最大値をとった。

計算の結果、いずれの場合についても接地装置は誘導作用から安全であることが再確認された。

2. プログラム開発方針

500kV変電所構内では、多数の母線が立体的に複雑な配置をとっているため、構内母線の誘導電圧、電流を求める基本式は単純であっても、データ量が多いため計算ははん雑になることが予想される。したがって、プログラ

ム開発のアプローチとして、第1に計算誤りをなくすデータ構造、プログラム構造を考えた。また、多くの500kV変電所について、異なった計算条件のもとに計算を行うことを考慮して、第2に汎用性をもたせることとした。

通常、回路網を計算する汎用のプログラムには幾何学的データを加味したものは少なく、回路網のインピーダンス、起電力、回路に流入(出)する電流のすべてを入力する形式をとっている。ところが、今回のように母線の幾何学的配置が計算の重要な要因となる場合には、この幾何学的データ自身を入力データとすることが望ましい。したがって、入力データを幾何学的データと電気的データの2つに分け、グラフィックディスプレイを使って幾何学的データのチェックが終了してから電気的なデータを付加し、計算を行う方式とした。

3. 基 本 式

3.1 自己インダクタンス

自己インダクタンス L の計算式は、(1)式のとおりである。

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\log_e \frac{2l}{R} - 1 \right) \quad [H] \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $\mu_0 : 4\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]}$

$l : \text{線路長 [m]}$

R : 等価導体半径 [m]

3.2 相互インダクタンス

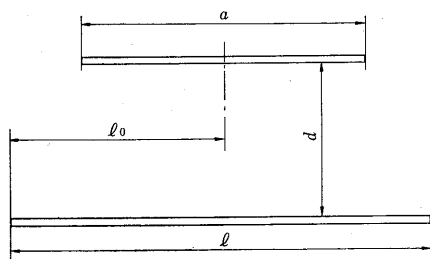
2母線間の相互インダクタンス M の計算式は、(2)式のとおりである。

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[A \log_e \frac{A + \sqrt{A^2 + d^2}}{d} - B \log_e \frac{B + \sqrt{B^2 + d^2}}{d} - C \log_e \frac{C + \sqrt{C^2 + d^2}}{d} + D \log_e \frac{D + \sqrt{D^2 + d^2}}{d} - \sqrt{A^2 + d^2} + \sqrt{B^2 + d^2} + \sqrt{C^2 + d^2} - \sqrt{D^2 + d^2} \right] \quad [H] \dots \dots (2)$$

ただし、 $A = l_0 + \frac{a}{2}$, $B = l_0 - \frac{a}{2}$

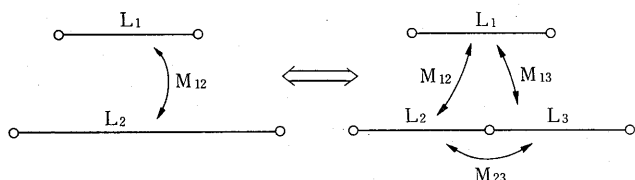
$$C = l - l_0 - \frac{a}{2}, \quad D = l - l_0 + \frac{a}{2} \quad [m]$$

であり、 l, l_0, a, d は第1図に示すとおりである。



第1図 2母線間の相互インダクタンス

$d=0$ の場合、すなわち、2母線が同一直線上にある場合(2)式の d を等価導体半径 R におきかえて M を求める。自明なことであるが、第2図のような操作が可能である。



第2図 同一直線上にある2母線の相互インダクタンス

3.3 静電容量

平行等長母線が空間に位置する場合の静電容量の算出電位係数 p_{ij} は次の式で与えられる。

$$p_{ij} = 2 \log_e \frac{2h_i}{r} \times 9 \times 10^9 \quad [m/F] \quad (i=j)$$

$$p_{ij} = \log_e \left(1 + \frac{4h_i h_j}{d_{ij}^2} \right) \times 9 \times 10^9 \quad [m/F] \quad (i \neq j)$$

r : 等価導体半径 [m]

d_{ij} : 導体間距離 [m]

h_i : 大地からの導体の高さ [m]

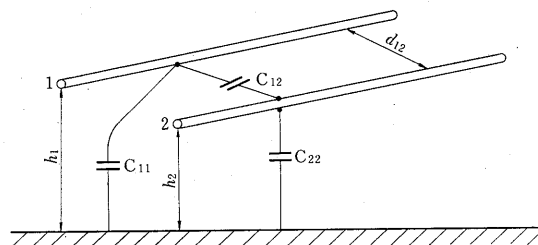
$P = (p_{ij})$, $K = P^{-1}$ とするとき、 k_{ij} は

k_{ij} : 静電容量係数 ($i=j$)

: 静電誘導係数 ($i \neq j$)

とよばれる。静電容量 C は(3)式のとおりである。

$$C_{ij} = \begin{cases} \sum_l k_{il} & (i=j) \\ -k_{ij} & (i \neq j) \end{cases} \dots \dots (3)$$



第3図 静電容量

4. 算 法

4.1 電磁誘導の算法

計算に汎用性をもたせるため、計算入力条件は母線、送電線の配置、潮流状態、線路形状、材質のみとし、算譜の中に方程式を算式の形で含まない。なお、線路要素はすべて直線とみなし、異なる線路要素は平行であるか、垂直に交わっているかのいずれかであるとする。

潮流分布を求める節点方程式、電磁誘導電流を求める閉路方程式は、GAUSSの消去法に従って解く。

4.1.1 入力データ構造

計算誤りをなくすためと、プログラムに汎用性をもたせるために、以下の様な入力データ構造にした。

(a) MATERIALS : 線路の材質、形状を表わし、以下の項目をもつ。

- ID : 識別子
- NN : 導体数
- RR : 素導体半径
- SS : 素導体間距離
- RO : 素導体単位長抵抗
- MU : 透磁率

(b) NODES : 線路端の座標値を表わし、以下の項目をもつ。

- ID : 識別子
- X : x座標値
- Y : y座標値
- Z : z座標値

(c) ELEMENTS : 線路の持つ MATERIAL, NODE の組、誘起電圧、線路電流を表わし、以下の項目をもつ。

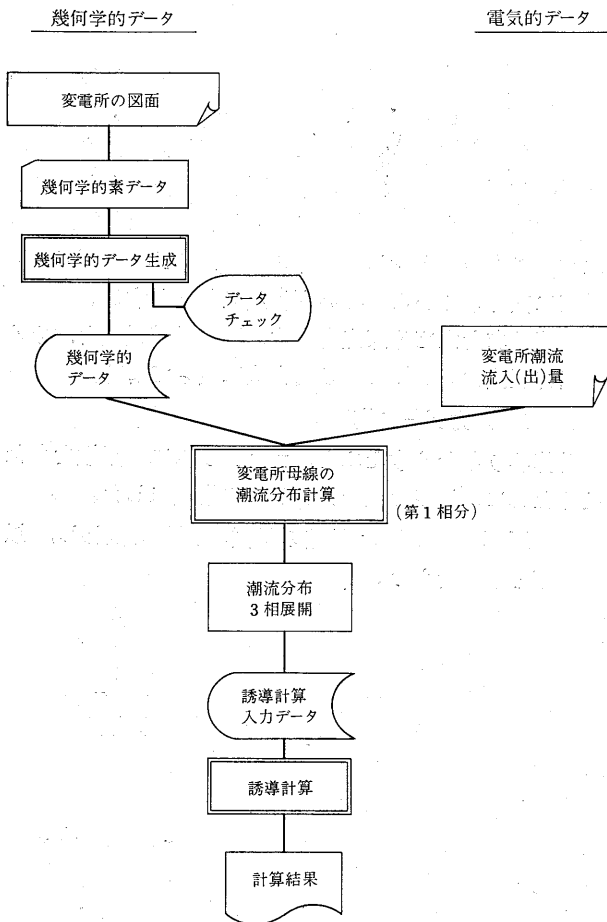
- ID : 識別子
- M : MATERIAL ID
- S : ELEMENT の始点 ID
- E : ELEMENT の終点 ID
- I : ELEMENT の電流

(d) FLOWS: 線路端に流入(出)する電流を表わし、以下の項目をもつ。

- ID: 識別子
- N: NODE ID
- I: 流入(出)電流

(e) EQUATIONS: 誘導を受ける線路の一連を表わし、以下の項目をもつ。

- ID: 識別子
- M: MATERIAL ID
- R: 接地抵抗値
- Ni: NODE ID



第4図 計算工程図

4.1.2 計算工程

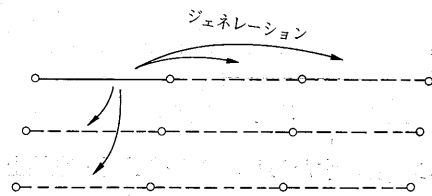
計算の手順は、第4図に示すような方法で行なった。入力データを幾何学的データと電気的データの2つに分け、これを合成したものを誘導計算プログラムを入力データとした。

入力データのミスは、①幾何学的データの生成、②潮流分布計算、③誘導計算の3つのブロックで取り除かれる。

(1) 幾何学的データの作成

変電所の母線を電流の異なる部分に分けると、それらの要素は約300個になるが、これらは規則的に配置されている。したがって、これらの要素の位置を誤りなく計算機に記憶させるためには、母線の配置図を描くに必要最小限のデータのみを作成し、すべてのデータはそのデータから生成させることが望ましい。このデータをジェネレーター、生成操作をジェネレーションとよぶ。

生成されたデータをグラフィック化し、これをもとに幾何学的なデータの大まかな目視チェックを行い、データが正しければ、それをディスク装置へ記憶する。

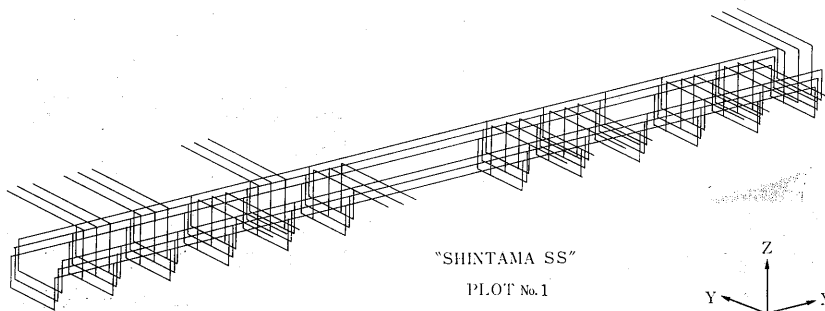


第5図 幾何学的データジェネレーション

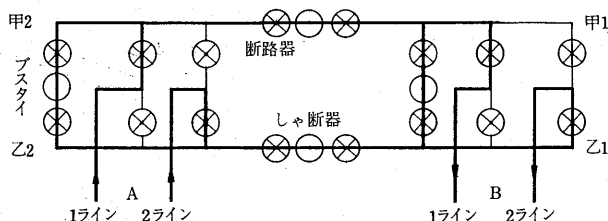
(2) 潮流分布の計算

変電所構内の母線は、甲1、甲2、乙1、乙2の4つの大きな母線から構成されており、送電線からの流入(出)する電流はこれらの母線をバランス良く流れるように、通常は1甲2乙(送電線#1ラインは甲母線、#2ラインは乙母線)の原則で断路器の開閉を行っている。このとき、ブスタイの断路器、しゃ断路器が閉じていれば、母線の各部に流れる電流の大きさは母線のインピーダンスのバランスで決定される。

正確には、3相同時に各相の相互誘導も考慮しながら電流分布を求めなければならないが、変電所母線の自己



第6図 幾何学的データ出力例



第7図 潮流分布の計算

インダクタンスと相互インダクタンスを比較した場合、自己インダクタンスの方が十分大きいので、相互誘導効果を無視し、単相扱いとして電流の分布を求め、これを3相展開することにした。

単相回路の潮流の分布は節点方程式によって求める。節点方程式は、第8図に示すような回路網で次の方程式を解くものである。

$$(G)\{V\} = \{I\} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 G ：線路のコンダクタンス（既知）

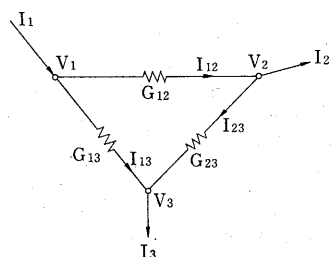
V ：節点の電位（未知）

I ：節点に流入（出）する電流（既知）

である。

このとき、マトリックス(G)、ベクトル(I)は先の幾何学的データと、送電線端に流入（出）する電流をもとに計算機内部で自動的に作成される。節点の電位が求められると母線各部に流れる電流は次の式で計算できる。

$$I_{ij} = (V_j - V_i) \times G_{ij} \dots \dots \dots (4)$$



第8図 節点方程式

(3) 誘導電圧・電流の計算

潮流分布の計算により、運転母線各部に流れる電流の大きさが分かったので、今度はこの情報をもとに、停止母線各部の電位、電流容量を求める。

停止母線は、運転母線の電流により電磁誘導を受け、起電力を発生する。停止母線は母線の両端が接地してあれば、この起電力によって誘導電流が流れる。

$$\{E\} = (j\omega M)\{i\} \dots \dots \dots (5)$$

$$\{Z\}\{I\} = \{E\} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 E ：電磁誘導による起電力

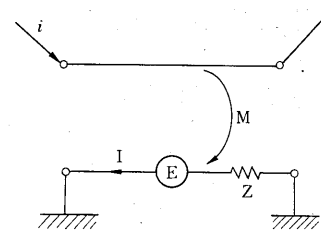
M ：相互インダクタンス

i ：運転母線の電流

Z ：停止母線のインピーダンス

I ：停止母線の誘導電流

である。ここでもこの方程式は自動的に作成される。



第9図 誘導電圧、電流の計算

4.2 静電誘導の算法

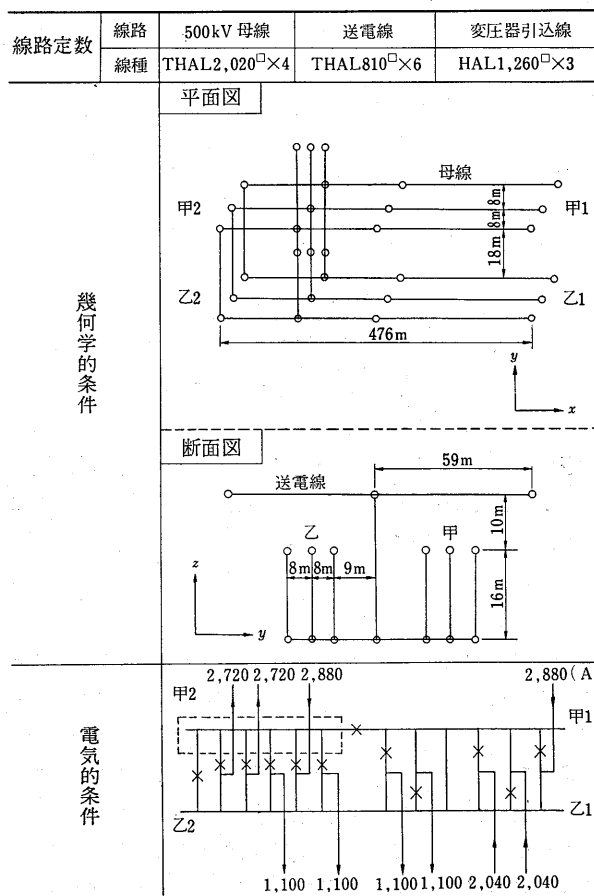
電磁誘導計算の場合、運転母線に流れる電流値が場所によって異なっているので、線路要素を細かく分割する必要があるが、静電誘導の場合、運転母線、両端開放の停止母線ともに、母線上では同電位にあるので、計算対象とする線路要素の数は少なくなる。ここでは、停止母線電位を未知電位とする節点方程式を立て、静電誘導電圧を求める。方程式は自動的に作成される。

5. 計算例

東京電力(株)新多摩変電所における、昭和62年度予想最大潮流の場合について計算を行った。

5.1 電磁誘導の計算例

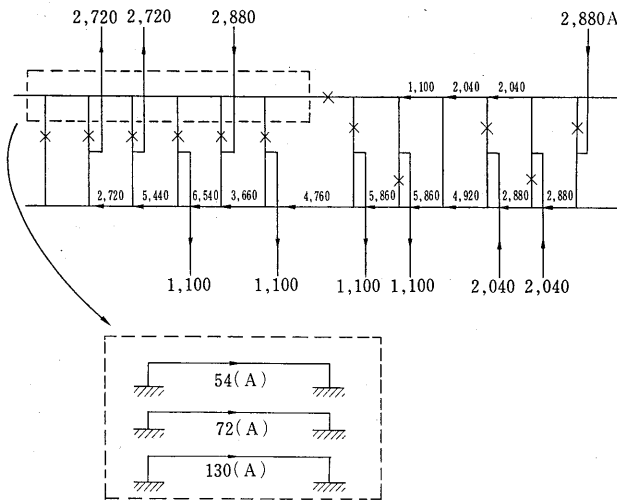
停止母線として、甲2母線を選び電磁誘導の計算を行



第10図 電磁誘導計算入力条件

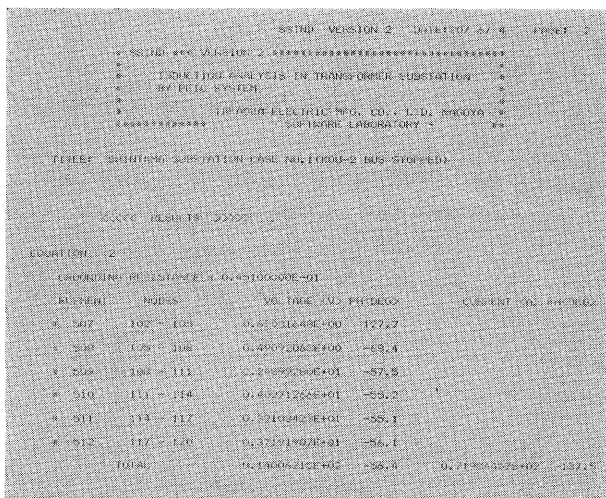
う。母線、送電線の幾何学的、電気的入力条件は第10図に示すとおりである。

潮流分布、電磁誘導電流の計算結果を第11図に示す。



第11図 潮流分布、電磁誘導電流計算結果

また、計算結果の出力例を第12図に示す。



第12図 電磁誘導計算結果出力例

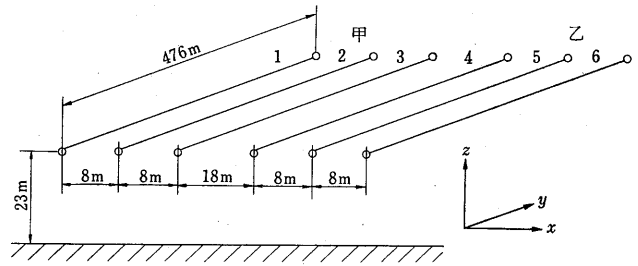
5.2 静電誘導の計算例

停止母線として、乙母線を選び静電誘導の計算を行う。母線の幾何学的、電気的入力条件と計算結果を第13図に示す。

6. 移動式作業用接地装置の電気的安全性

新古河変電所、新多摩変電所において停止線の電磁誘導を計算した結果、甲2母線、乙1母線、甲1甲2母線停止の各場合が送電線、主要変圧器停止の場合に比べて、誘導電圧、電流が大きかった。第2表に各母線停止時の誘導電圧、電流の計算結果を示す。

このうち、最も厳しい新多摩変電所乙1母線停止時を想定して、移動式接地装置を併用した場合の誘導電圧、電流の計算結果を第2表に示す。



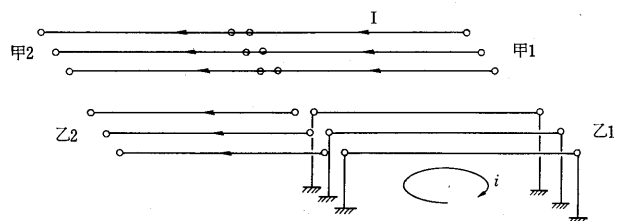
線番号	電圧 [kV]	位相 [度]
1	500/√3	0
2	500/√3	120
3	500/√3	240
4	30	12
5	19	12
6	12	12

第13図 静電誘導の計算例

これより、移動式接地装置を流れる電流は110A以下であり、接地装置は電流容量的に安全であることを再確認した。

第1表 母線の誘導電圧・電流

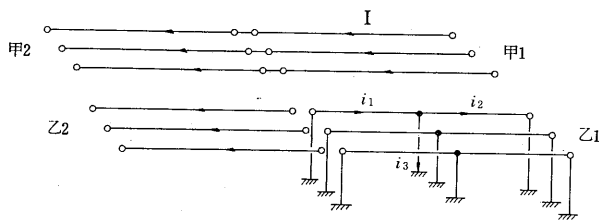
計算項目		計算結果		
変電所	潮流	停止母線	最大誘導電圧 (V)	最大誘導電流 (A)
新古河	昭和54年7月25日14時	甲2母線	23	150
		乙1母線	8	90
		甲1, 甲2母線	28	110
新多摩	昭和62年度予想最大	甲2母線	18	130
		乙1母線	21	300
		甲1, 甲2母線	43	200



第14図 乙1母線停止、両端接地時の誘導

第2表 母線の誘導電圧・電流 (中間点接地の場合)

計算項目		計算結果				
変電所	潮流	停止母線	最大誘導電圧 (V)	i ₁ (A)	i ₂ (A)	i ₃ (A)
新多摩	昭和62年度予想最大	乙1母線	21	250	140	110



第15図 乙1母線停止，両端接地に移動式接地を併用したときの誘導

7. あとがき

今回のような計算プログラムの開発にあたっては、良いアルゴリズムを考えることと、そのアルゴリズムの実

現を可能にする入力データの構造が最も重要である。また、アルゴリズムを考える人とプログラム製作担当者が異なる場合、アルゴリズム記述も明確にする必要がある。今回の計算仕様書のアルゴリズムは言語 PASCAL で書かれており、アルゴリズムの伝達はスムーズに行なわれた。プログラムはフォートランで書かれ約2000ステップであった。

最後に、今回の計算にあたり、入力データを提供してくださった新古河変電所、新多摩変電所の各位、プログラム開発に協力していただいた関係各位に深謝する。