

パーソナルコンピューターを使ったサージ解析プログラムの開発

久米川 宏*・宮崎 習**・宇都宮伸宏*
松村喜治***・高野三郎***・入沢寿逸***

Development of a Surge Analysis Program with a Personal Computer

Hiroshi KUMEKAWA, Shyu MIYAZAKI, Nobuhiro UTSUNOMIYA, Yoshiharu MATSUMURA,
Saburo TAKANO, and Juichi IRISAWA

Resently, an increse of system scale, large capacity, and extra-high voltage of system equipment has been developed in power systems. Therefore, the analysis of surge phenomena are extremely important to the decrease of insulation level.

Presently, ELECTRO-MAGMETIC TRANSIENS PROGRAM (EMTP), the transient phenomena analyses program, is used for analysing surge phenomena. However, EMTP can be used only by the large-scale computer, and it has some problems such as the difficulties of making the input datas, modelling networks, and considering the frequency dependence.

In this paper, the programs that can be used by personal computers are developed. Model networks are composed of frequency dependant transmission lines, nonlinier elements of R and L, an arresters with nonlinierlity, and a saturable transformer.

Key words: Surge anaiysis/ Frequency dependence/ Personal computer

1. 緒 言

電力系統におけるサージ現象の解析は、電源容量、ならびに、系統規模の増大に伴う線路設備、または、系統機器の大容量化・超高圧化、および、それらの合理的設計による絶縁レベルの低減を図るために極めて重要な課題である。

現在、サージ解析を行う場合、解析のための計算プログラムとしては、汎用過渡現象解析プログラム、俗称“EMTP”¹⁾が広く一般に利用されている。しかしながら、EMTPは大型機専用プログラムであり、さらに、入力データ作成の際の困難さ、解析対象のモデル化、あるいは多相線路での周波数依存効果の導入などといった点に課題を残している²⁾。

本研究では、従来、導入が困難とされていた、線路の周波数依存効果を考慮するとともに、非線形要素、避雷器の動作等を含む、パーソナル・コンピュータで

も取り扱い可能な総合的なサージ解析プログラムを開発した。

2. 周波数応答線路

電力系統のサージ解析を行う場合、表皮効果のため分布定数線路の定数が周波数によって大きく変化し、進行波もこれの影響を受けて減衰・変歪することを考慮せねばならない²⁾³⁾。

線路定数が周波数に依存することを考慮にとつて、分布定数線路の電圧・電流特性を解析する場合の基本的考え方を以下に述べる。

時間領域における任意の入力波形は、周波数領域で1つのスペクトルであらわすことができる。この入力波形スペクトルのそれぞれの周波数に対する線路の伝搬特性は、波動方程式を解くことによって周波数領域で求めることができる。各周波数に対しては重ねの理が成り立つから、この出力波形スペクトルを時間領域に戻せば出力波形の時間関数を求めることができる。この場合、線路定数の周波数特性は、固定した周波数に対する電圧・電流を求めるときに考慮することができる。

原稿受付：昭和63年3月31日

*日新電機㈱

**四国電力㈱

***長岡技術科学大学電気系

Fig. 1 の分布定数線路において、各周波数 ω の正弦波に対する電圧、電流をベクトルで表現して、それぞれ、 $V_k(j\omega)$, $I_k(j\omega)$, $V_m(j\omega)$, $I_m(j\omega)$ と現すと、この線路の角周波数 ω におけるサージインピーダンス Z_0 、伝搬定数 γ は次式(1), (2)であらわされる。

$$Z_0(j\omega) = \sqrt{\frac{r(\omega) + j\omega l(\omega)}{g(\omega) + j\omega c(\omega)}} \quad (1)$$

$$\gamma(j\omega) = \sqrt{\{r(\omega) + j\omega l(\omega)\}\{g(\omega) + j\omega c(\omega)\}} \quad (2)$$

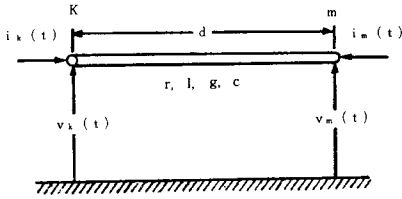


Fig. 1 Distributed-constant Line

また、ノード k , m における電圧・電流は次のように関係づけられる。

$$V_k(j\omega) = \cos h(\gamma d) * V_m(j\omega) - Z_0 \sin h(\gamma d) * I_m(j\omega) \quad (3)$$

$$I_k(j\omega) = \sin h(\gamma d) * V_m(j\omega) / Z_0 - \cos h(\gamma d) * I_m(j\omega) \quad (4)$$

ここで、この分布定数線路の電圧・電流特性を $v_k(t)$, $i_k(t)$, $v_m(t)$, $i_m(t)$ であらわす代わりに、次式で定義される $b_k(t)$, $f_k(t)$, $b_m(t)$, $f_m(t)$ という関数を用いてあらわす。

$$b_k(t) = v_k(t) - z_1 i_k(t) \quad (5)$$

$$f_k(t) = v_k(t) + z_1 i_k(t) \quad (6)$$

$$b_m(t) = v_m(t) - z_1 i_m(t) \quad (7)$$

$$f_m(t) = v_m(t) + z_1 i_m(t) \quad (8)$$

$$\text{ここに、} z_1 = \lim z_0(j\omega) \quad (9)$$

さて、 $b_k(t)$, $f_k(t)$, $b_m(t)$, $f_m(t)$ の角周波数 ω に対するベクトルを、それぞれ、 $B_k(j\omega)$, $F_k(j\omega)$, $B_m(j\omega)$, $F_m(j\omega)$ とすれば、式(5), (6), (7), (8)から、次式(10), (11), (12), (13)を得る。

$$V_k(j\omega) = \{F_k(j\omega) + B_k(j\omega)\} / 2 \quad (10)$$

$$I_k(j\omega) = \{F_k(j\omega) - B_k(j\omega)\} / 2Z_1 \quad (11)$$

$$V_m(j\omega) = \{F_m(j\omega) + B_m(j\omega)\} / 2 \quad (12)$$

$$I_m(j\omega) = \{F_m(j\omega) - B_m(j\omega)\} / 2Z_1 \quad (13)$$

式(10)–(13)を、式(3), (4)に代入して整理すれば、次式(14), (15)を得る。

$$B_k(j\omega) = A_2(j\omega)F_k(j\omega) + A_1(j\omega)F_m(j\omega) \quad (14)$$

$$B_m(j\omega) = A_1(j\omega)F_k(j\omega) + A_2(j\omega)F_m(j\omega) \quad (15)$$

ここで、 $A_1(j\omega)$, $A_2(j\omega)$ はノード k , m における電圧・電流に無関係な周波数のみに依存する線路に固有なパラメータであり、次式(16), (17)であらわされる。

$$A_1(j\omega) = \left\{ \cos h(\gamma d) + \frac{1}{2} \left(\frac{z_1}{z_0} + \frac{z_0}{z_1} \right) \sin h(\gamma d) \right\}^{-1} \quad (16)$$

$$A_2(j\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{z_0}{z_1} - \frac{z_1}{z_0} \right) \sin h(\gamma d) * A_1(j\omega) \right\} \quad (17)$$

式(16), (17)で定義した $A_1(j\omega)$, $A_2(j\omega)$ の時間関数を、フーリエ逆変換によって、次式(18), (19)とする。

$$a_1(t) = \mathcal{F}^{-1}\{A_1(j\omega)\} \quad (18)$$

$$a_2(t) = \mathcal{F}^{-1}\{A_2(j\omega)\} \quad (19)$$

これにより、任意の波形の前進波 $f_k(t)$, $f_m(t)$ によって作り出される後進波の時間関数 $b_k(t)$, $b_m(t)$ は、次式(20), (21)によって与えられる。

$$b_k(t) = \int_0^\infty \{f_m(t-u)a_1(u) + f_k(t-u)a_2(u)\} du \quad (20)$$

$$b_m(t) = \int_0^\infty \{f_k(t-u)a_1(u) + f_m(t-u)a_2(u)\} du \quad (21)$$

式(20), (21)をみると、関数 $a_1(u)$, $a_2(u)$ は $f_k(t-u)$, $f_m(t-u)$ に対する重みづけ関数としての働きを果たしていることがわかる。

3. 解析手法

解析に用いた手法は、進行波法の中の、Schnyder-Bergeron 法である。線路定数の周波数依存効果に対しては、重みづけ関数を用いる Weighting-function 法を導入した。

Bergeron 法は西ドイツで開発されたサージ現象のデジタル解析法であり、計算の簡易さ、効率の良さ、などといった特徴を持ち、サージ計算の主流となっている最も信頼のおける手法の1つである¹⁾。

3.1 定電流の電流値の数値計算手法

手法1——重みづけの関数をそのまま用いる

式(20), (21)の積分値を数値的に実行する場合、隣接する時刻 t , $t + \Delta t$ 間で $f(t-u)$ を

直線で近似し, $b_n(t)$, $b_m(t)$ の計算を行う.
この場合重みづけ関数は, そのままの形で積分される.

手法2 — 重みづけ関数を数値積分した波形の傾きを用いる

手法1の方法では式(20), (21)の計算を行う場合, 乗算の回数は, 解析時間を $t = N \cdot \Delta t$ とすると時間刻みの総数 N にほぼ比例する. しかし, 重みづけ関数の代わりに

$$S(u) = \int_0^u a(u) du \quad (22)$$

なる関数を定義すれば

$$a(u) = S'(u) \quad (23)$$

となる. ここで, 関数 $S(u)$ を折れ線近似し, その値を計算に用いると, 式(20), (21)の計算に要する乗算の回数は $S(t)$ を折れ線近似するときの区間 M と等しくなる. よって手法1と比して乗算の回数は M/N となり計算時間が大幅に短縮される.

手法3 — 線路を損失線路とし, 入力に step 応答波形を用いる

重みづけ関数を用いず, step 関数を入力サージとした場合の損失, 歪線路での応答波形を, 入力波形とすることにより, 線路の周波数依存効果の導入をはかる.

以上の3つの方法により, 線路定数の周波数依存性を考慮した解析を行った.

4. モデル系統

解析に用いたモデル系統, 及び, その Bergeron 等価回路を Fig. 2, 3 に示す.

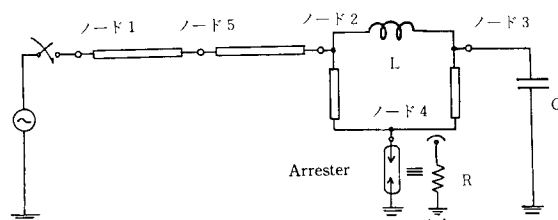
ただし, L は開閉器の持つインダクタンス, C は変圧器のストレージ・キャパシティをあらわす.

Fig. 2 において, ノード4の避雷器の動作は考えず, 線路に歪成分がないものとした.

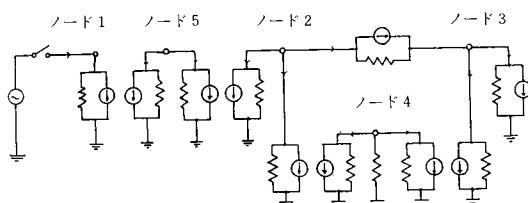
Fig. 3 は Fig. 2 の単線条線路を三相にしたものである. ただし, R , L は非線形要素とし, 線路は歪成分を持っているものとする. さらに, 避雷器も動作可能である.

5. 解析結果および考察

Fig. 4 (a), (b), (c), (d) に重みづけ関数の波形を示す.

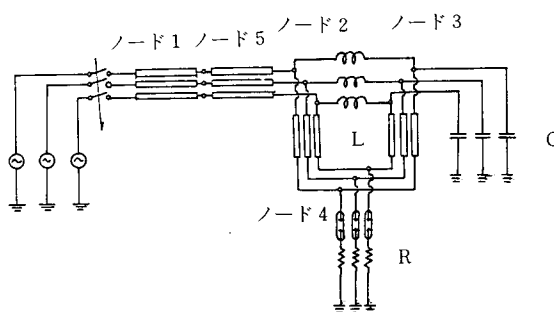


(a) Model Network

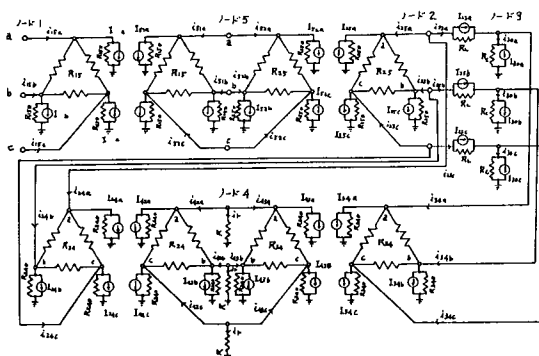


(b) Equivalent circuit

Fig. 2 Single Phase Network Model



(a) Model Network



(b) Equivalent circuit

Fig. 3 Three Phases Network Model

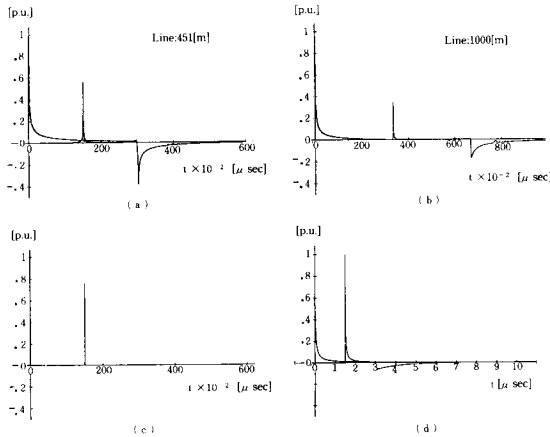


Fig. 4 Weighting Function

Fig. 4 (a), (b)は理論に従って、重みづけ関数 $a_1(t)$, $a_2(t)$ を計算した波形である。

線路長を変えた場合、線路が長いほど表皮効果による減衰が大きいことが確かめられた。

ここで、重みづけ関数の影響をみるために、Fig. 4 (c), (d)のような重みづけ関数を考える。Fig. 4 (c)は低周波成分、(d)は高周波成分の影響をみるための波形である。

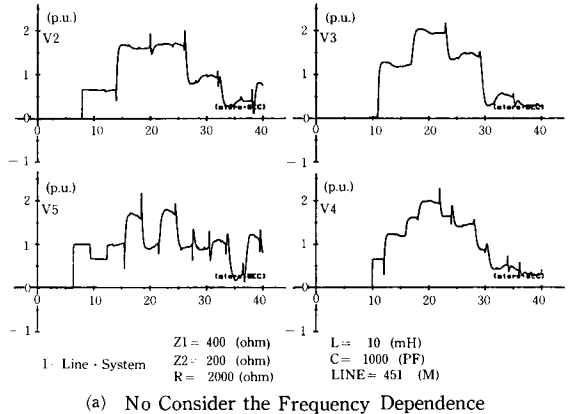
Fig. 5 (a), (b)に単条線路モデルにおける解析結果の代表的な波形を示す。

Fig. 5 (a), (b)両者の波形の比較より、周波数依存性を考慮した場合、サージの特徴である反射波の影響が少なく、波形が滑らかになっているのがわかる。

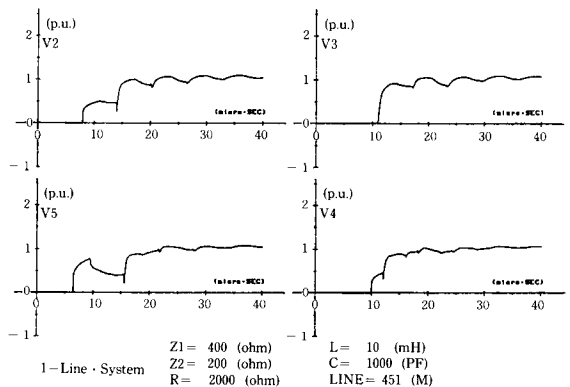
また、Fig. 4 (c), (d)の重みづけ関数を用いることにより、低周波成分が波形の概要を決定づける大きな要因となっていること、高周波成分が多くなると波形が滑らかになることがわかった。

手法1, 手法2を用いた解析波形はよく一致した。若干の違いがみられるのは、重みづけ関数の微積分時に生じた誤差のためである。また、手法2の方が手法1に比べ、計算速度が大幅に早い (1/10 以下) ため、実用的であるといえる。

手法1, 手法3を用いた解析波形を比較すると、波高、高周波部分の減衰といった点では似ているが、形状には違いがみられる。これは手法3の場合、重みづけ関数 $a_2(t)$ にあられる反射波を全く考慮しないことから生じる差異である。よって手法3は反射波の影響の少ない長距離線路において有効であるといえる。



(a) No Consider the Frequency Dependence



(b) Consider the Frequency Dependence

Fig. 5 Wave Forms of Analysis (Single Phase)

Fig. 6 (a), (b)に三線条モデルにおける解析結果の代表的波形を示す。それぞれ、 $t = 5[\mu\text{sec}]$ で三相交流を印加したときの波形である。三相の解析にあたっては、モード変換²⁾⁵⁾を利用し、単相と同様の解析を行えるようにした。

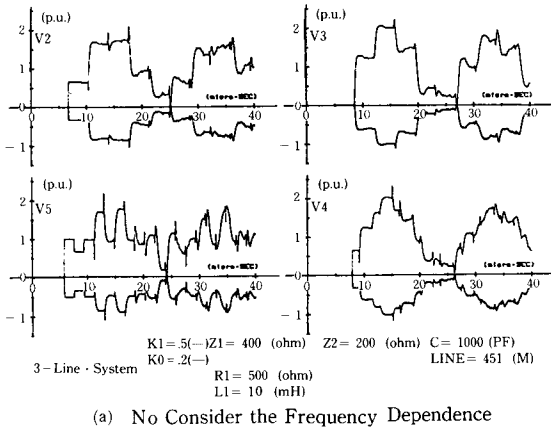
Fig. 6 (a), (b)両者の比較により周波数依存性の考慮によってサージが抑えられ波形が滑らかになっているのがわかる。

避雷器を動作させた場合も、サージが抑制されているのがわかった。

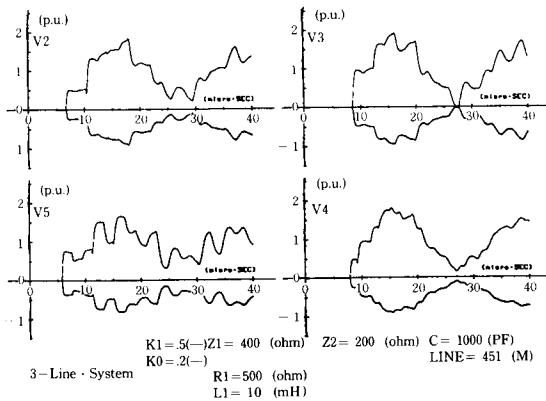
また、 $R \cdot L$ の非線形性や線路歪みを考慮した場合も、サージが抑制される。さらに、線路の否みのため、波形に脈動が多いことも確かめられた。

各手法による計算時間 (解析時間 $40[\mu\text{sec}]$, 線路長 $415[\text{m}]$) を Table 1 に示す。

解析に用いたのは、HEWLETT-PACKARD 社、HP9000 シリーズ 200 である。



(a) No Consider the Frequency Dependence



(b) Consider the Frequency Dependence

Fig. 6 Wave Forms of Analysis (Three Phases)

Table 1. Calculation Time (sec)

Frequency Dependence		Singl Phase	Three Phases
No Consider		16	119
Consider	method 1	396	1416
	method 2	34	155
	method 3	996	1098

6. 結 言

(1) 三線条線路モデルにおいて、損失線路、歪線路、避雷器の動作、非線形抵抗、非線形インダクタンス、および、線路定数の周波数依存性を考慮し得る、パーソナル・コンピュータで取り扱い可能なプログラムを開発した。

(2) 周波数依存性の考慮にあたり

手法 1 —— 重みづけ関数をそのまま用いる

手法 2 —— 重みづけ関数を数値積分した波形の傾きを用いる

手法 3 —— 入力に step 応答波形を用いる
以上 3 通りの方法が可能であり、

手法 1 —— 精度は良いが計算時間大

手法 2 —— 精度はやや劣るが計算時間小

手法 3 —— 長距離線路に有効

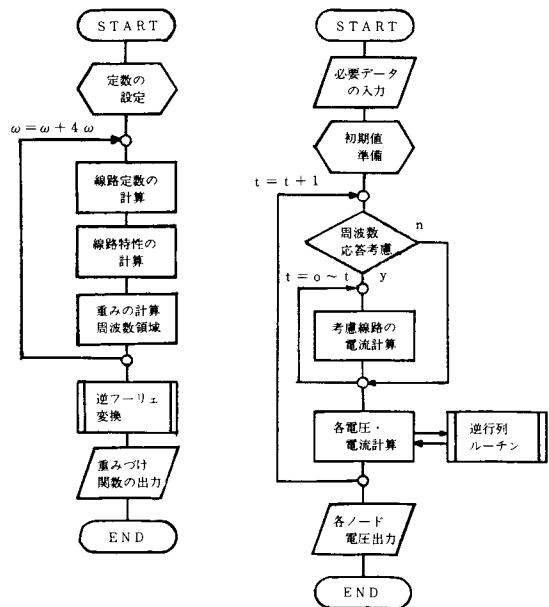
といった結論が得られた。

参考文献

- 1) 雨谷昭弘：最近における電力系統の解析技術“V. サージ解析”，電気学会誌，100 巻 1 号，pp. 20-24，(1980)。
- 2) 関根泰次：電力系統解析理論，pp. 317-326，電気書院，1971。
- 3) 林泉：電力系統，pp. 168-176，昭晃堂，1976。
- 4) 久米川宏：“周波数応答を考慮したサージ解析”，長岡技術科学大学大学院修士論文，1987，3。
- 5) 宮崎習：“多線条系のサージ解析に関する研究”，長岡技術科学大学大学院修士論文，1985，3。

付録 フローチャート

開発したプログラムのフローチャートを Fig. A (a)，(b)に示す。(a)は重みづけ関数の計算，(b)は三線条線路モデルの解析のフローチャートである。



(a) Calculation of Weighting Function

(b) Analysis of Three Phases Network

Fig. A Flow-chart