

500 kV 系の開閉インパルスとその抑制対策

Switching Impulse on 500kV System and its Countermeasure

山 崎 精 二*
Seiji Yamazaki

要 旨

500 kV 系の絶縁協調の基本となる開閉インパルス[☆]についてその理由および実情を説明し、その抑制法を概説した。そのうえで予測計算手法としてアナログ法とデジタル法について日立製作所日立研究所における実績を紹介して、実測との比較計算によりその計算精度がじゅうぶん信頼あることをのべ、対策としていちばん有効である投入抵抗法についての予測計算により、500 kV 系で600~1,000Ωを採用すれば、開閉インパルスは1.6倍程度に抑制できることを明らかにした。

1. 500 kV 系の BIL (Basic Insulation Level) と開閉インパルス

1.1 500 kV 系の BIL (基準絶縁強度)

超々高圧系の BIL および AC 耐電圧値は IEC から表 1 の数値が示されている⁽¹⁾。送電線、母線などの気中絶縁の基礎となる間げき長とせん絡電圧の関係は図 1 に示されている⁽²⁾⁽³⁾。雷インパルスに対するせん絡値は間げき長にほぼ比例して増加するため、BIL として 1,800 kV を採用しても気中絶縁長としては 4 m 強でじゅうぶんである。しかし無負荷送電線遮断時の再点弧現象が発生すれば 3.5 倍程度、すなわち 1,550 kV の開閉インパルスは容易に発生する。耐電圧値ならびに設計裕度をとれば

1,900 kV の絶縁を必要とする。所要間げき長は棒一平板、正極性をとれば少なくとも 10 m となり、実現は困難となる。このように開閉インパルスせん絡値は間げき長に対して飽和する特性があり、また図 2 に示したように波頭長により AC せん絡値よりも低くなる特異な性質をもっている⁽³⁾。以上のように超々高圧系になると基準絶縁強度として従来の雷インパルスよりは開閉インパルス耐圧値をとらねばならない。

1.2 開閉インパルスの抑制目標

1.1 にのべた BIL の中で外部絶縁として 1,800 kV を選定すれば必要間げき長は 3.8 m となる。この間げき長に対応する開閉インパルスは図 1 から 1,100 kV、耐圧値として 1,000 kV が目安になる。系統の常規対地電圧波高値基準で表現すれば 2.2 倍となる。

BIL を 1,550 kV とれば 950 kV、2.1 倍が目安となる。結局 950~1,000 kV に抑制するように何らかの人為的対策を必要とする。

2. 開閉インパルスの分類

2.1 商用周波過電圧

開閉インパルスの基準となる商用周波過電圧に簡単にふれてお

* 日立製作所日立研究所 工学博士

☆ 従来開閉サージと呼ばれているが IEC 用語変更によりインパルスを用いた。

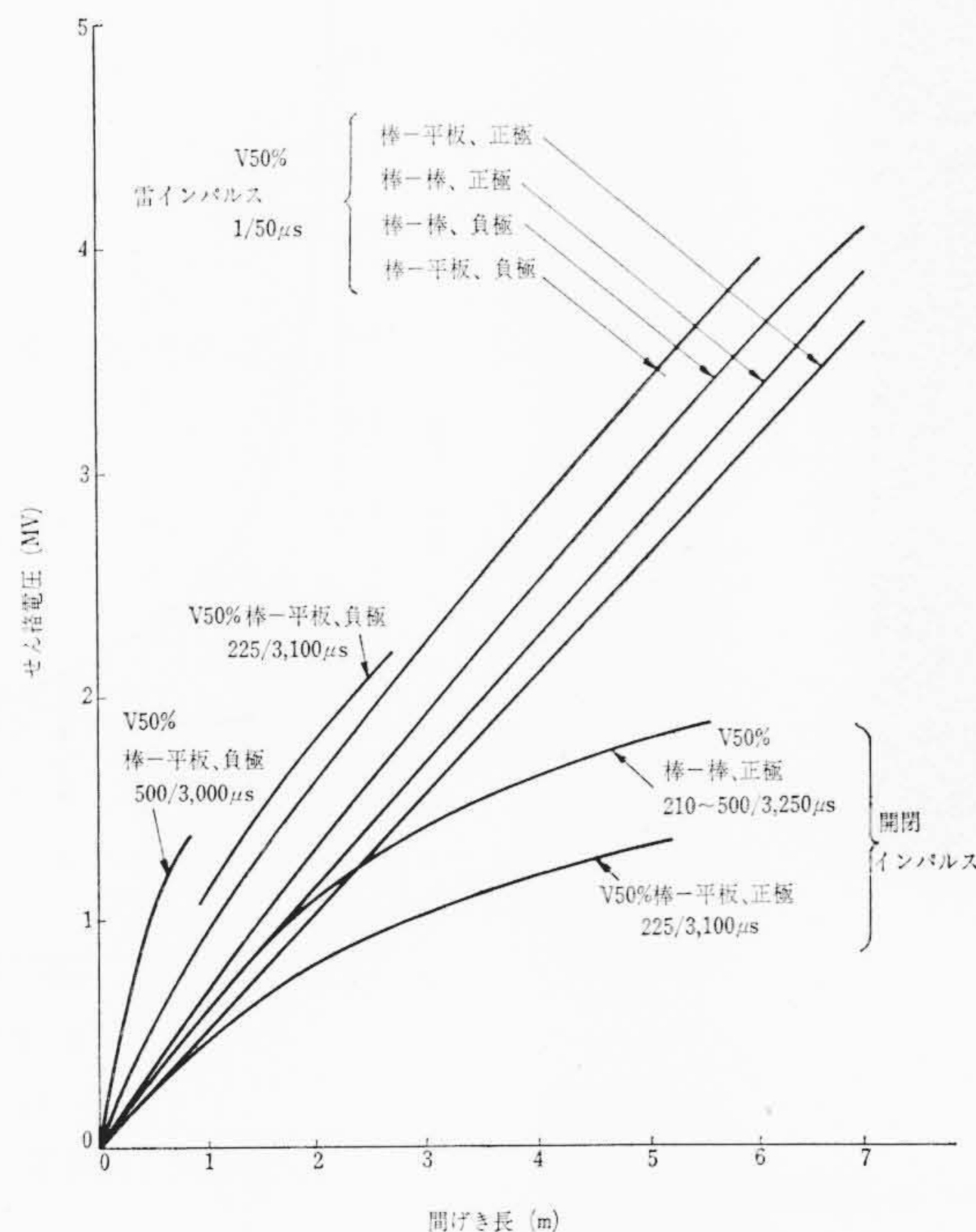


図 1 長間げきのせん絡特性

表 1 500 kV 級基準絶縁強度

BIL (kV)	AC 耐圧 (kV)	開閉インパルス (kV)
1,800	790	1,300
1,675	740	
1,550	680	1,175
1,425	630	1,050

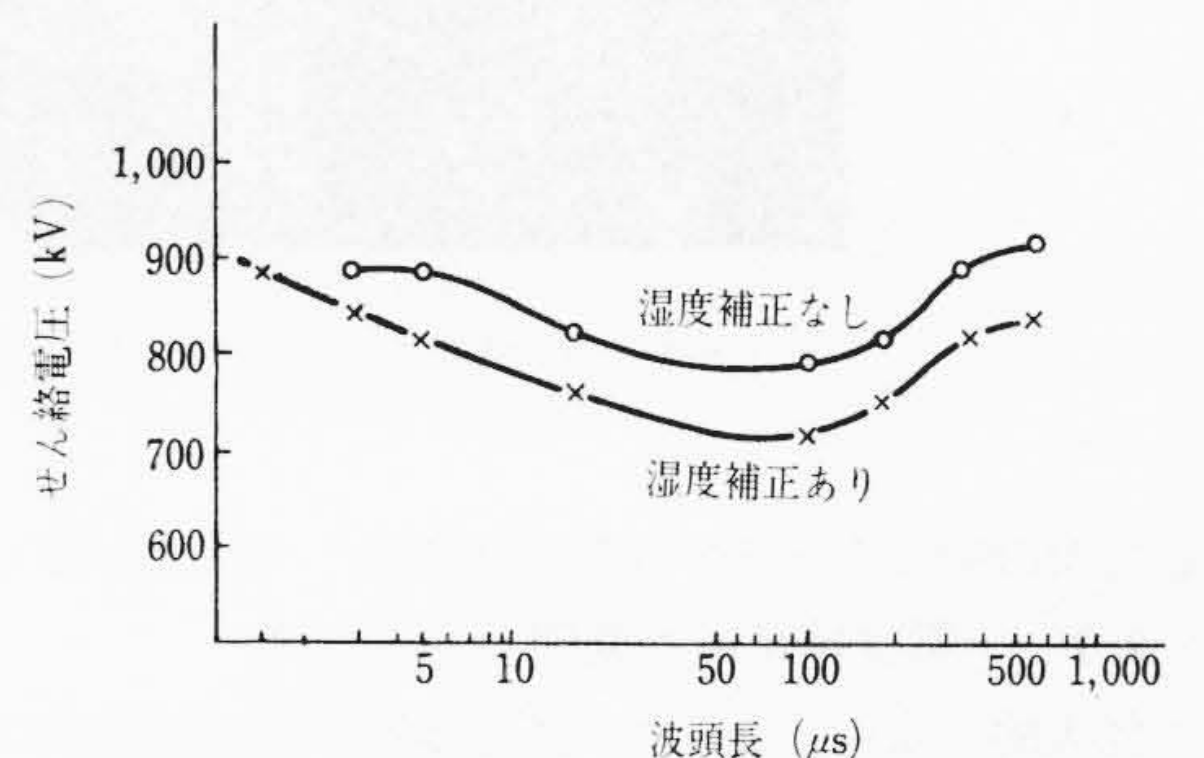


図 2 波頭長による 50% せん絡電圧

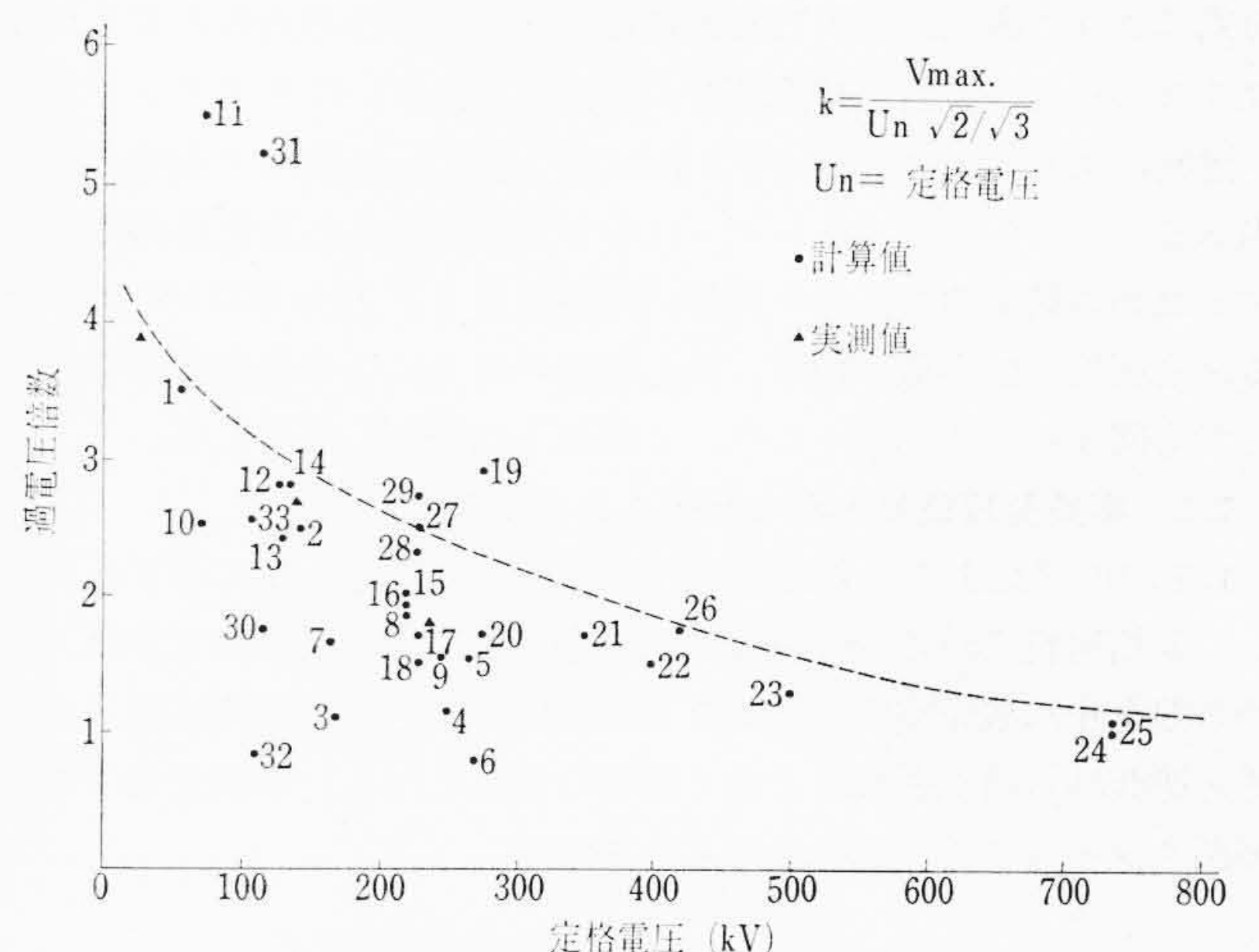


図 3 励磁電流遮断時の最高過電圧

く。電力中央研究所主催 500 kV 送電特別委員会報告書⁽⁴⁾によれば里側で 2 回線負荷遮断という過酷な条件では里側開放端で分路リアクトル無しで 1.35 倍、50% 補償で 1.2 倍に上昇する。電源容量が小さくかつ 500 km 程度の長距離送電線でなんら補償のない場合には 1.5 倍程度に上昇することが計算される。適当な抑制手段を構ずると

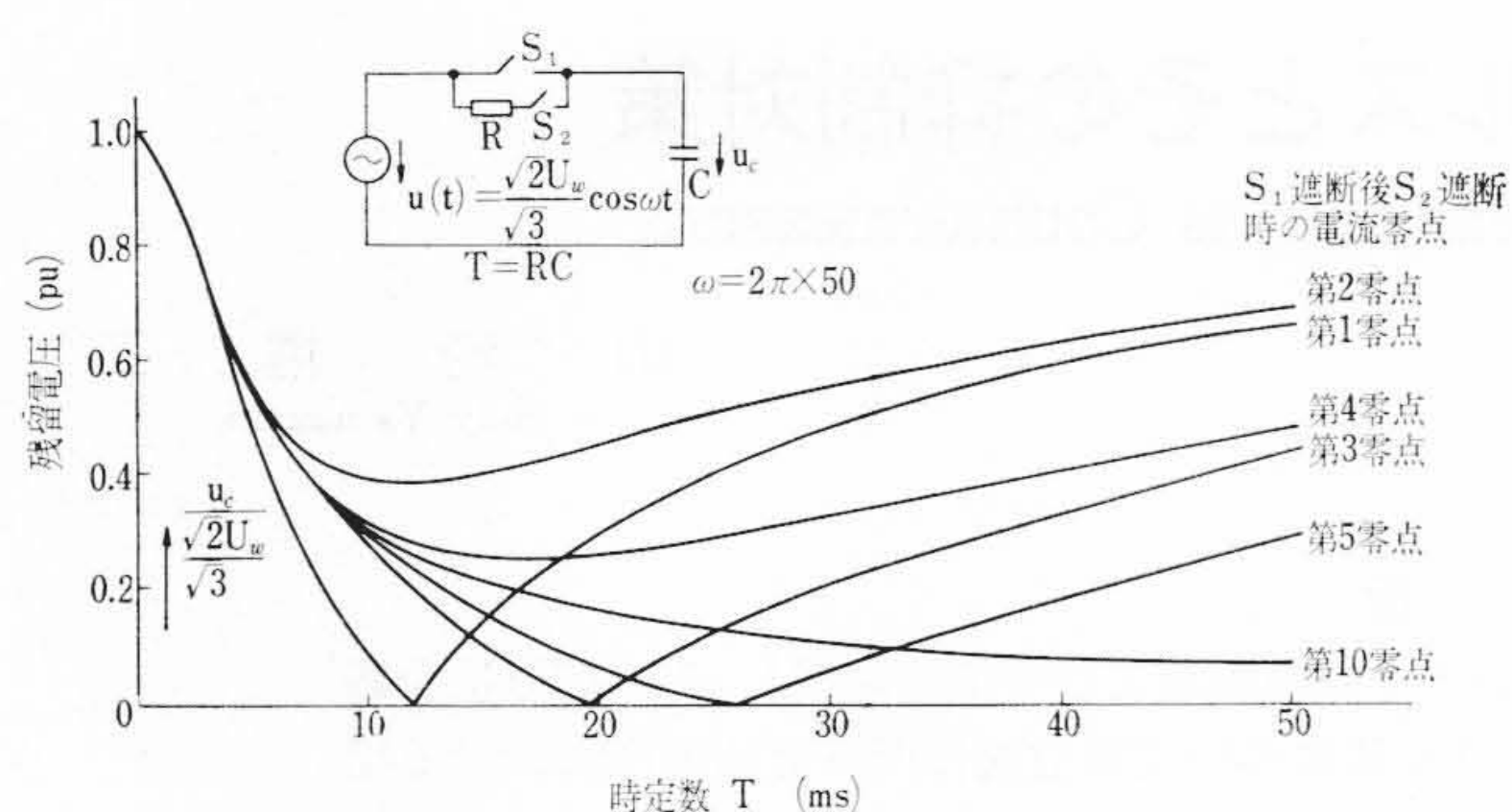


図4 抵抗遮断時の残留電圧

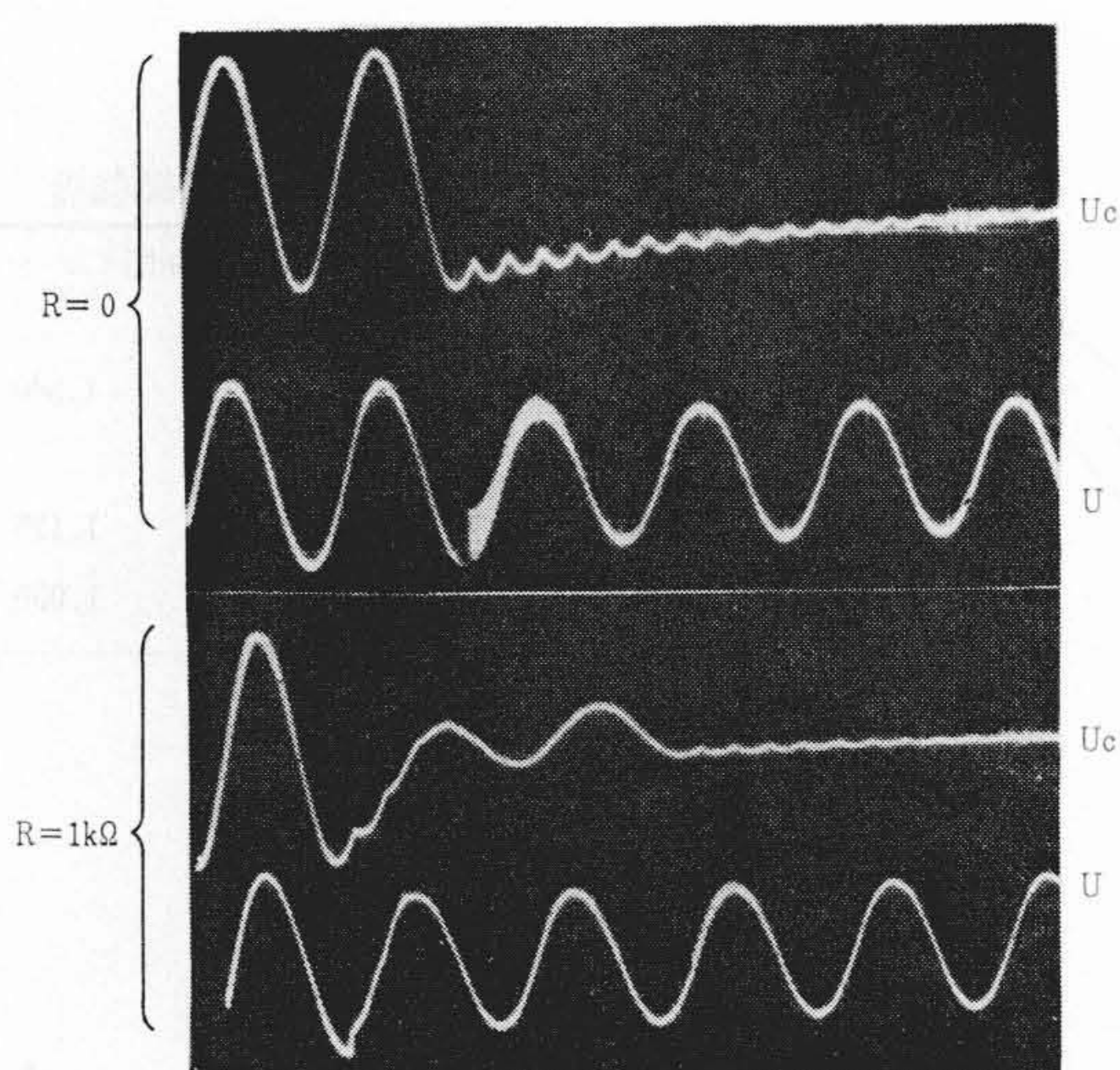


図5 抵抗遮断時の電圧波形

して短時間ながら1.2倍程度は考慮しておかねばならない。

2.2 小電流遮断時の開閉インパルス

代表的なものとして無負荷線路の充電電流遮断時の再点弧現象があげられ、再点弧1回により3倍程度の過電圧が発生する。しかし空気遮断器(A. B. B.)を代表とする他力消弧形式および多重遮断点方式により、極間絶縁耐力回復特性の向上により再点弧のおそれはなくなった。一方無負荷変圧器の励磁電流あるいはリアクトル電流の遮断により従来系統では2.2倍以上の過電圧の発生する場合が相当ある。しかしそのエネルギーは小さく開放される変圧器側に発生するため直結避雷器により容易に抑制できる。なお500 kV級になると変圧器単位容量の増大、鉄心特性の向上により最過酷時を想定しても図3のように低下し⁽⁵⁾、2倍以上は発生しなくなる。

2.3 無負荷線路投入時の開閉インパルス

1.2にのべたように2倍程度の過電圧が問題となるにおよんで新しく3相再投入時の過渡現象による過電圧が問題になってきた。遮断時健全相に残留電圧のあるときに逆極性の電源電圧時に投入されると遮断時の再点弧現象と全く同様な結果となる。本論文ではこの開閉インパルスを主題としてとりあげる。

3. 投入時の開閉インパルスの抑制

3.1 抵抗遮断方式による抑制

投入インパルスの発生原因として残留電荷が大きく影響するので再投入時に、あるいは最初の遮断時に残留電荷を減衰せしめればよい。遮断器による残留電荷減衰法として抵抗遮断方式がある。無負荷送電線を単に集中コンデンサで模擬した図4の回路で、主遮断点 S_1 で充電電流を遮断した以後の送電線対地電圧 u_c は次式となる。

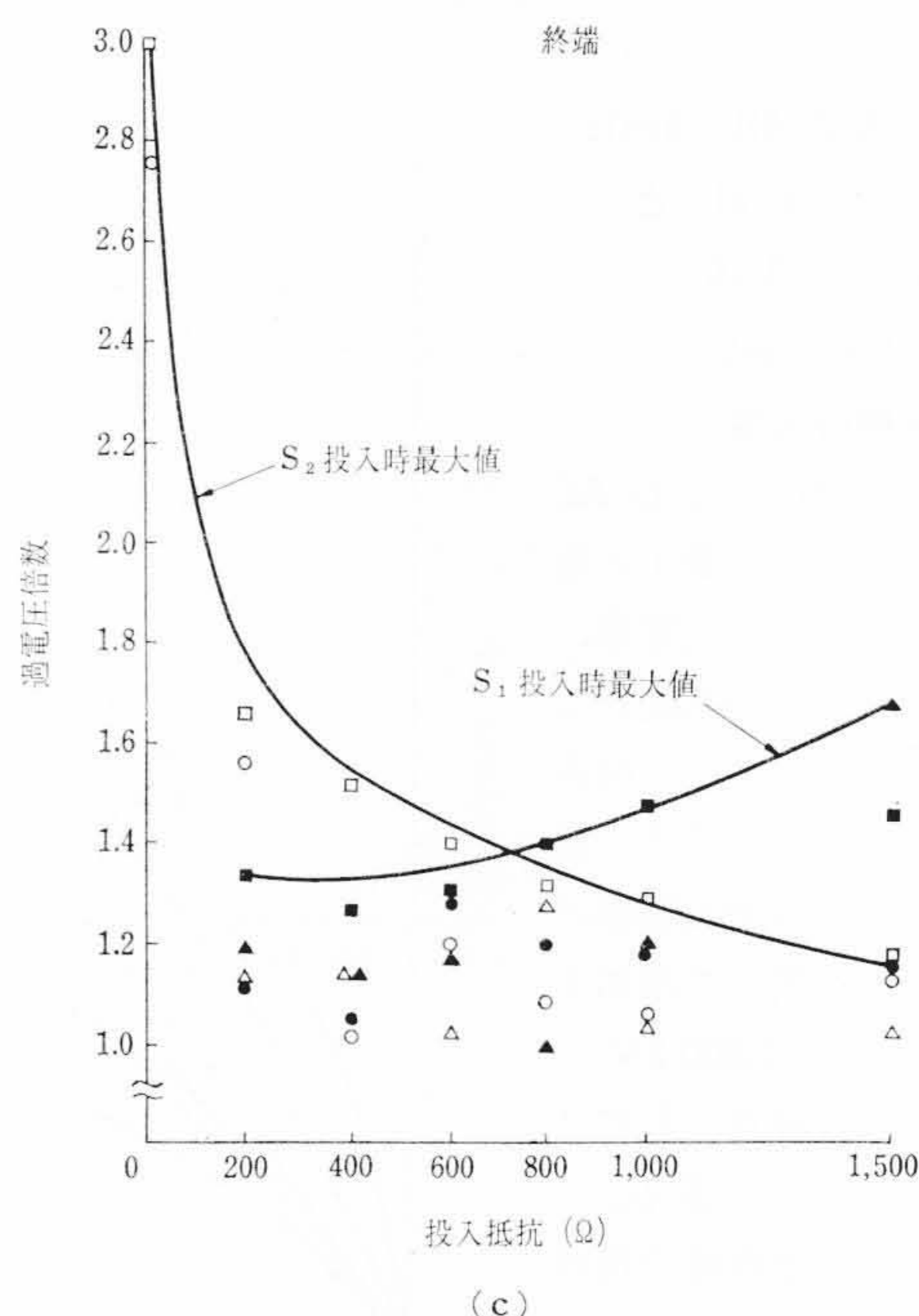
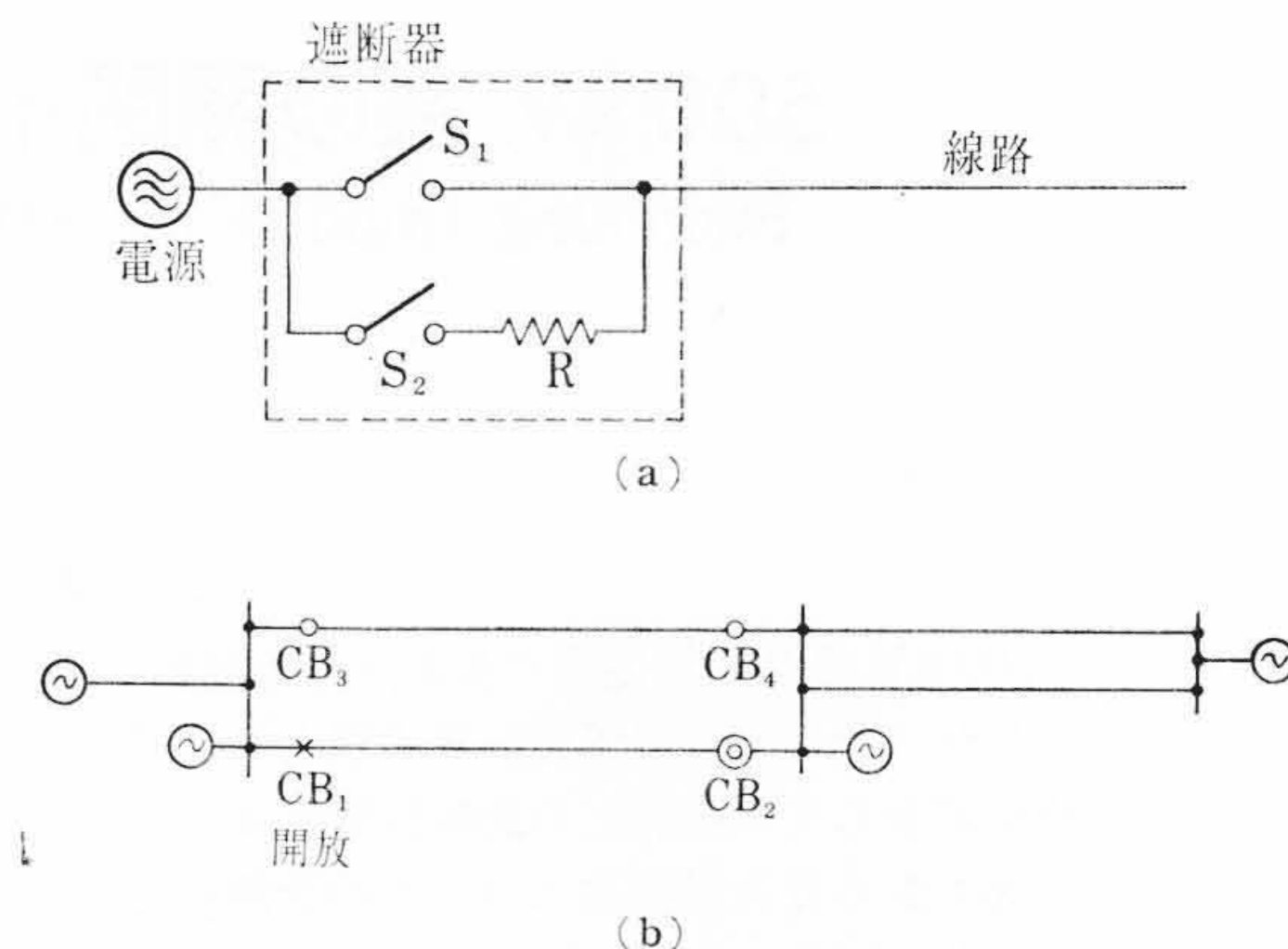


図6 抵抗投入時の過電圧

$$u_c = \frac{\omega^2}{\alpha^2 + \omega^2} \varepsilon^{-\alpha t} + \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \omega^2} \left(\cos \omega t + \frac{\omega}{\alpha} \sin \omega t \right) \dots (1)$$

$$\text{ただし, } \alpha = \frac{1}{RC} \equiv \frac{1}{T}$$

並列抵抗 R を経て流れる充電電流をその電流ゼロの瞬時に S_2 で遮断したときの残留電圧の計算結果は図4のとおりである。通例第3または第4ゼロ点となるため T として10~30 msに選定すればよく、残留電荷として0.2倍程度に抑制できる。送電線長100, 200 kmに対して R はそれぞれ10~30 kΩならびに5~15 kΩとなる。送電線長640 kmについて $R=1 \text{ k}\Omega$ とした場合の U_c を模擬送電線(10 km 64段)で求めたオシログラムは図5に示すとおりである。この方法で残留電荷を0.2倍に抑制しても最高開閉インパルスは送電線遠方端において2.5倍程度となり、目標に対して不じゅうぶんである。

3.2 同期投入方式⁽⁶⁾

遮断器を再投入するとき電源側電圧が残留電荷と同極性で、その差がほぼ最小の位相で同期的に投入すれば過電圧は1.6倍以下にじゅうぶん抑制される。アナライザ的な解析はあるが、同期位相の検出ならびに先行アーク、投入時間のばらつきなどを最小とする必要があり、遮断器に要求される条件も過酷となり、500 kV系には少なくとも実現性は薄い。

3.3 抵抗投入方式

図6(a)の回路で、まず S_2 を投入して R を直列にそう入し、次いで S_1 を投入して R を短絡する抵抗投入方式をとると R の適当な値

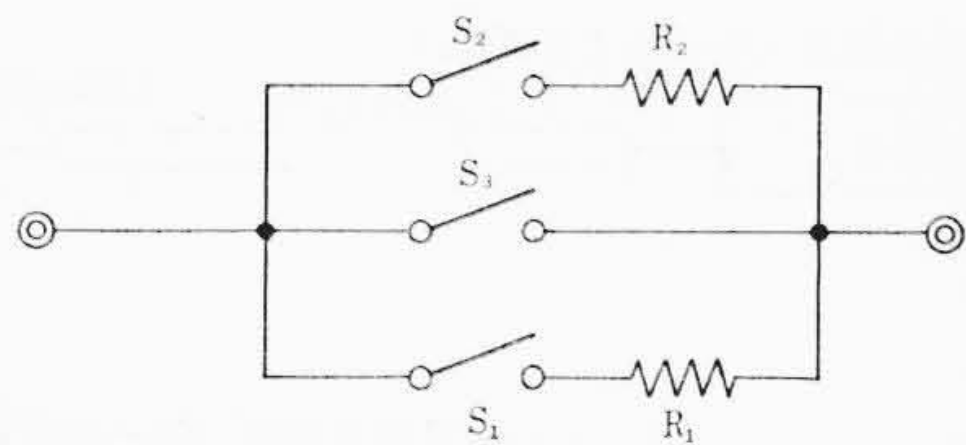
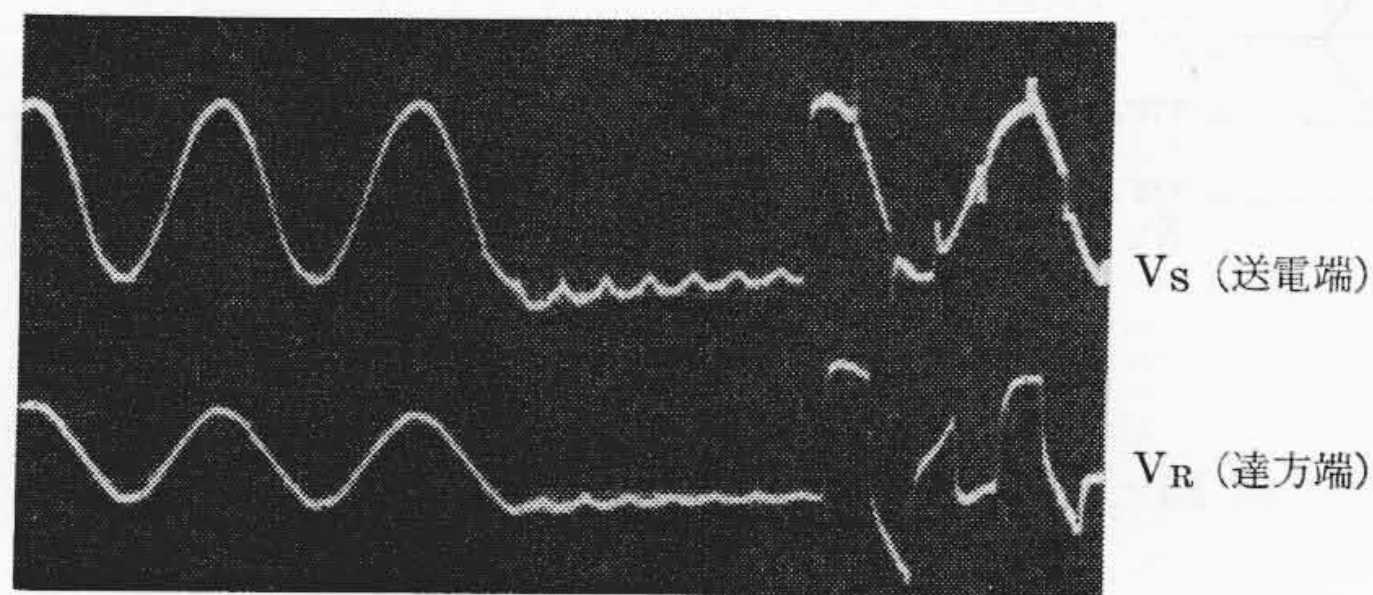
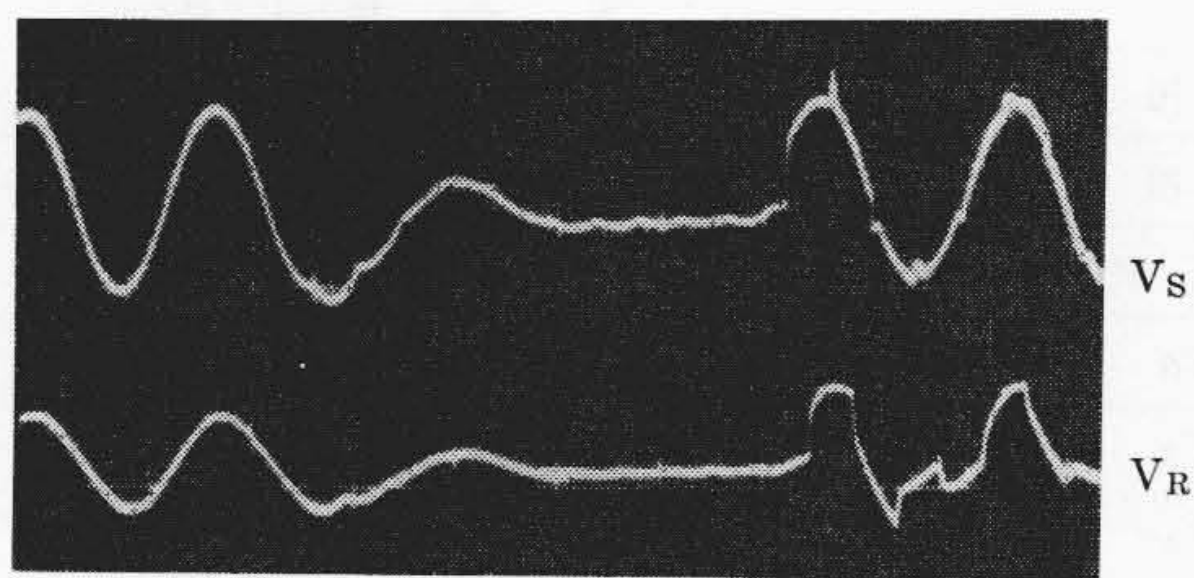


図7 2段抵抗投入方式



(a) R なし

(b) $R=1\text{ k}\Omega$

(線路長 640 km)

図8 抵抗遮断、抵抗投入併用方式による電圧波形

により過電圧を抑制できる。(b)の系統で CB_2 を投入したときの解析結果を電力中央研究所の実験例⁽⁴⁾から示すと(c)図のようである。この例では最低インパルスは $R=750\Omega$ で得られている。遮断器3相間のばらつきを考えると後述のように最適抵抗値、倍数などは異なってくるが2倍以下に抑制することはじゅうぶん可能である。上記の抵抗投入方式をおし進めて図7のように2組の投入抵抗 R_1 , R_2 を用いれば1.6倍以下に抑制することも容易となる。

3.4 抵抗遮断、抵抗投入併用方式

3.1と3.3にのべた両方式を併用すれば当然過電圧はさらに抑制でき、やはり1.6倍以下となる。この場合遮断時の抵抗と投入用の抵抗を別個にそれぞれ最適値を選定することも考えられるし、一つの抵抗体を両目的に兼用することでも実現できる⁽¹⁵⁾。640 kmの長距離送電線に対し $1\text{ k}\Omega$ の抵抗を兼用した場合の解析例を示したのが図8である。 R を適用した場合は2.8倍が1.7倍に抑制されている。

4. 開閉インパルス予測計算手法

4.1 アナログ解析とデジタル解析

予測計算の手法には大別してアナログ解析とデジタル解析がある。アナログ解析は実系統を模擬した電気回路を実時間で解析するもので交流計算盤がよく知られている。しかし開閉インパルス解析には構成要素の固有周波数が低く、精度が悪いので普通、過渡現象計算盤(T. N. A. と略称)が採用されている。系統と構成要素が1:1に対応していて、投入位相を変更してその時の波形を表現できる簡便さもあって、現在最もよく用いられている。しかし開閉インパルス現象は本来進行波現象で、T. N. A. でも完全な分布定数回路の模擬が困難なため、電子計算機の進歩にともないデジタル解析が盛んに行なわれるようになった。デジタル解析には進行波法、フーリエ変換法⁽⁷⁾集中定数法⁽⁸⁾などがある。フーリエ変換法は周波数特性に対する考慮という点で最も正確であるが、計算時間が長く大規模系統には不向きである。また集中定数法はアナログ解析同様厳密

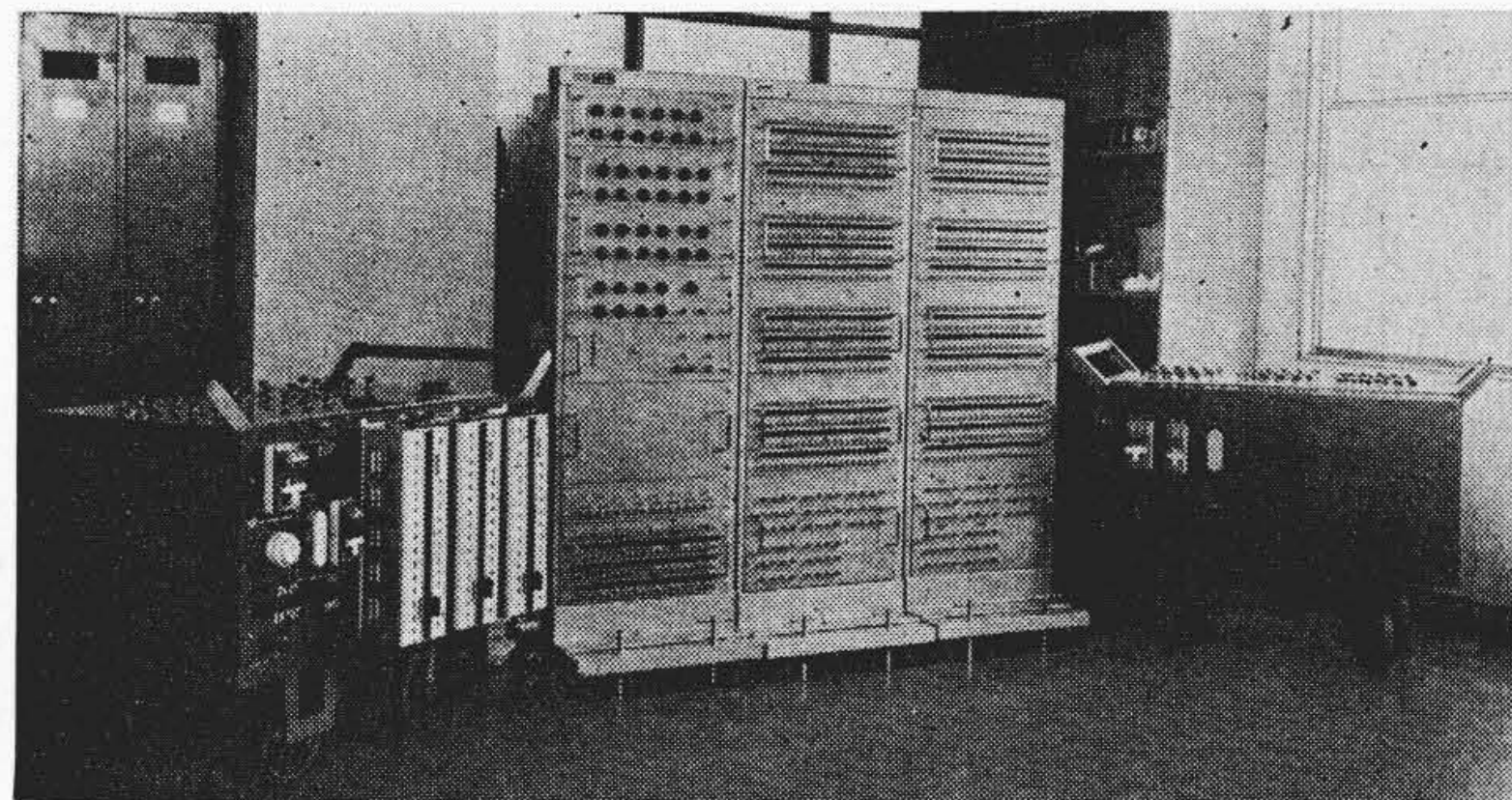


図9 過渡現象計算盤 (T. N. A.)

性に欠ける。進行波法、中でも格子図法は日立製作所で力を入れて開発しているもので、3相回路にまで拡張適用し、実測波形と満足すべき精度で照合し得るまでになっている唯一の方法で、のちほどくわしく紹介する。

4.2 日立の過渡現象計算盤 (T. N. A.)

日立製作所日立研究所に設置されているT. N. A. は3相送電線を3相4線式で模擬して3相で約200 km, 単相で約600 kmまで解析できる。遮断器模擬の同期開閉器にはパワー・トランジスタを採用し、開閉動作要素8組、さらに模擬避雷器6組を有している。図9は外観図である。線路の1 km単位の構成は図10のとおり π 形構成である。T. N. A. でもっとも問題になる周波数特性には特別の考慮を払い、図11のように減衰時定数は実送電線に比べてじゅうぶんな模擬となっている。図12は本T. N. A. の特性を検討した結果であるが、200 km単相線路再投入時の波形について進行波法による解析解と比較したもので反射に基づく波形の変化はT. N. A. でも明らかに表現されている。

4.3 T. N. A. による予測計算

検討した500 kV系統およびアナライザ構成は図13で、両者の定数の比較は表2のとおり、ほぼ忠実に表現されている。検討結果の一部を図14に示したが、健全線路ならびに一線接地故障条件で3相不ぞろい投入で終端対地電圧が最過酷になる場合である。投入抵抗のない場合は4倍の過電圧が発生しているが、900 Ω 投入方式では1.6倍に抑制されている。図15はこの両条件におけるT. N. A. オシログラムで、 R により高周波振動が低く抑制されている。上記を含め種々の検討結果から次のことが結論される。

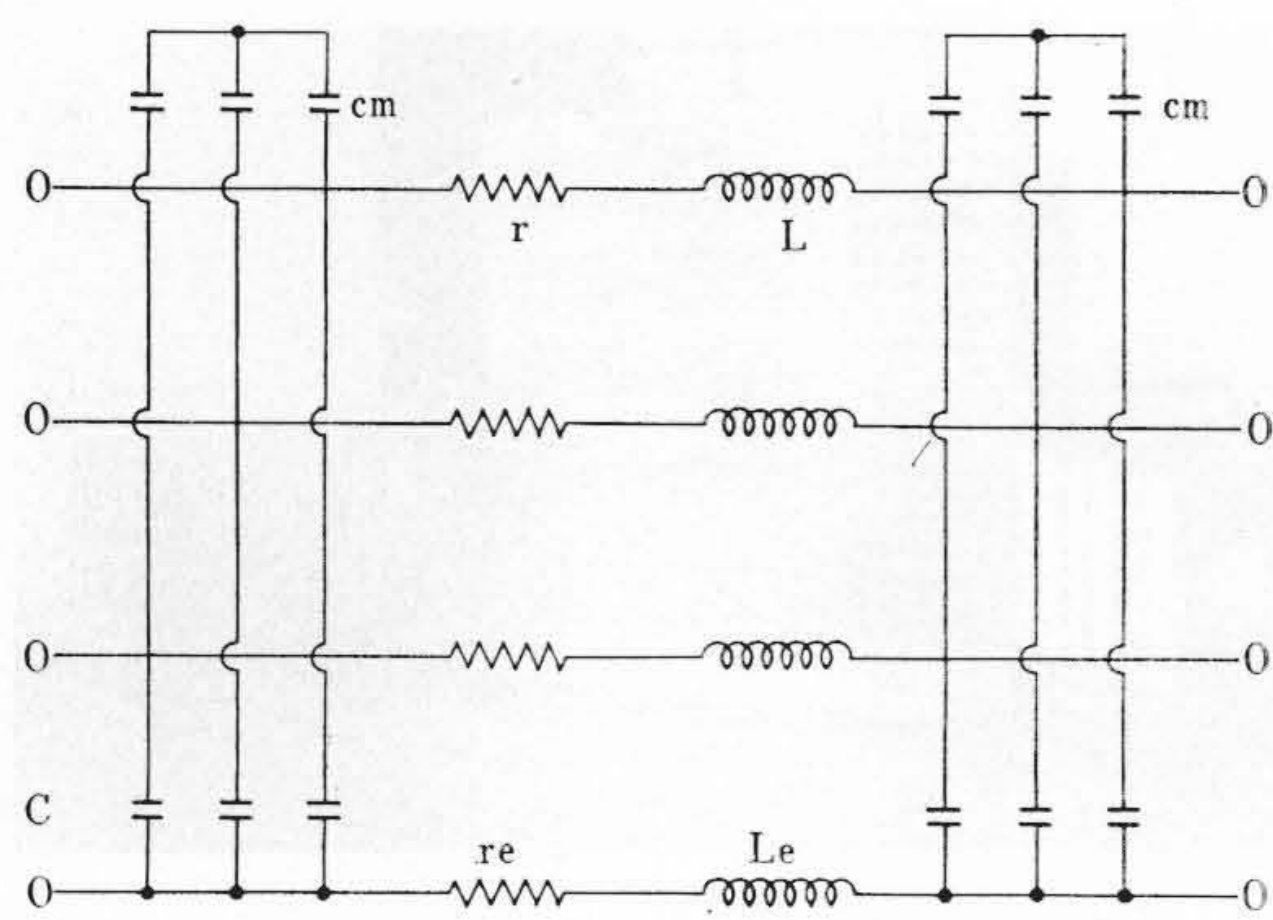
- (i) 線路送端より終端(遠方端)のほうが過電圧が高い。
- (ii) 3相同時投入より不ぞろい投入のほうが過電圧が高くなりやすい。
- (iii) 抵抗投入なしでは4倍以上にも達する。
- (iv) 900 Ω の投入抵抗では不ぞろい投入でも1.6倍以下に収まる。
- (v) 永久一線接地故障後の再投入は健全回路に比べ過電圧は約85%と低くなる。
- (vi) 900 Ω のとき R 投入時の R 短絡時の過電圧は同程度で、900 Ω が最適値に近いことを意味している。

4.4 格子図法によるデジタル解析手法

日立製作所では早くから格子図法によるデジタル計算プログラムの開発につとめてきた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。本節ではその概略をのべる。

4.4.1 単相回路⁽¹¹⁾

電圧計算法は図16のように進入電圧1に対し反射係数 Γ および透過係数 $1+\Gamma$ を用いて反射電圧、透過電圧が得られる。抵抗 R が介在する場合は図17のように1から2へ1なる電圧が進入してきたとき、3へ移る電圧は $e_{34}=K_{23}(1+\Gamma_{12})$ で表わされる。ただし



$$\begin{aligned} Z_1 &= 0.0119 + j 0.309 \quad (\Omega/\text{km}) & r &= 0.0119 \quad (\Omega) \\ C &= 0.0136 \quad (\mu\text{F}/\text{km}) & C_m &= 0.00305 \quad (\mu\text{F}) \\ Z_{03} &= 0.33 + j 1.40 \quad (\Omega/\text{km}) & L_C &= 1.155 \quad (\text{mH}) \\ C_{03} &= 0.0075 \quad (\mu\text{F}/\text{km}) & r_e &= 0.106 \quad (\Omega) \\ Z_{06} &= 0.63 + j 2.41 \quad (\Omega/\text{km}) & C &= 0.0037 \quad (\mu\text{F}) \\ L &= 0.985 \quad (\text{mH}) \end{aligned}$$

図10 T.N.A. 線路要素構成

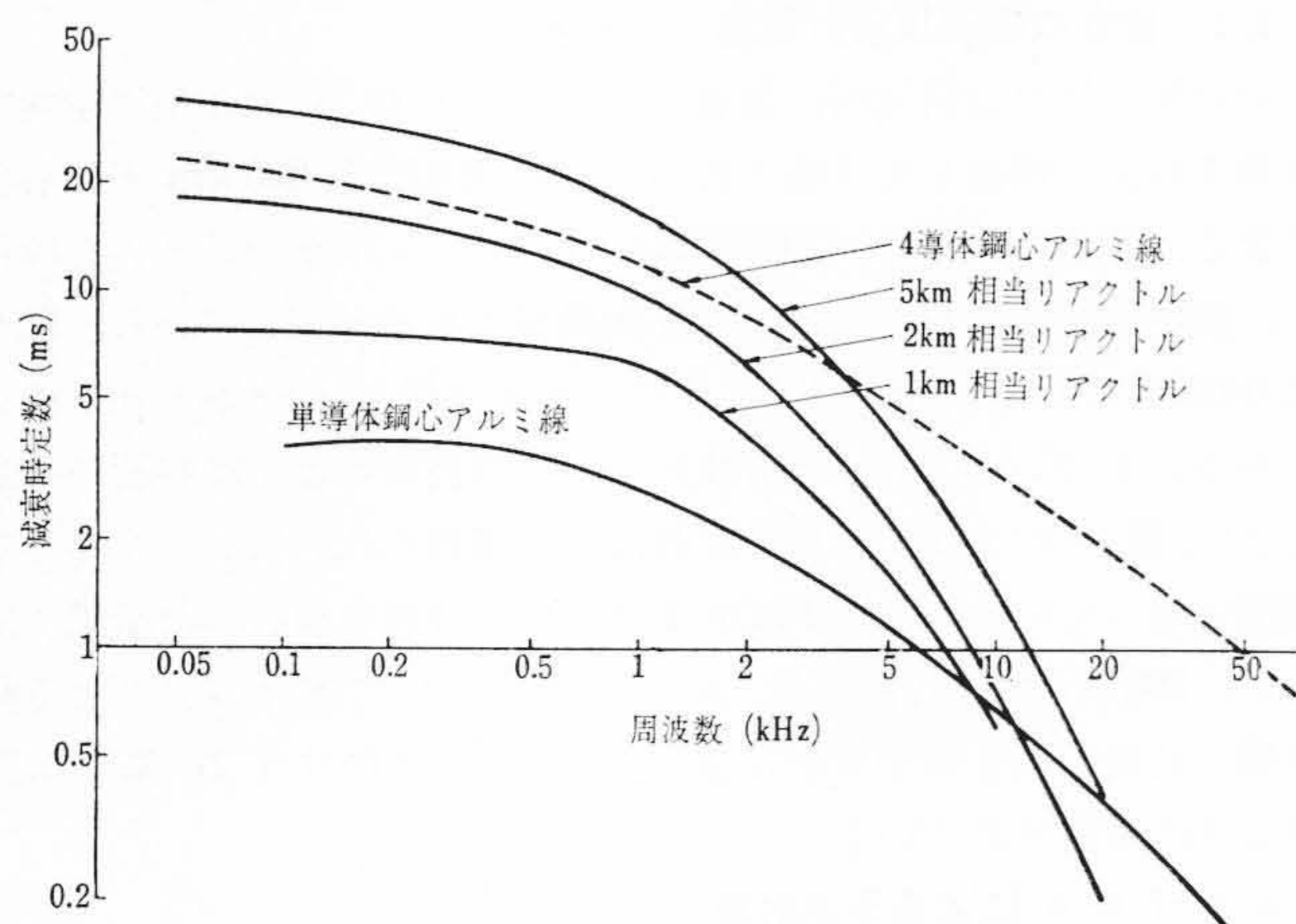
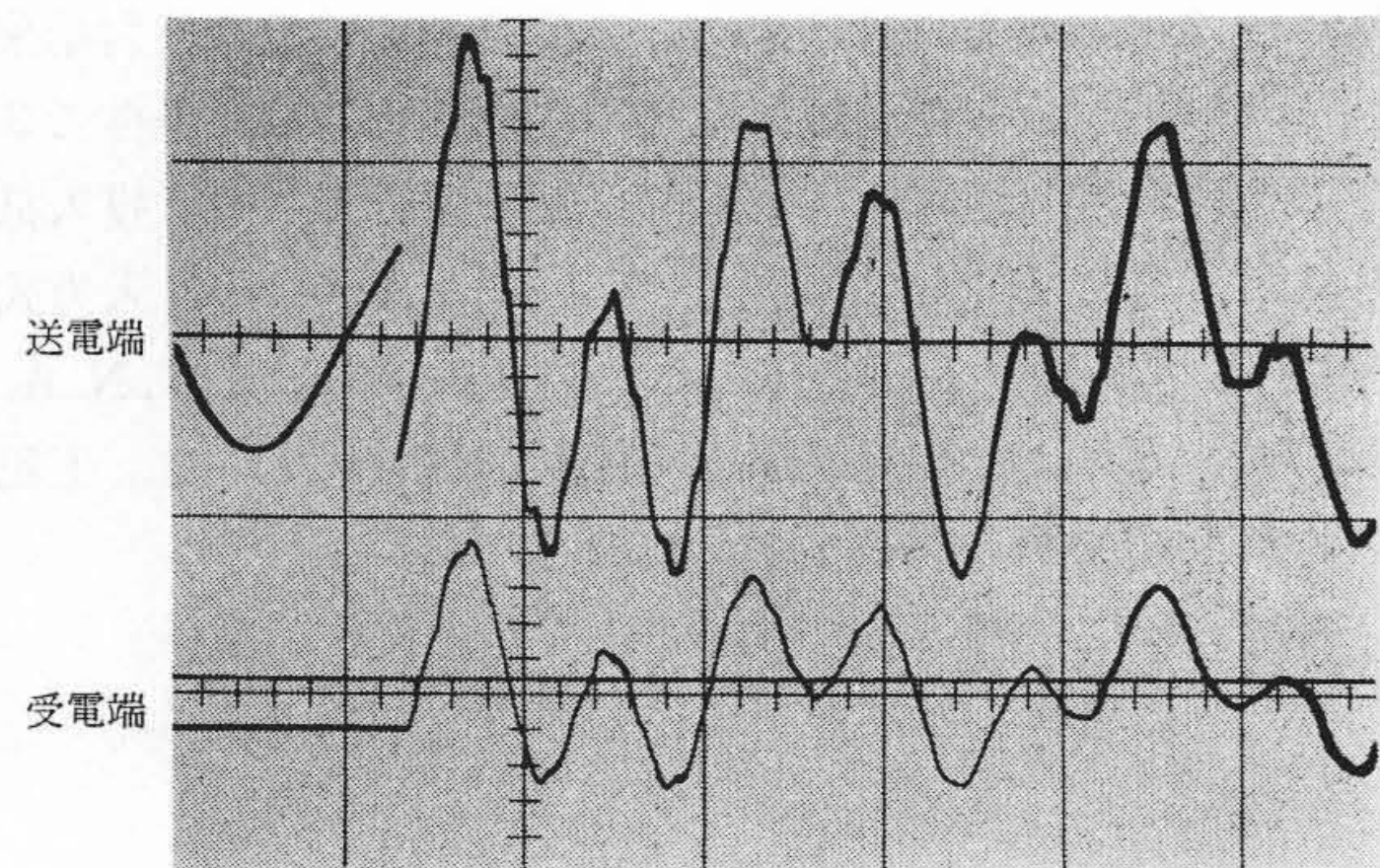


図11 線路用リアクトルの周波数特性



(a) TNAによるオシログラム

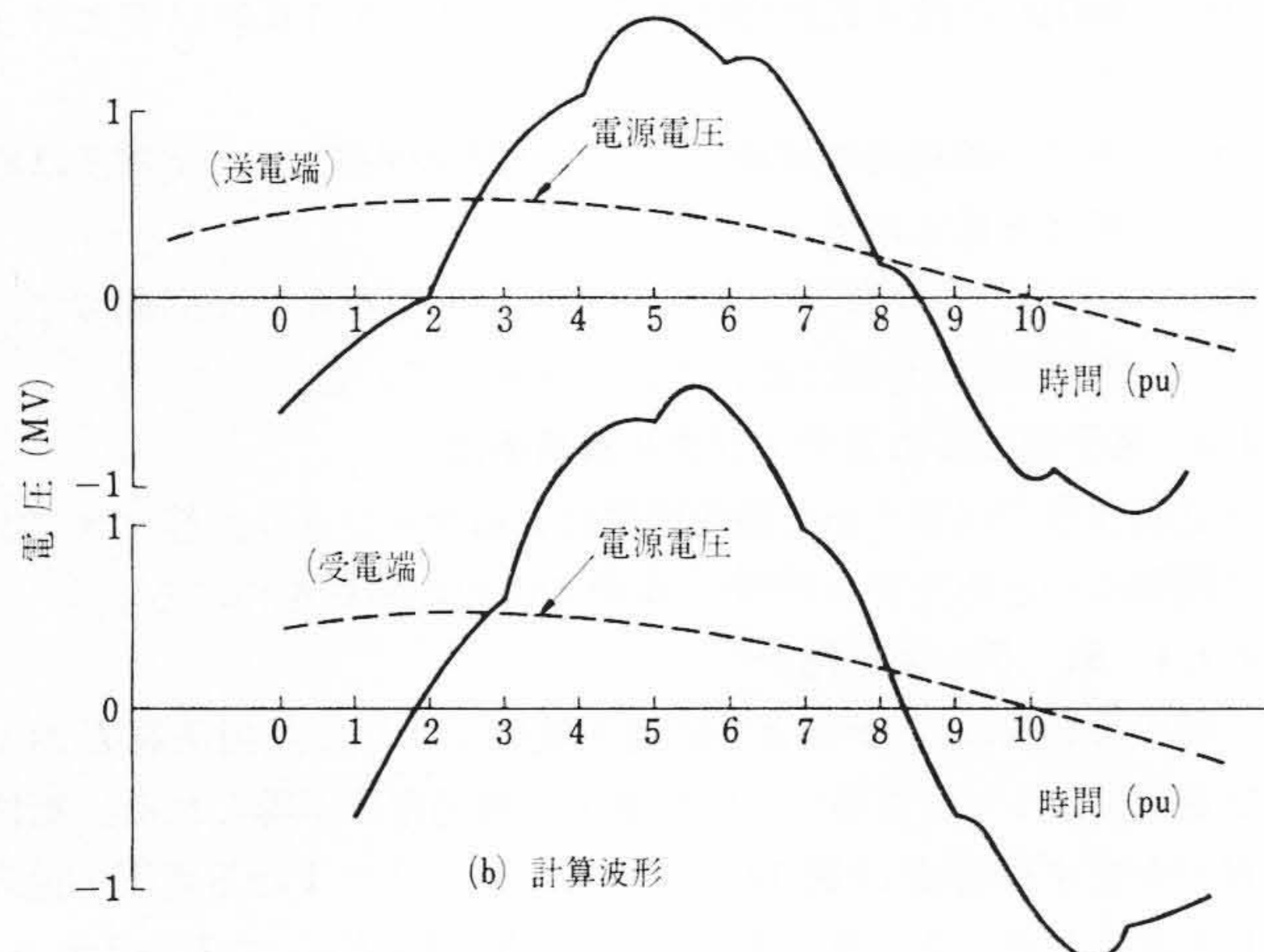


図12 T.N.A. 解析波計と数値解との比較 (線路長200km)

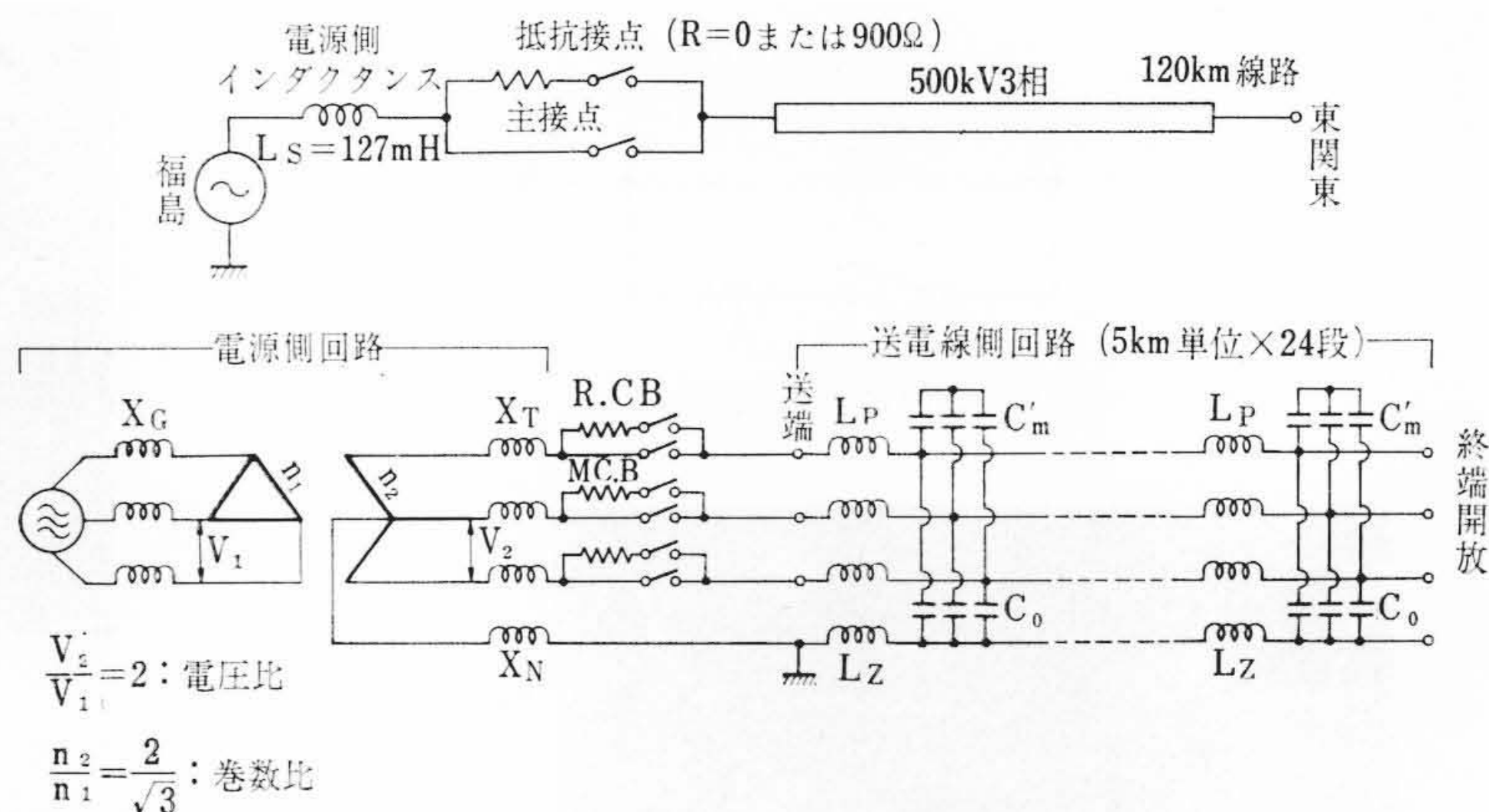


図13 500kV系アナライザ計算回路

表2 実系統と日立模擬定数

		実系統	日立
電	正相 X_1 (mH)	127.0	125.0
	零相 X_0 (mH)	37.4	37.6
	電圧比 n		1:2
源	X_G (mH)	26.0	25.5
	X_T (mH)	23.0	23.0
	X_N (mH)	4.8	4.9
線	正相 L_1 (mH/km)	0.934	0.97
	零相 L_0 (mH/km)	2.120	2.32
	正相 C_1 ($\mu\text{F}/\text{km}$)	0.0119	0.0116
	零相 C_0 ($\mu\text{F}/\text{km}$)	0.00856	0.0082
路	正相 R_1 (Ω/km)		0.0301
	零相 R_0 (Ω/km)		0.0931
	分割数 (段)		24

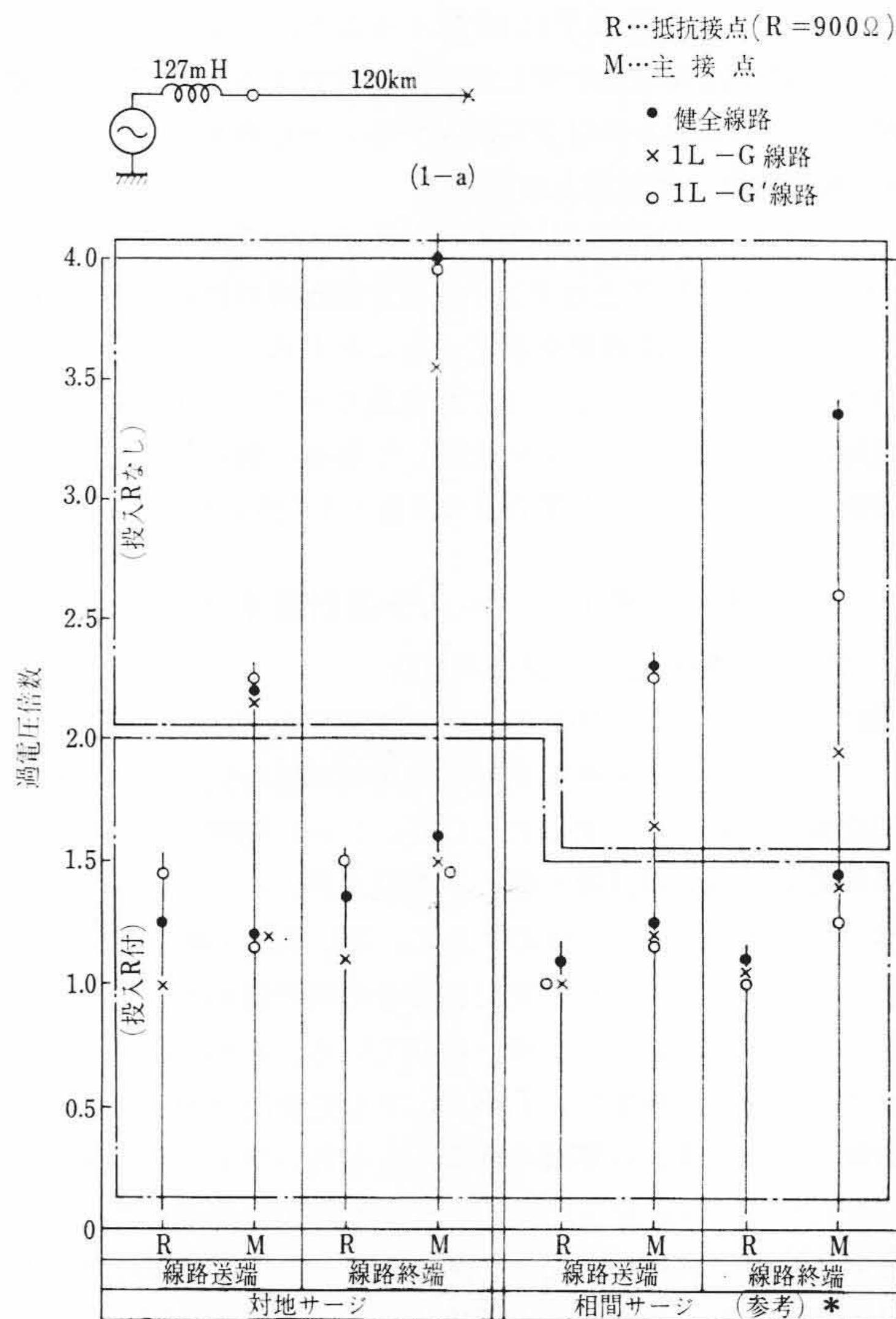


図14 3相投入時アナライザ解析結果

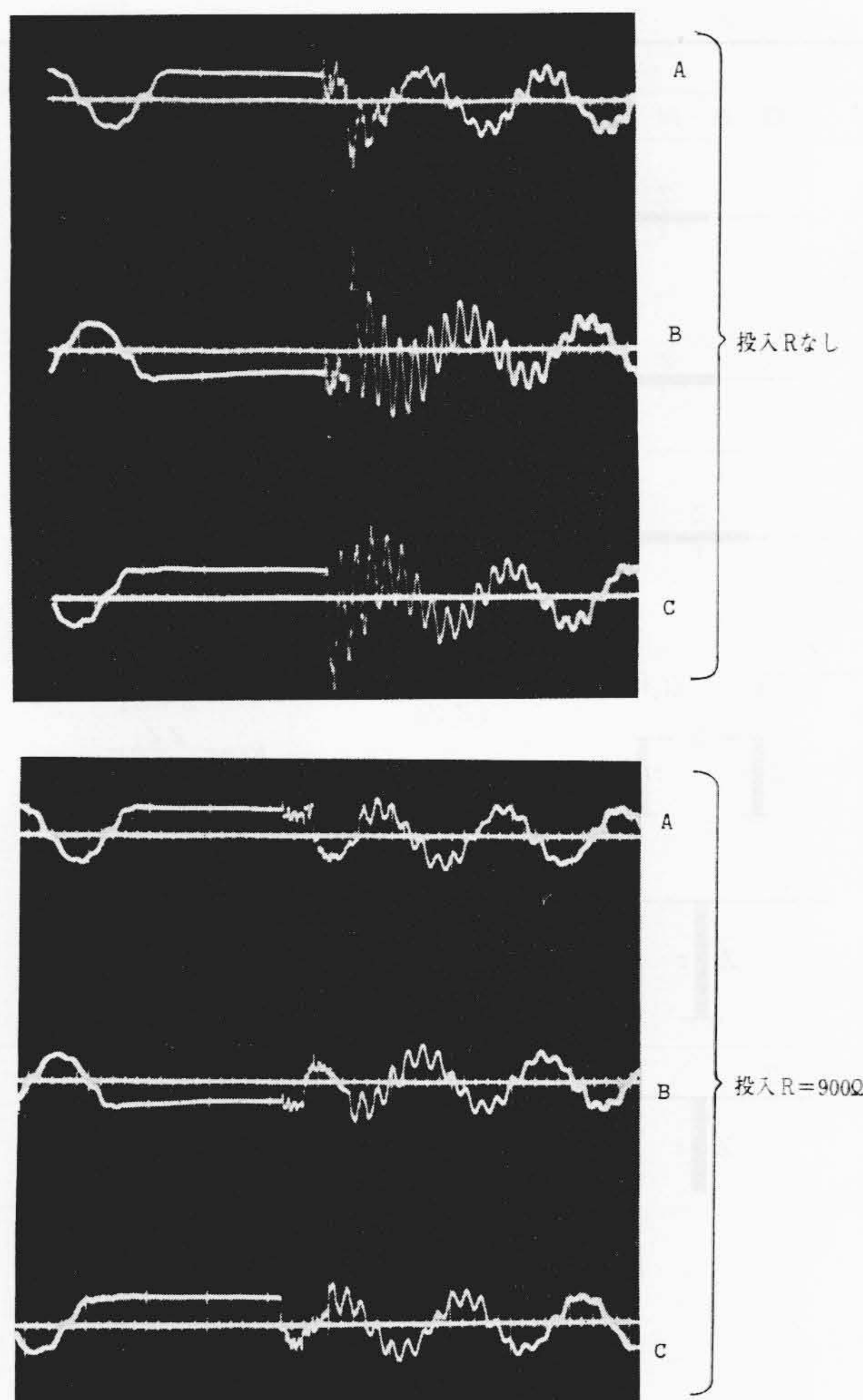


図15 再投入時のT.N.A.オシログラム
3相不ぞろい投入，線路終端対地電圧波形

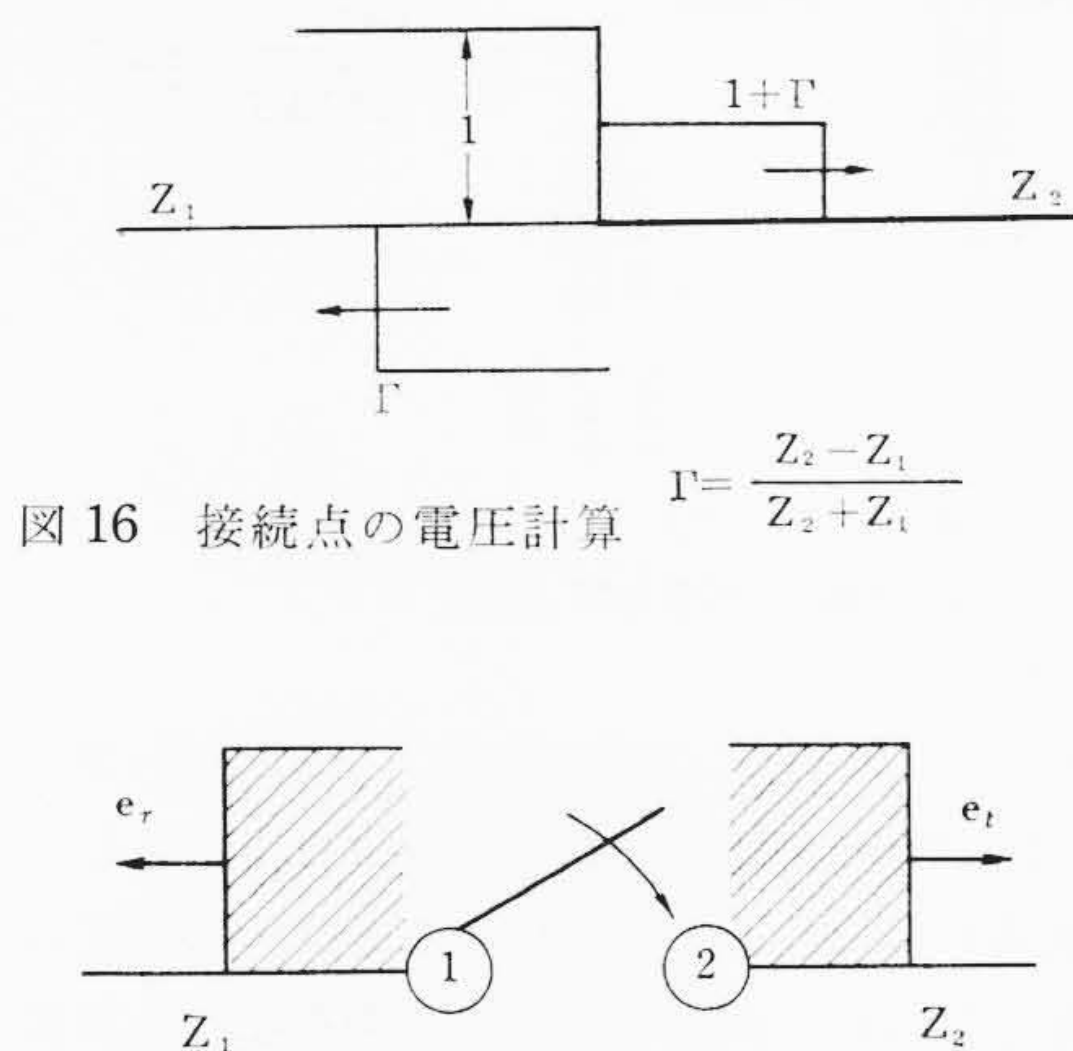


図16 接続点の電圧計算

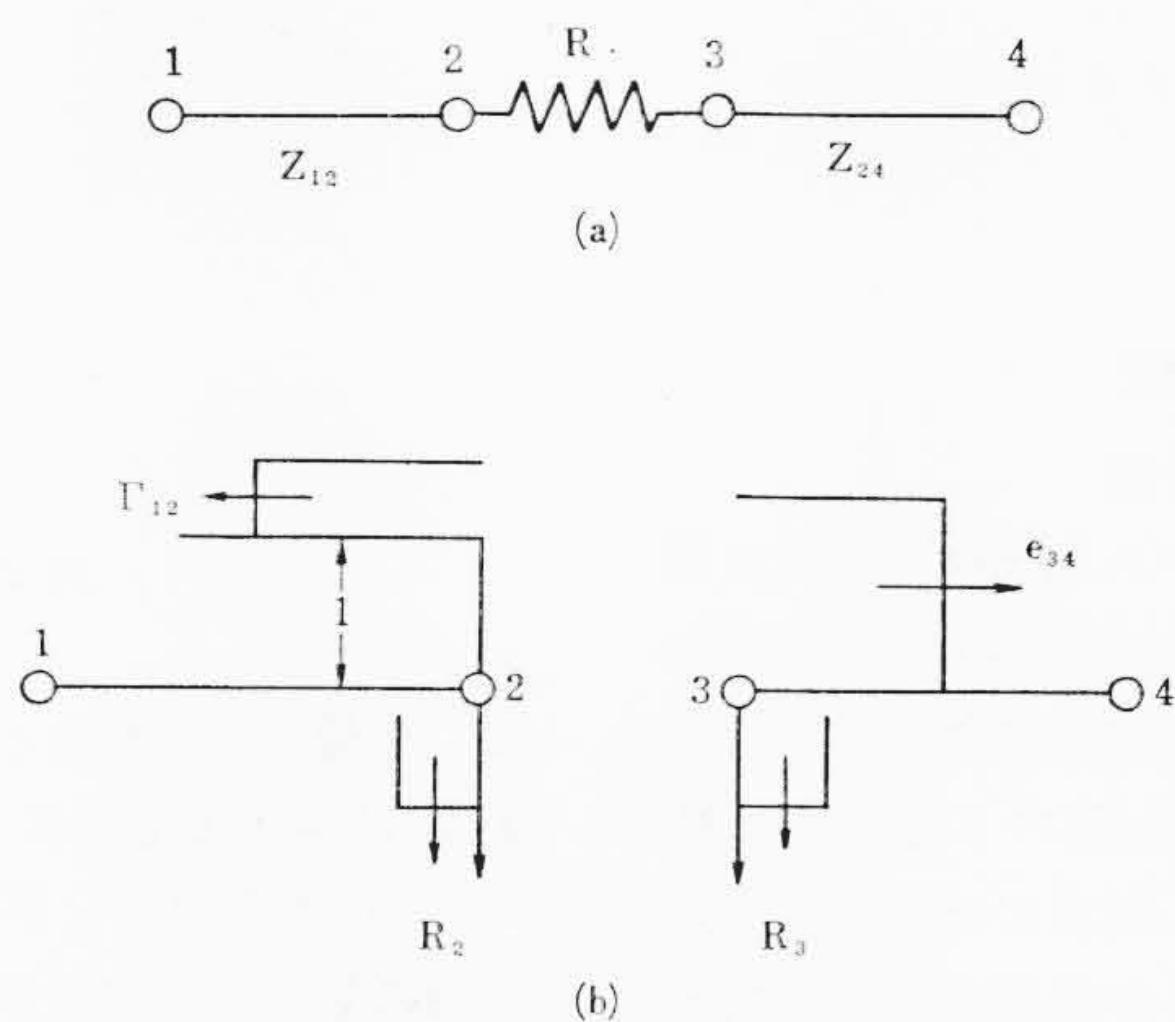


図17 投入Rの取り扱い Transfer Coefficient

$$R_2 = R + Z_{34}, \quad R_3 = R + Z_{12}, \quad K_{23} = \frac{Z_{34}}{R + Z_{34}}, \quad K_{32} = \frac{Z_{12}}{R + Z_{12}}$$

である。ここで K_{23} と K_{32} が Transfer Coefficient で $1 + \Gamma_{12}$ の電圧が R と Z_{34} に分圧されるという考え方で得られる。

4.4.2 3相回路⁽¹²⁾

3相回路の計算のためには3相の相互誘導のある部分を相互誘導のない系に変換する。一般に多導体線路上の進行波を規制するのは次の波動方程式である。

$$\left[-\frac{\partial e}{\partial x} \right] = [L] \cdot \left[\frac{\partial i}{\partial t} \right], \quad -\left[\frac{\partial i}{\partial x} \right] = [K] \cdot \left[\frac{\partial e}{\partial t} \right] \dots (2)$$

いまインダクタンス行列 $[L]$ およびキャパシタンス行列 $[K]$ に対して適当な変換行列 $[\mu]$, $[\nu]$ を選び

$$[\mu]^{-1} [L] [\nu] \equiv [A_L], \quad [\nu]^{-1} [K] [\mu] \equiv [A_K] \dots (3)$$

が同時に対角行列になるようにすれば，実電圧 $[e]$ ，実電流 $[i]$ に対応して仮想上の電圧 $[e']$ ，電流 $[i']$ に

$$[e] = [\mu] \cdot [e'], \quad [i] = [\nu] \cdot [i'] \dots (4)$$

なる線形変換を導入すれば(2)式は

$$-\left[\frac{\partial e'}{\partial x} \right] = [A_L] \cdot \left[\frac{\partial i'}{\partial t} \right], \quad -\left[\frac{\partial i'}{\partial x} \right] = [A_K] \cdot \left[\frac{\partial e'}{\partial t} \right] \dots (5)$$

となるが，この式の $[A_L]$, $[A_K]$ は対角行列であるから線路の相互誘導のない独立な単相回路の集まりとなる。すなわち故障計算における対称座標法と類似の手順で単相回路の反射，透過などの考え方が，そのまま多相回路に適用できる。

4.4.3 波頭変歪(わい)の導入

架空線において進行波を減衰ないし変歪させる原因としては種々あるが，比較的小さな電圧に対しても大きな影響を与えるものに大地および導体の表皮効果がある。本計算では次のように取り扱っている⁽¹³⁾。すなわち送端に単位ステップ電圧を印加したときの終端の電圧 $e_r(t)$ は，次式で与えられる。

$$e_r(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\omega} \varepsilon^{-\Gamma(j\omega)d} \varepsilon^{j\omega(t_0 + \frac{d}{c})} d\omega \dots (6)$$

ただし，

$$\Gamma(j\omega) =$$

$$\frac{j\omega}{c} \left\{ 1 + \left(\ln \frac{2h}{a} \right)^{-1} \left(\ln \frac{1 + h \left(\frac{j\omega\mu_0}{\rho_e} \right)^{\frac{1}{2}}}{h \left(\frac{j\omega\mu_0}{\rho_e} \right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{a \left(\frac{j\omega\mu_0}{\rho_e} \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

$$t_0 = t - \frac{d}{c} \text{ (s)}$$

$$d: \text{線路長 (m)}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$$

$$\rho_e, \rho_c: \text{大地および導体の固有抵抗 } (\Omega \text{ m})$$

4.4.4 開閉操作

開閉動作は，動作遮断器端子から図18のように消去波を印加する。動作直前の両端子電圧を V_1 , V_2 とすると次式で示される。

$$\begin{cases} e_l = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} (V_1 - V_2) u(t) \\ e_r = \frac{Z_1}{Z_1 - Z_2} (V_1 - V_2) u(t) \end{cases}$$

$$\text{ただし, } u(t) = \begin{cases} 1; & t \geq 0 \\ 0; & t < 0 \end{cases}$$

$$\dots (7)$$

4.4.5 集中要素の取扱い

インダクタンスやキャパシタンスと線路の境界では反射，透過係数は時間の関数である。たとえば表3の#1に示す接地インダクタンスの場合

この地点に到達した1なる電圧に対する反射電圧は

$$\Gamma = 1 - 2\varepsilon^{-Z_1/L}$$

で表わされる。この値は図19破線で示すようになるが，格子図法ではこれを実線のような台形波で近似する。そのためには微小時間 τ を適当に選定し， $Z = L/\tau$ なるサージインピーダンスを有する微小互長 $l = C_0\tau$ (C_0 は光速) をもつ線路で置換する。 τ を小さくすればいくらかでも近似をよくすることができる。表4は種々の集中定数の場合を整理して示したものである。

表3 集中要素の表現法

項番	Bewley による解			進行における置換法		
	回路	反射(e')透過(e'')電圧	β	置換回路	Z	条件
1		e'	$1-2\varepsilon^{-Bt}$	$\frac{Z_1}{L}$		$\tau < \frac{L}{Z_1}$
2		e'	$1-2\varepsilon^{-Bt}$	$\frac{1}{CZ_1}$		$\tau < CZ_1$
3		e'	$\frac{-Z_1+Z_2}{Z_1+Z_2} + \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}\varepsilon^{-Bt}$	$\frac{Z_1+Z_2}{L}$		$\tau < \min \left\{ \frac{L}{Z_1}, \frac{L}{Z_2} \right\}$
		e''	$\frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}(1-\varepsilon^{-Bt})$			
4		e'	$1-\frac{2Z_1}{Z_1+Z_2}\varepsilon^{-Bt}$	$\frac{1}{C(Z_1+Z_2)}$		$\tau < C(Z_1+Z_2)$ $R_1 = \frac{ZZ_2}{Z+Z_2}$ $R_2 = \frac{ZZ_1}{Z+Z_1}$ $R = \frac{Z_1Z_2}{Z_1+Z_2}$
		e''	$\frac{2Z_1}{Z_1+Z_2}\varepsilon^{-Bt}$			
5		e'	$-1+\frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}\varepsilon^{-Bt}$	$\frac{Z_1Z_2}{L(Z_1+Z_2)}$		$\tau < \frac{L(Z_1+Z_2)}{Z_1Z_2}$
		e''	$\frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}\varepsilon^{-Bt}$			
6		e'	$\frac{-Z_1+Z_2}{Z_1+Z_2} - \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}\varepsilon^{-Bt}$	$\frac{Z_1+Z_2}{CZ_1Z_2}$		$\tau < \frac{CZ_1Z_2}{Z_1+Z_2}$
		e''	$\frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}(1-\varepsilon^{-Bt})$			

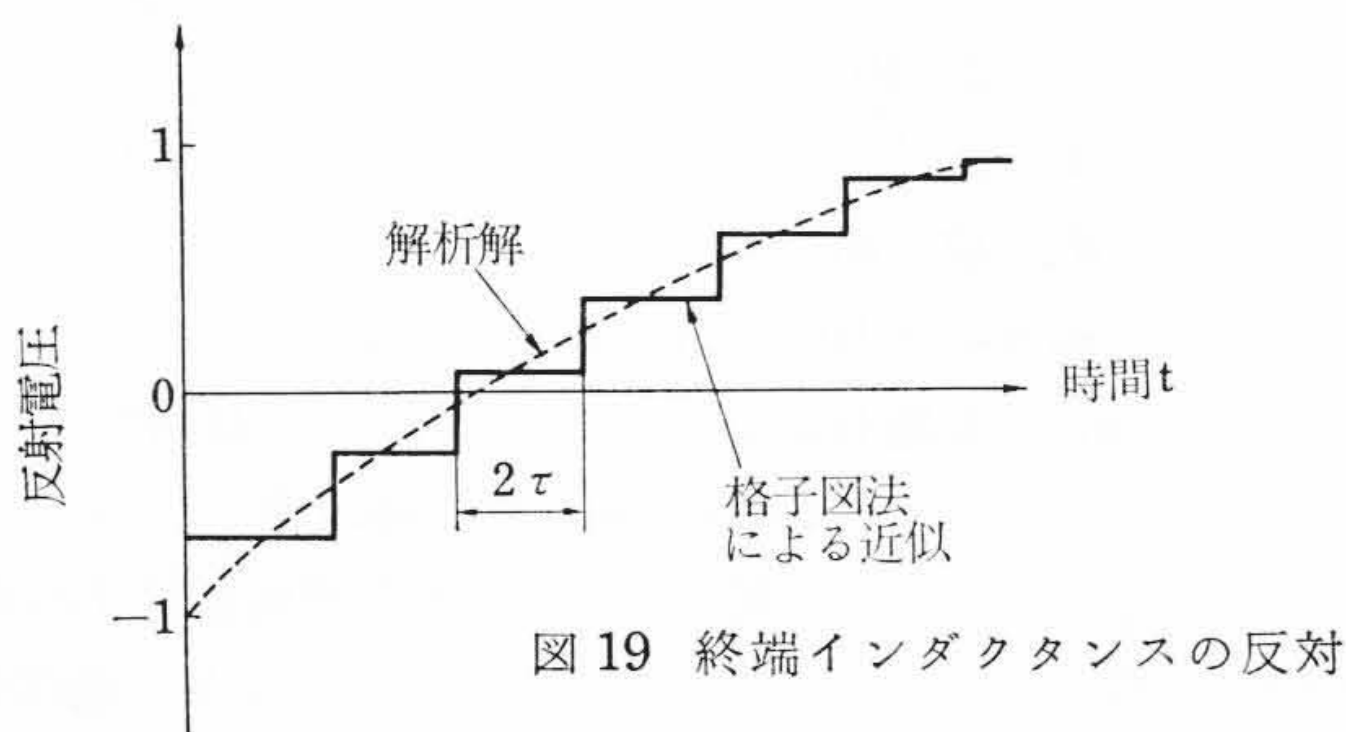


図19 終端インダクタンスの反対

5. 実測と計算波形の比較

5.1 東京電力275 kV 中東京幹線による検討例

図20の系統で、①または②の遮断器をそれぞれ相手側を開放状態で投入したときの対地電圧波形が昭和40年末に実測された。同一条件でデジタル計算を東京電力株式会社からの依頼により前章の方法で実施した。最大倍数を表4に、波形の比較を図21に示した。数値的にも波形的にもよく一致している。しかし計算のほうが若干高めに出ている。これは大地導電率の過少見積りか線路自体の抵抗分の無視によるものであろう。しかし実測自体にも誤差は含まれているのでこの程度に一致すれば予測計算としてはじゅうぶんである。

5.2 四国電力190 kV 那賀川幹線に対する検討

図22に示した系統において、①の遮断器を投入した場合の西条開閉所対地電圧の実測が昭和38年に実施された⁽¹⁴⁾。この場合C.B.②により新徳島火力線を切り放した場合と並列にした2条件がある。実測波形と比較するため同一条件でデジタル計算とT.N.A.によるアナログ計算の両者を実施した。その結果の代表例を示したのが図23である。T.N.A.による計算の場合は国府S.S.電源を短絡容量から算出した単なるインダクタンスとした場合(図中T₁と表示)と巻線比により電源側のコンデンサならびに送電線を考慮して詳細に模擬した場合(T₂と表示)の両者を検討している。これら四者を比較する

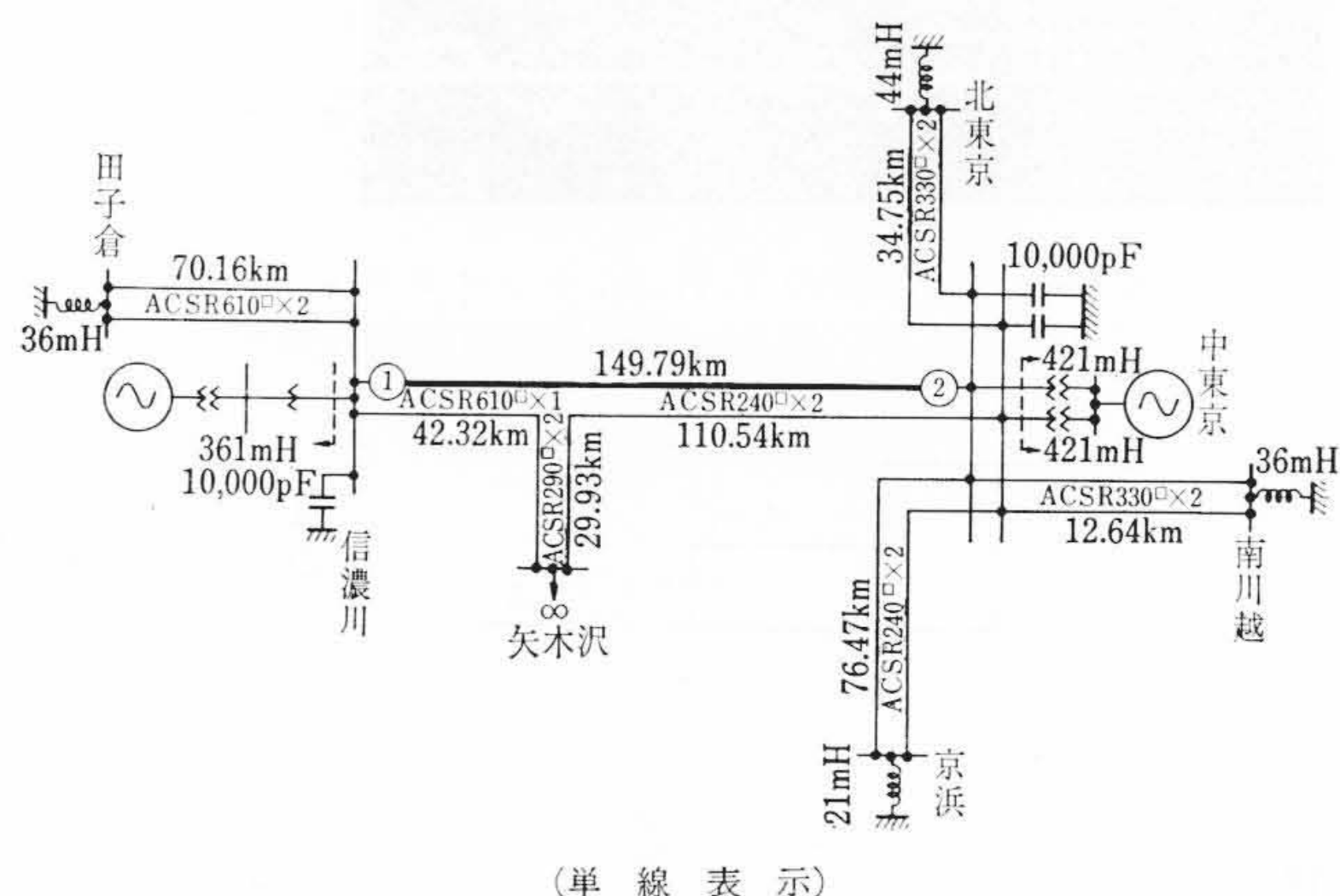


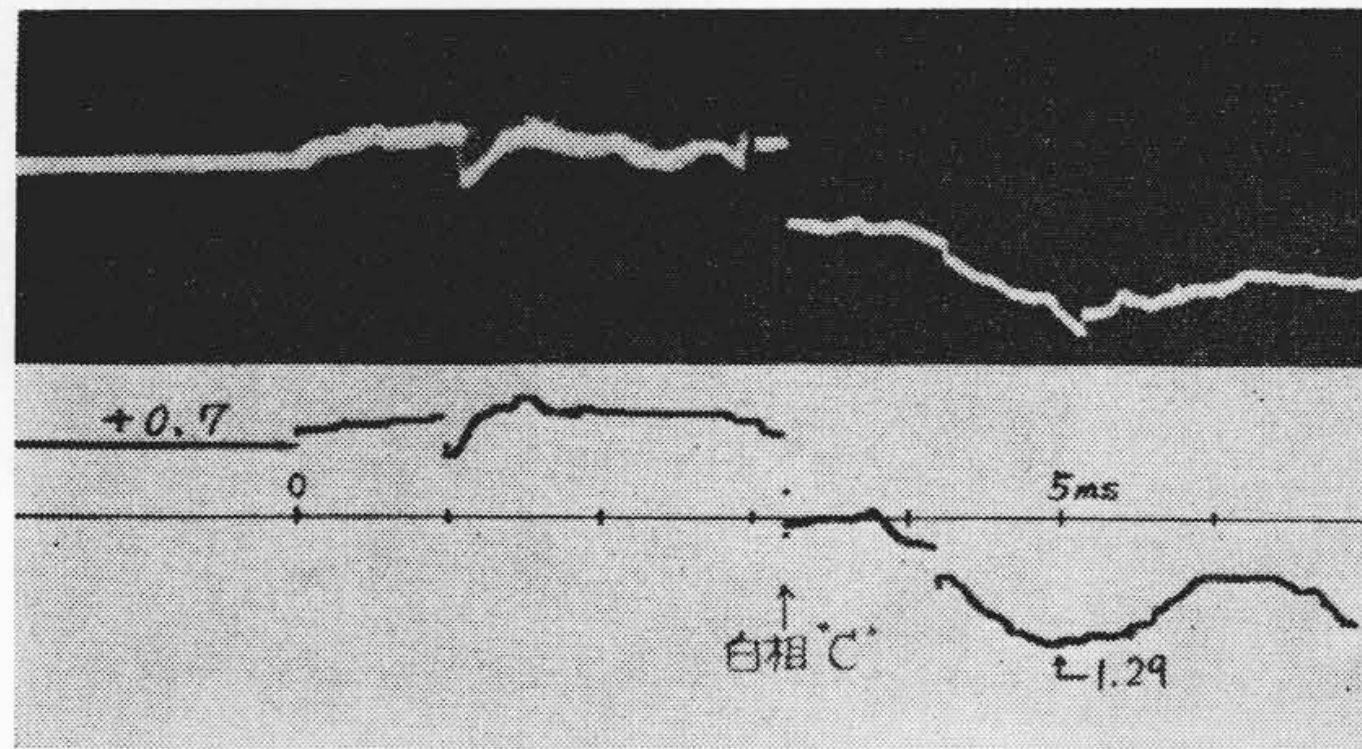
図20 計算対象の275 kV 系統

と不連続点の様相などデジタル計算(Dと表示)が実測結果(Fと表示)にもっとも類似している。この場合計算ステップは5μsとしているが、ステップを10あるいは20μsと簡略化すると最大過電圧は一般に若干低下する傾向となった。減衰に対する考慮を払うと前節でも同じであるが、ステップを5μsとしてその結果を0.9倍するとよりよい一致をみた。図23で最高値のみに注目すればF、T₁、T₂、Dの順に高くなっているが、これらの結果は10%以内で一致し、デジタル、T.N.A.ともに予測計算としてはじゅうぶんである。

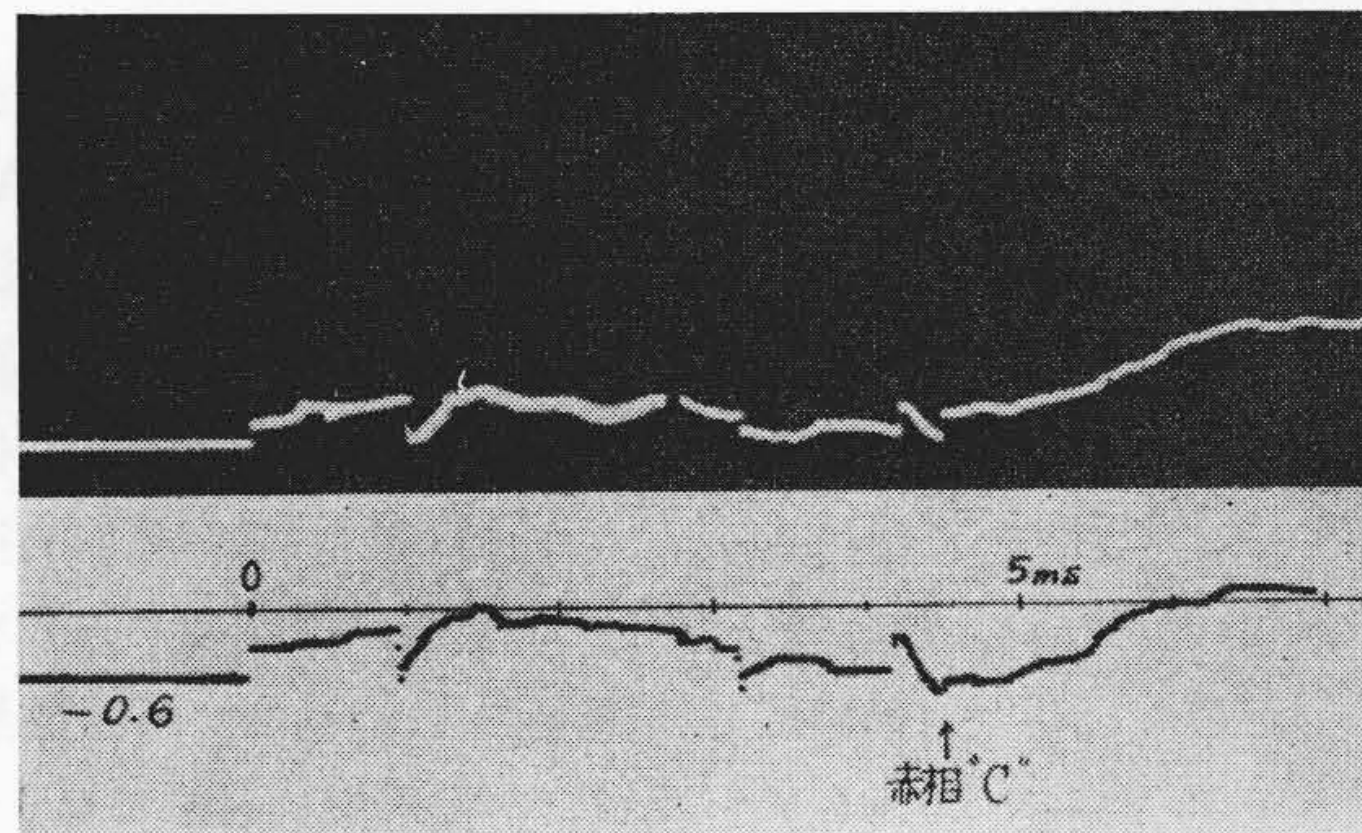
5.3 将来系に対する予測計算

4.3にT.N.A.による予測計算の一部を紹介したが、図13と同じく120 kmの線路についてデジタル計算による予測を試みた。この場合の系統は60 Hz系で、電源の正相、零相インピーダンスは表5のとおりで、いずれも健全回路の3相再投入を対象とした。3相の投入位相は従来のT.N.A.の解析から最過酷条件と予想される値を採用した。投入抵抗を0、250、500、750、1,000Ωとし、抵抗が入時間としては常に5 msを選定した。最大過電圧倍数ならびに発

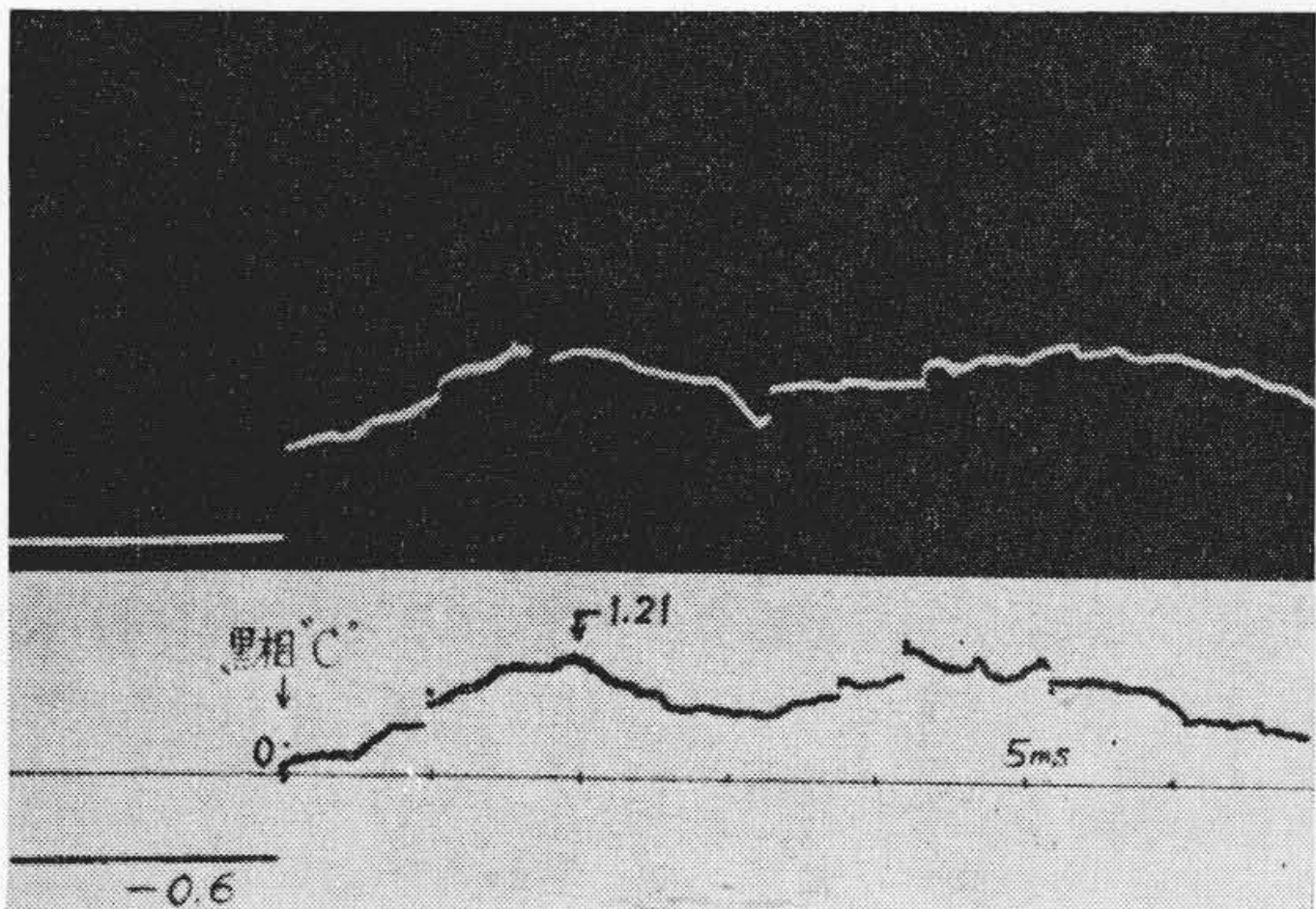
生時刻を計算条件とともに表 5 に記載した。代表例として $1,000\Omega$ の投入抵抗の場合の波形は図 24 に示すとおりである。上述の実測結果との照合からこの計算値は若干高めにできていると考えられる



ケース F'-7 送端白相対地 (上: 実測, 下: 計算)



ケース F'-7 送端赤相対地 (上: 実測, 下: 計算)



ケース F'-7 送端波形

図 21 デジタル計算波形と実測波形の比較 (信濃川 P.S 側)

が、抵抗そう入時間は常に 5ms とおいているため任意にばらついた場合を考えると実際値としてもこの表の値程度になるものと予想される。この結果からも投入抵抗として $750\sim 1,000\Omega$ を採用すれば過電圧を 1.6 倍以下に抑制することができる。また抵抗そう入時間としては 5ms 程度あればじゅうぶんである。

6. 投入抵抗式日立 ABB

日立製作所においては 500kV 級大容量 ABB 系列を開発するにあたり上記開閉インパルスの抑制対策を種々検討のうえ OPH 形 ABB を完成した。本 ABB の詳細については既報告⁽¹⁵⁾ にくわしく記載されているので重複をさけるが、1 遮断点あたり 150Ω の金属抵抗を適用し、 300kV 定格には 4 点 600Ω 、 525kV 定格には 6 点 900Ω を採用して、3.4 にのべた抵抗遮断、抵抗投入併用方式を選定した。その効果については 4.、5. に具体的計算で示したとおり近く

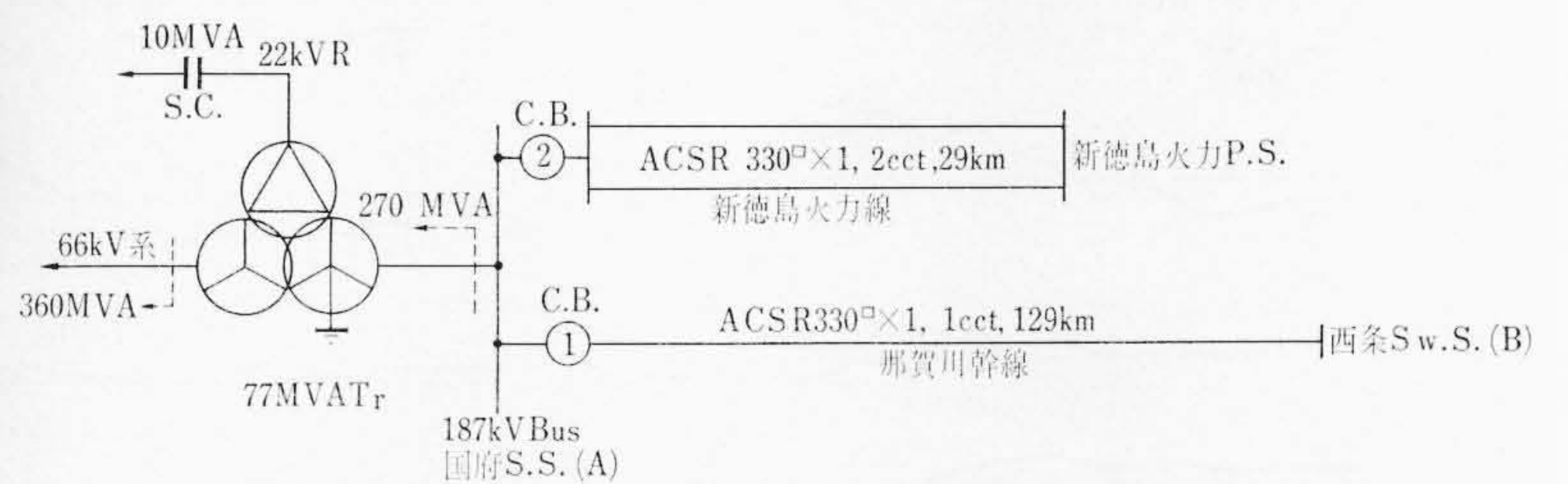


図 22 計算対象 190kV 系統単線結線図

表 4 最大過電圧倍数の比較

ケース	種別	送電端			遠方端		
		黒相	赤相	白相	黒相	赤相	白相
F'-7	実測	1.1	1.0	1.1	1.6	1.1	1.4
	計算	1.21	1.0	1.29	1.77	1.25	1.58
C-1	実測	1.4	1.1	1.1	1.7	1.3	1.8
	計算	1.16	1.25	1.25	1.54	1.61	1.91
J'-7	実測	1.0	1.1	1.7	1.1	1.2	2.2
	計算	1.0	1.0	1.63	1.04	1.0	2.54

倍数は相電圧波高値基準

表 5 500kV 将来系に対する再投入インパルス予測
線路長 120km 60Hz 系

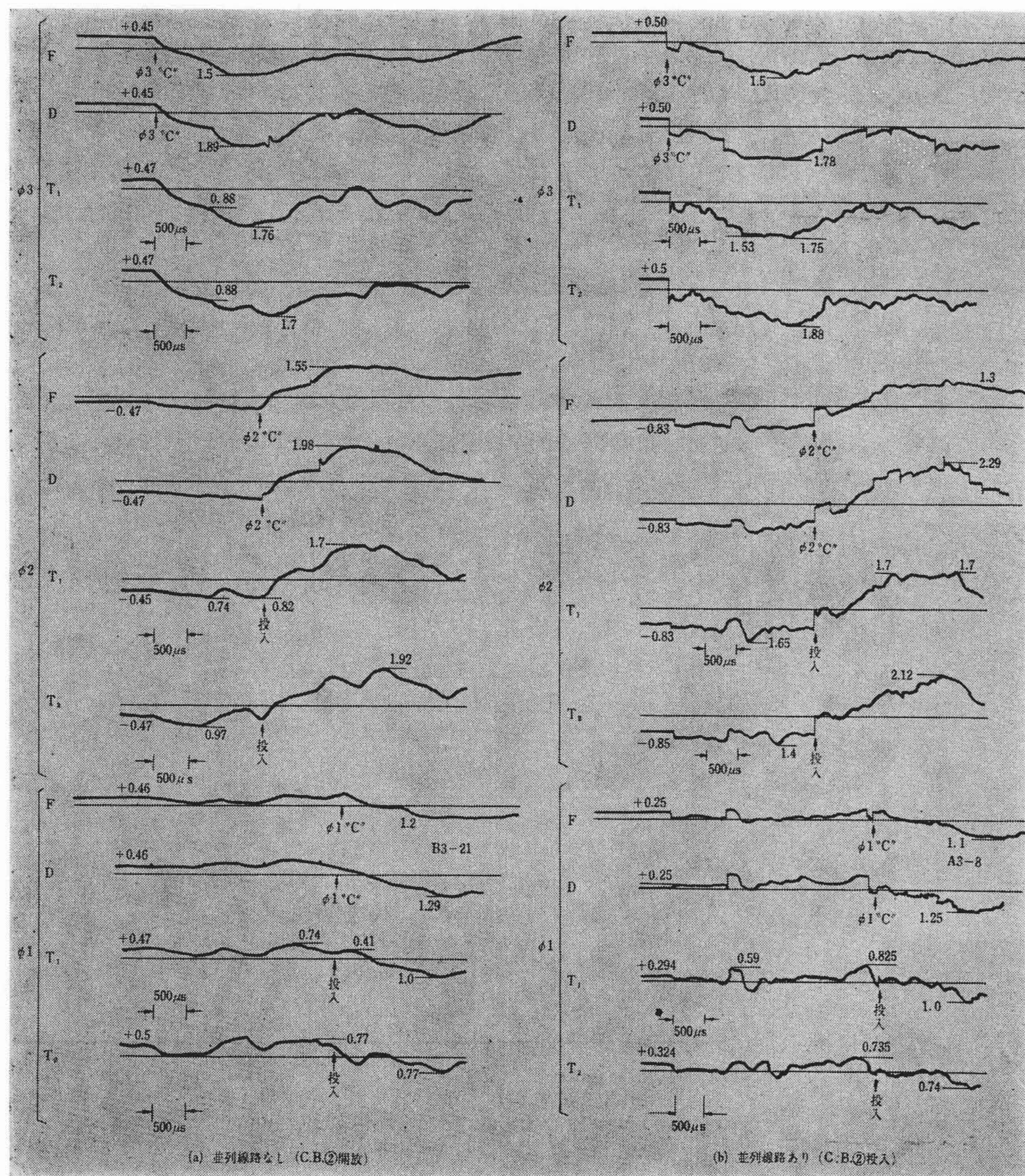
ケース 番 号 S G	電 波 %X *1	投入抵抗 (Ω)	投 入 時 刻 (ms)/位 相 (度)*2						送 端 過 電 圧*3						受 端 過 電 圧					
									対 地			相 間			対 地			相 間		
			φ1R	φ2R	φ3R	φ1	φ2	φ3	φ1	φ2	φ3	φ1-φ2	φ2-φ3	φ3-φ1	φ1	φ2	φ3	φ1-φ2	φ2-φ3	φ3-φ1
01	7.95 11.2	—	—	—	—	0.0 90.0	0.0 330.0	0.0 210.0	2.26 1100*4	1.72 2790	1.25 2970	3.62 1080	2.92 2810	2.80 1110	3.20 1390	2.72 2500	1.46 2700	5.40 1360	4.07 2560	3.73 1370
02	9.7 22.0	—	—	—	—	0.0 90.0	0.0 330.0	0.0 210.0	2.13 1280	2.52 3300	1.22 3200	3.39 1800	3.72 3300	2.78 1370	3.03 1530	2.83 3340	1.28 3560	4.98 1520	4.06 3360	3.60 1550
03	7.95 11.2	—	—	—	—	3.3 41.3	1.1 233.8	0.0 90.0	2.37 4360	2.02 2190	2.10 1090	4.17 4380	2.21 2150	3.20 4360	3.28 4750	3.05 2410	3.10 1320	5.96 4750	2.77 4790	4.79 4750
04	7.95 11.2	250	3.3 41.3	1.1 233.8	0.0 90.0	8.3 149.3	6.1 341.8	5.0 198.0	1.72 1840	1.34 740	1.31 1090	2.56 5150	2.13 9340	2.90 1770	1.86 2230	1.78 2500	1.83 1340	3.06 4750	2.33 2540	3.05 1360
05	7.95 11.2	500	3.3 41.3	1.1 233.8	0.0 90.0	8.3 149.3	6.1 341.8	5.0 198.0	1.61 2630	1.26 290	1.21 7880	2.24 1060	2.02 9390	2.47 1790	1.66 2230	1.32 1190	1.30 8290	2.09 5550	2.29 1380	2.50 2160
06	7.95 11.2	750	3.3 293.3	1.1 125.8	0.0 342.0	8.3 41.3	6.1 233.8	5.0 90.0	1.23 3200	1.13 7240	1.06 6030	2.28 9390	2.22 6910	1.87 4020	1.34 9750	1.28 7430	1.18 5793	2.50 9790	2.0 RV*3	1.81 5730
07	7.95 11.2	1,000	3.3 293.3	1.1 125.8	0.0 342.0	8.3 41.3	6.1 233.8	5.0 90.0	1.26 9350	1.18 7200	1.10 6040	2.39 9370	2.0 RV	1.82 5330	1.46 9770	1.33 7200	1.22 5750	2.70 9790	2.0 RV	1.93 5750

*1 零相
正相
1,000 MVA 基準

*2 正弦波基準

*3 過電圧は対地、相間共相電圧波高値基準、残留電圧は $\phi 1$, $\phi 3$ は -1.0 , $\phi 2$ は $+1.0$

*4 その過電圧が発生した時刻 (μs) 第 1 投入相基準

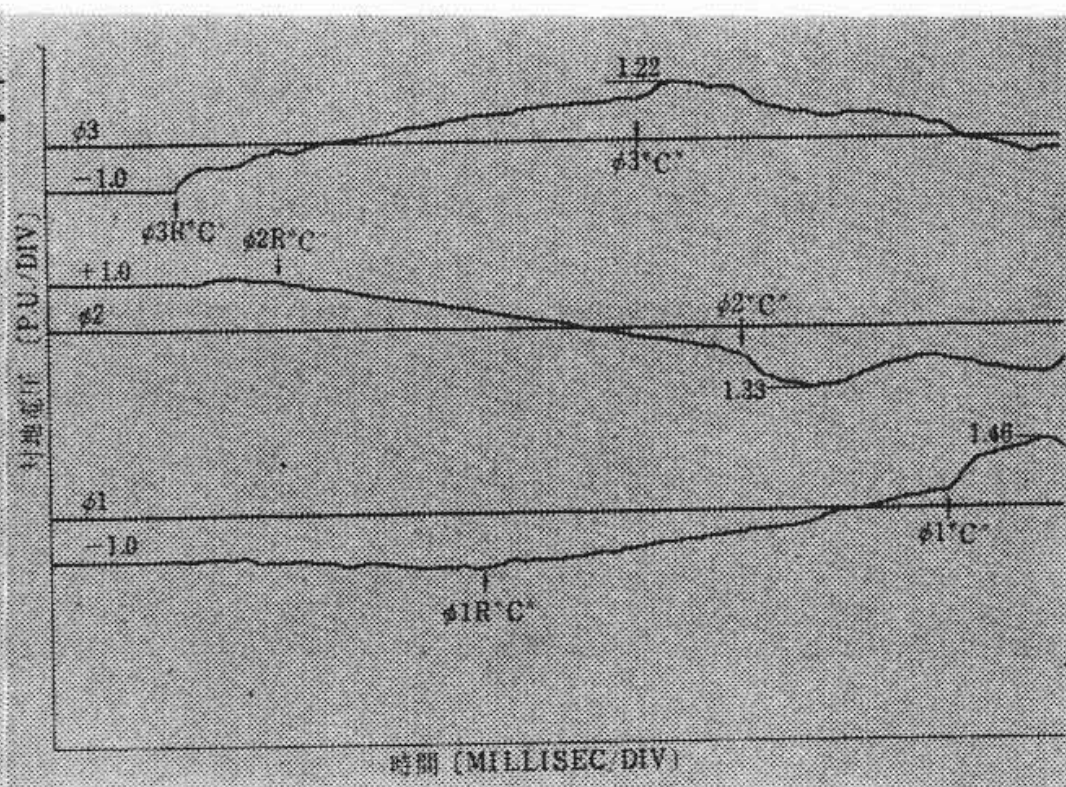


F：実測 D：デジタル T₁, T₂：T.N.A Bs.s 開放線路端対地電圧
 図 23 実測，デジタル，T.N.A.による投入インパルス波形の比較

わが国で運開を予定されている 200 km 以下の 500 kV 送電線では 1.6 倍以下，さらに長距離の 500 km 程度でも 1.9 倍以下に抑制できるはずである。なお本 ABB の 300 kV 定格は昭和 42 年以来多数が実系統で運営されており順調に稼働している。本 ABB による投入インパルスの実測は本文の予測計算との照合の点からもわが国最初の抵抗投入式 ABB の点からも興味あるところであるが，いまだその機会に恵まれていないので，その結果はさらに長距離送電線に対する予測計算とともに次の機会に報告したい。

7. 結 言

本論文には 500 kV 送電の絶縁基準となる開閉インパルス特に再



ケース SG-07 受端対地
 図 24 対地電圧デジタル計算波形

投入時の過電圧の状況およびその抑制法をのべ，過電圧の予測計算として T.N.A. による場合と特に最近開発した格子図法によるデジタル計算を紹介した。貴重な実測結果との比較によりじゅうぶん信頼性のあることをのべた。なお具体的抑制対策として抵抗遮断，抵抗投入方式を採用して実運転にはいっている日立製 ABB に言及した。投入抵抗として 600～1,000 Ω を採用し，抵抗そう入時間を 5～10 ms とすれば 500 kV 系の開閉インパルスはじゅうぶん 900 kV 以下 700 kV 程度に抑制でき絶縁協調が経済的に実施される。

終わりに本稿をまとめるにあたり研究成果を引用させていただいた 500 kV 送電特別委員会絶縁専門委員会の各位に厚く感謝するとともに，日立製作所日立研究所奥山，石川，高橋，平沢の各氏にお礼を申し上げる。

参 考 文 献

- (1) I. E. C. Publication 71 (1967)
- (2) E. W. Boehne, G. Carrara: CIGRE No. 415 (1964)
- (3) 三宅，笈川ほか：日立評論 44, 1154 (昭 37-8)
- (4) 500 kV 送電特別委員会絶縁専門委員会報告書 (昭 41-10)
- (5) CIGRE, W. G. 3.2 (Sec) 101 (1964)
- (6) Maury: CIGRE No. 143 (1966)
- (7) M. J. Battisson ほか：P. I. E. E. 114, p. 478 (1967-4)
- (8) 寺田：電学誌 87, p. 2000 (1967-10)
- (9) 平沢ほか：昭 40 東京支大予稿 No. 134
- (10) 山崎ほか：昭 43 東京支大予稿 No. 177
- (11) A. J. McElroy: Pwr. A & S, p. 88 (1963-4)
- (12) A. Arismunander et al: ibid p. 356 (1964-4)
- (13) A. J. McElroy: ibid p. 983 (1963-2)
- (14) H. Higasa: Switching Surge Test on No-Load 187 kV Transmission Line, Pwr. A & S, January, 1968, IEEE
- (15) 仲野，平田：日立評論 50 周年記念論文集 (昭 43)