

送電線上の搬送通信波の 電圧分布

高木昇・齋藤成文・尾上守夫

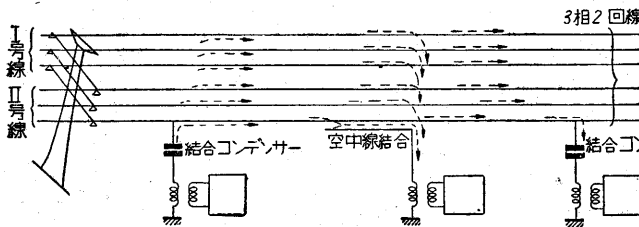
送電線を同時に通信線として利用するいわゆる電力線搬送通信は、発電所、変電所間の連結等に広く用いられているが、その際アンテナを通して高電圧の送電線に信號が送りこまれる模様を實測してみた

1. 緒言

送電線には、50, 60 \sim の商用周波電力を送る外に、50 \sim 450 kc 程度の高周波を重畳させ、これを通信用、繼電制御、遠隔測定用として利用している。この高周波を一般に搬送波と呼んでいるが、これが送電線上に傳播して行く状況は一般には商用周波の場合とその周波数の異なるためにいちじるしく相違しており、その實測は從來全く行われていなかった。

本文は昭和 27 年 2 月末に西東京幹線で行つた上述搬送電圧の送電線上の分布の實測結果を述べたもので、これに若干の理論的考察を加えてある。

さてこの實測を行つた本来の目的はもちろん搬送波電圧分布を求めること自身貴重な研究問題であるが、東京電力より當研究所に委託研究として依頼され、同社と協同研究を行つている「電力線搬送の空中線結合」という問題の一つの過程として行つたものである。ここで簡単に空中線結合について述べよう。上述の搬送波を高壓商用周波と分けて通信機器へ結合させるには、從來は第 1 圖のように耐圧の高いコンデンサー (0.001 \sim 0.003 μ f) を



第 1 圖

通して周波数の高い搬送波のみ分離させていた。しかるに近來の傾向として搬送通信の利用度の増加より送電線上数多くの結合點に裝備するようになり、結合用コンデンサーの高價 (一個數十萬圓) のため空中線結合という問題が起つてきた。すなわち第 1 圖のように送電線に沿つて、ある長さをもつた平行導線をはり、この空中線と送電線との間の静電並びに電磁結合を利用して通信機器へ搬送周波を送り込む (送信の場合は逆に送り出すのである。この時間問題になるのは圖に示した結合コンデンサ

ーが接續してある通信相(送電線一本ずつを相と呼ぶ)のみに搬送電流が流れず、他相にも誘導により相當量の電流が流れていることである。これら他相の電流(電壓)によつても上記空中線は結合するわけで、もし通信相と残相の電流が大きさ等しく逆位相であればその兩者の空中線への誘導は打消し合つて零になるわけである。

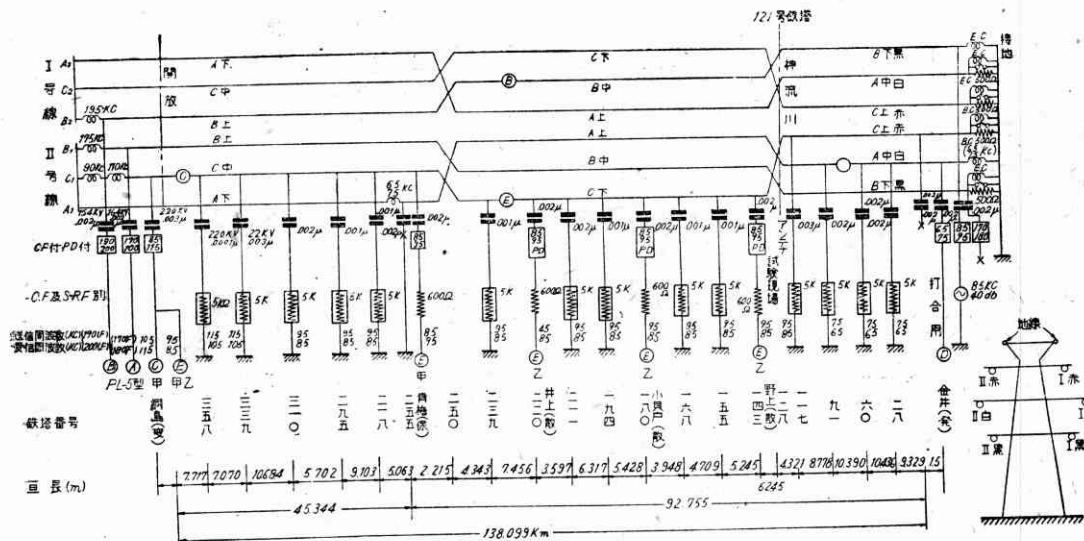
この點が結合コンデンサーと空中線とでは大いに異なる點で、後者の場合は通信相のみならず、他相にもどんな搬送電流(または電壓)が流れているか(大きさ、位相共に)を知ることが重要な問題となる。この問題に對する解答を得ようとしたのが本文に述べる實測結果である。もちろん今回の實測はある特定の場所について行つたものであり、測定器も数多くの缺點があり、その結果についてはある程度の難點があるが、多少ともこの方面の技術に參考になるものと信じ、こゝに發表する次第である。

なおこの問題については東京電力の御好意により當研究所に 2 km にわたり 1/10 スケールの模似送電線を假設し詳細な實驗を行つているので、近い將來に輝かしい解決が得られることと思う。

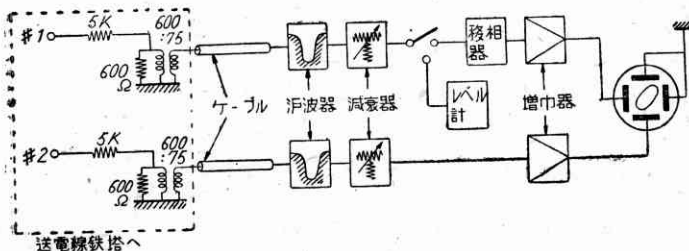
2. 實測結果

電圧分布測定は東京電力の西東京幹線金井—神流川横斷點まで 40 km の間で實施した。送電線の系統圖は第 2 圖に示す通りで、3 相 2 回線よりなつており、測定範圍では撚架はなく、その斷面配置圖は同圖に示すように I, II 號線共送電線上層より赤、白、黒相の順序となつている。測定は本年 3 月 26 \sim 29 日にわたつたが、この間は全相とも休止の状態にあり、搬送電流を金井の II 黒相に結合コンデンサーを経て送り込み、他の残線は 500 Ω 終端または直接々地を行つた。受端側は金井より約 138 km 離れた綱島附近で全線開放の状態にあつた。金井における送信電力は 10 W (40 dbm) で使用周波数は 85 kc である。

測定装置の概要は第 3 圖に示す通りで、電圧分壓器、整合變成器、ケーブル、濾波器、減衰器、移相器、増幅器にいたる系統を 2 組作り、それぞれの出力をブラウン管の上下および左右軸に印加して、いわゆるリサージュ圖形を畫かして兩者の入力端電圧の位相差を検出し、一定出力になるための減衰器の讀みよりその絶対値を求めるのである。電圧分壓器は 5600:600 Ω の抵抗比をとつているが、送電線の大地間特性インピーダンスが約 600 Ω



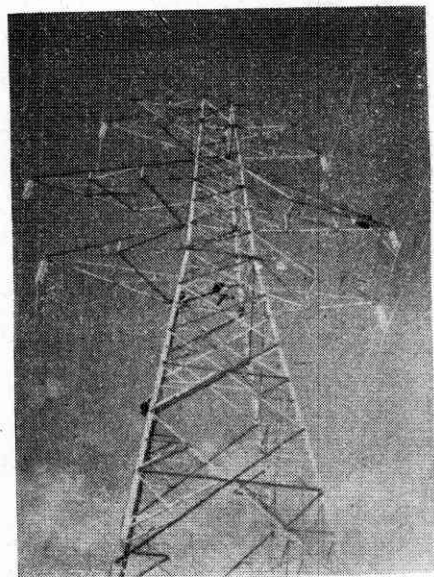
第 2 圖 西東京幹線搬送電流および空中線結合試験系統圖



第 3 圖

であるので分壓器自身の内部抵抗はこれに比して充分高く、測定器による電圧分布の變動は認められなかつた。この電圧分壓器および整合變成器 (600 : 75Ω) よりなる 2 組のプロブを送電線鉄塔上につるし上げ、#1 プロブは搬送電流をのせている II 黒相に直接々續し、#2 プロブは他の各相に順次接續し、前記の方法により、II 黒相電壓 (V_1 とする) に対する各相電壓 (V_i) の絶対値比 $\frac{|V_i|}{|V_1|}$ および兩者の位相差を測定する。

また通信相 V_1 の大きい絶対レベル (db 値) を求めるために、#1 回路の増幅器の代りにレベル計を接續し得るようになってゐる。これらの計器はすべて地上に配置し、上記プロブとの間は約 70 m のポリエチン充填 75 Ω ケーブルで接續してある。測定現場の送電線鉄塔上の寫眞を第 4 圖に示してある。測定點としては送端金井を初めとして第 1 表に示す點にわたり、距離としては 40 km 餘となつてゐる。

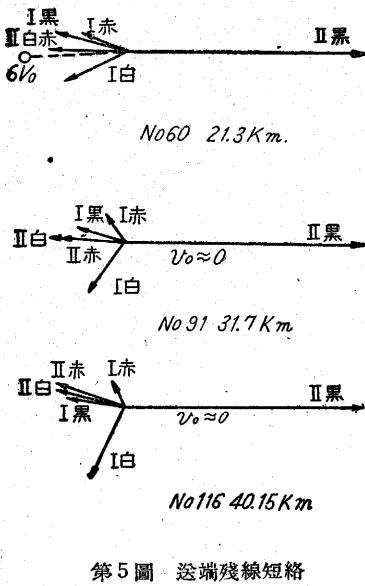


第 4 圖

第 1 表

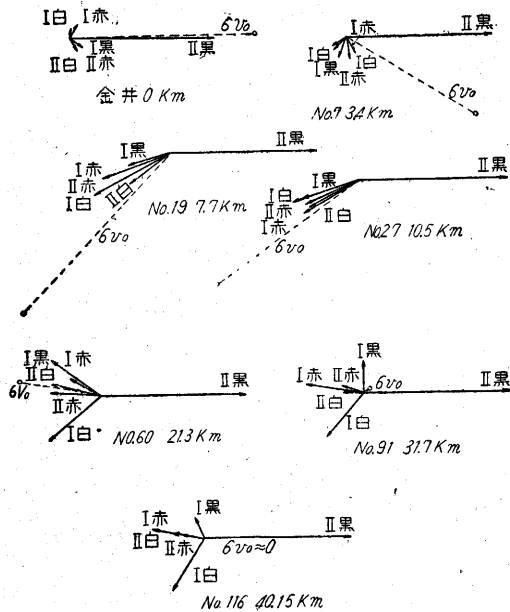
鉄塔番號	送端よりの距離
金 井	0 km
No. 7	3.37 km
No. 19	7.68 km
No. 27	10.5 km
No. 60	21.26 km
No. 91	31.65 km
No. 116	40.15 km

各測定點に對する各相の電圧ベクトル圖 (通信相である II 黒相電壓を基準にとつてある) を第 5 圖、第 6 圖に示してある。この内第 5 圖は金井送端で殘線短終 (直接々地) の場合、第 6 圖は 500 Ω 終端の場合であ



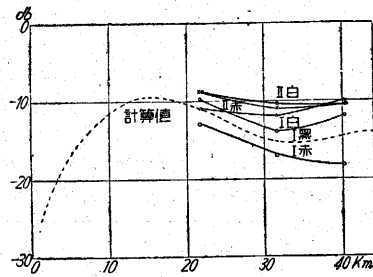
第5圖 送端残線短絡

る。このベクトル図には全電圧ベクトルのベクトル和を $6V_0$ の記號(これは後述の大地歸路成分を表わしている)を用いて點線で圖示してあるが、送端より離れるに従い時計の針の方向に廻轉しつつ減衰し、40 km 附近で消失していることがわかる。また各電壓ベクトルも大體において距離と共に右廻り

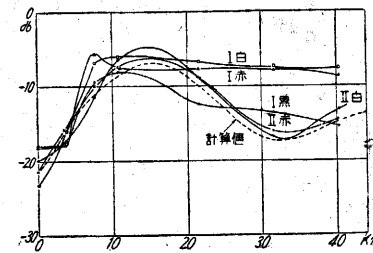


第6圖 送端残線 500 Ω 終端

になっている。上述の電壓 II 黒相に対する絶対値比 $\left| \frac{V_i}{V_1} \right|$ を示したものが、それぞれ第 7, 8 圖である。これらからわかる通り $\left| \frac{V_i}{V_1} \right|$ は大體 15 km 附近で最大値をとり次に波をうちつゝ一定値に近づくものと、極めて不規則な形状をとるものがある。この内前者は後に述べるように均一送電線と考えた場合の理論計算とよく一致する(圖では點線をもつて計算値を示してある)が、後者はこの傾向を示すものが第 8 圖, 第 2 圖より明かなように途中および受信側に結合コンデンサーが多く挿入されている I 白, I 赤相であることよりその影響である



第7圖 残線短絡

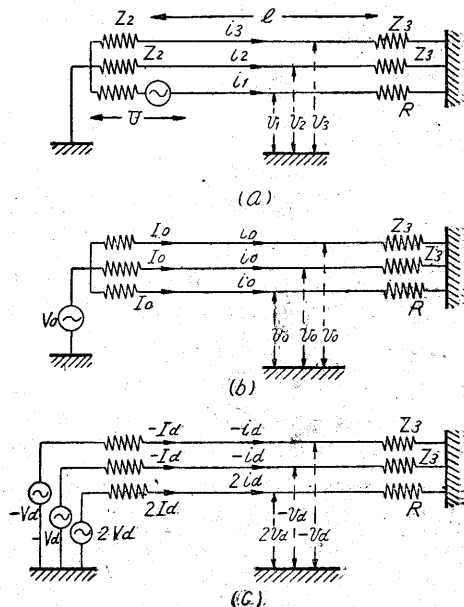


第8圖 送端残線 500 Ω 終端

と思われる。次に受信相 II 黒電壓の絶対レベルに関しては金井送端の電圧値 (V_{10}) と各測定點の電壓 V_i との比 $\left| \frac{V_i}{V_{10}} \right|$ を圖示すると第 11 圖 a). の實測値○印のようになり、これは上述の 15 km 附近で一度最小値をとり、後は單調に減衰して行き、鎖線の計算値と比較的よく一致する。

3. 理論的考察

前記に示すような實測結果を得たが、この問題に關して若干の理論的計算を行い、どの程度まで両者が一致するか、また不一致の原因は何であるかを検討して見ることにする。不平衡 3 相 1 回線の場合の計算は一般に對稱座標法による解法が廣く用いられているが、今第 9 圖 a) に示すように 1 相のみ異なり、他の 2 相は全く同様な場合を考えよう。この場合は對稱分は 2 個となり同圖 b) のような大地歸路回路と c) のような導體歸路回路の 2 つに分解して考えることができる。その時はある點にお



第 9 圖

ける通信相電壓，電流 (v_1, i_1) および残線の電壓，電流 ($v_2, v_3; i_2, i_3$) は次の式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= v_0 + 2v_d \\ v_2 &= v_3 = v_0 - v_d \\ i_1 &= i_0 + 2i_d \\ i_2 &= i_3 = i_0 - i_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

こゝに v_0, i_0 は第9圖 b) の大地歸路電壓，電流成分， v_d, i_d は c) 導體歸路電壓，電流成分を表わしている。

3 相 2 回線の場合も通信相以外の残線がすべて對稱と見做せる時は (第一近似として) 1) 式の代りに

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= v_0 + 5v_d \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ i_1 &= i_0 + 5i_d \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

で與えることができる。上式を見ても明かなように各相の電壓，電流は大地歸路成分と導體歸路成分のベクトル和またはベクトル差として與えられることがわかる。また全相の電壓，電流のベクトル和をとれば3相1回線の時は $3v_0, 3i_0$ ，2回線の時は $6v_0, 6i_0$ と大地歸路成分の整数倍となるのである (このことは前記のベクトル圖の説明の時にも述べた)。所が大地の導電率の有限のために大地歸路成分の減衰は導體歸路成分のそれに比し數倍にもおよび、長距離送電線の場合は大地歸路成分が消滅してしまうのが普通である (實測結果でも 40 km にて $6v_0$ 成分は消滅している)。さらに傳播速度についても導體歸路成分は大體光速 (3×10^{10} km/sec) に等しいのに反して大地歸路成分の速度は 5~15% 小さく，傳播波長も短縮する。従つて兩成分の位相は送端からの距離と共に變化し，大地歸路成分が遅れ，そのベクトル和または差である各相電壓，電流は複雑な變化をするのである。

上述の定性的な説明を明確にするためこの實驗の場合について數値計算を行つて見よう。第9圖で送端より l なる地點で全線開放の條件を入れると，送端より x の點における大地歸路および導體歸路電壓成分 v_0, v_d は

$$\left. \begin{aligned} v_0 &= \frac{V_0}{1 + e^{-2k_0 l}} \left\{ e^{-k_0 x} + e^{-k_0(2l-x)} \right\} \\ &= V_0 \frac{\cosh k_0(l-x)}{\cosh k_0 l} \\ v_d &= \frac{V_d}{1 + e^{-2kl}} \left\{ e^{-kx} + e^{-k(2l-x)} \right\} \\ &= V_d \frac{\cosh k(l-x)}{\cosh kl} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

こゝに V_0, V_d は送端の電壓各成分で，送端起電力を U とすると

$$\left. \begin{aligned} U &= V_0 + 2V_d \\ \delta &= \frac{V_0}{V_d} = \frac{1 + \frac{Z_2}{Z_d}}{1 + \frac{Z_2}{Z_0^e}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

Z_0^e, Z_d はそれぞれ大地歸路回路，導體歸路回路の送端より見た入力インピーダンスで

$$\left. \begin{aligned} Z_0^e &= \frac{1 + e^{-2k_0 l}}{1 - e^{-2k_0 l}} Z_0 \\ Z_d &= \frac{1 + e^{-2kl}}{1 - e^{-2kl}} Z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$Z_0, Z; k_0, k$ はそれぞれ大地歸路，導體歸路回路の特性インピーダンスおよび傳播定数であり，

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= \alpha_0 + j\beta_0 \\ k &= \alpha + j\beta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

また上述のように $\alpha_0 > \alpha, \beta_0 > \beta$ となる。

さて上式に $Z = 400 \Omega, Z_0 = 650 \Omega, \alpha = 0.005$ neper/km, $\alpha_0 = 0.05$ neper/km, $f_0 = 85$ kc, $\lambda_0 = 3.5$ km, $\beta = 2\pi/\lambda_0, \beta_0 = 2\pi/0.9 \lambda_0$ (傳播速度が光速の 90%)， $l = 138$ km の數値を代入すると， $|e^{-2k_0 l}| = e^{-13.8} < 0.001, |\hat{K}| = |e^{-2kl}| = 0.25$ となり，

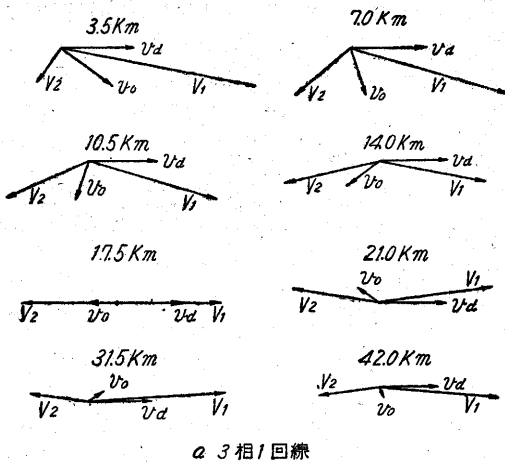
$$\left. \begin{aligned} v_0 &= V_0 e^{-\alpha_0 x - j\beta_0 x} \\ v_d &= V_d \frac{e^{-\alpha x - j\beta x} + \hat{K} e^{\alpha x + j\beta x}}{1 + \hat{K}} \\ Z_0^e &= Z_0, Z_d = \frac{1 + \hat{K}}{1 - \hat{K}} Z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

とおくことができる，従つて送端で残線短絡および 500 Ω 終端の場合は

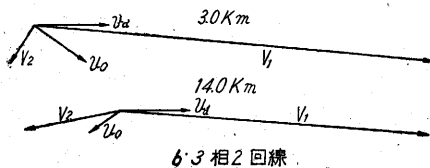
$$\left. \begin{aligned} \delta &= 1.00 \text{ (短絡)} \\ \delta &= \frac{1.27}{1 + \hat{K}} \text{ (500 } \Omega \text{ 終端)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

となり，さらに實測値より $\hat{K} = 0.25 e^{-j256^\circ}$ を計算に用いることとした。

まず送端残線短絡で，受端反射を無視した場合について v_0, v_d, V_1 (通信相)， $V_2 (=V_3)$ (残線) のベクトル圖および $\left| \frac{V_i}{V_1} \right|$ ($i=2, 3, \dots$) を計算したものが第10圖，11圖 a) b) である。いずれも a) は3相1回線，b) は2回線の場合であるが，その傾向は大體同様で，上述のように大地歸路成分の減衰の大きいこと，傳播速度の違いのため v_0 が v_d に比して距離に従つて大きさが減少すると共に位相が遅れて残線電壓は時計針の方向に廻轉することがわかる。また $\left| \frac{V_i}{V_1} \right|$ も v_0 と v_d との位相が 180° 異つた點 (約 15 km) で最大點をとること等よく實測値と一致した傾向を示す。次に送端残線 500 Ω 終端で受端からの反射を無視した場合の電壓ベクトル圖および $\left| \frac{V_i}{V_1} \right|$ 値は第12圖，第11圖 c) に示してあり，大體前と同様な傾向を示している。またこの場合の



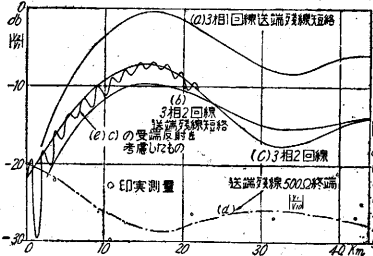
a 3相1回線



b 3相2回線

第 10 圖

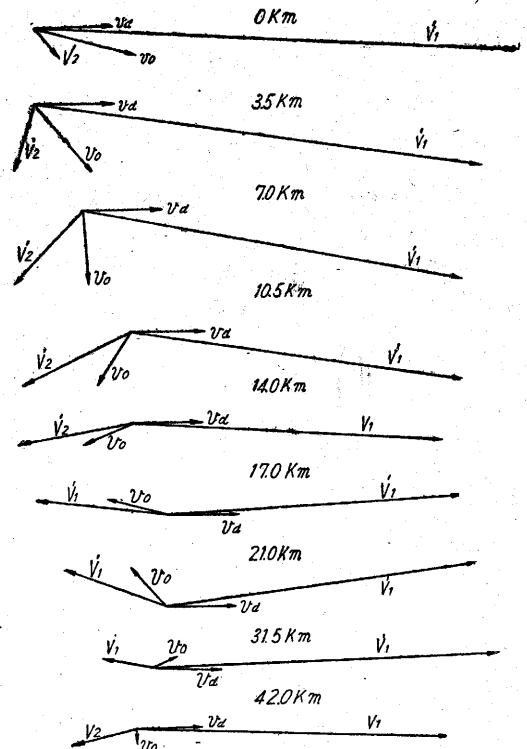
通信相電圧 V_1 の距離に対する変化 $\frac{V_1}{V_{10}}$ (V_{10} は送端電圧) を第 11 圖 d) に示してあるが、前節に述べた實測値と一致している。なお 500 Ω



第 11 圖

終端の場合で受端からの反射を考慮すると第 11 圖 e) に示すように極めて小さきな変化を示すが、その平均値は大體反射を無視した時の値に等しい。

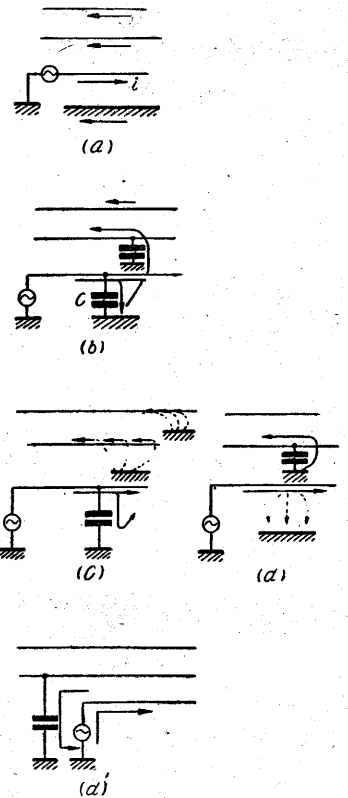
上述の均一送電線に対する近似計算と前述の實測結果を比較すると、すでに前にも述べたように可成りよく一致した傾向を示している。たゞ第 8 圖の I 白, I 赤相のみは極めてその電壓成分が大きく特異な傾向を示しているが、この相に結合コンデンサーが数多く挿入しているためではないかと考えられる。このように集中定数が存在する場合の理論計算は極めて複雑で現在まだその計算を行っていないが、定性的には次のように考えられる。すなわち第 13 圖 a) は單純な送電線の場合であるが、b) のように通信相と他相に距離を近くして結合コンデンサーのある場合にはその相間の相互アドミッタンスが増加したことになり、その相の電壓電流分布は他の殘線に比していちじるしく大きくなる。2 個コンデンサーがなくとも同圖 c), d) のように一方にコンデンサーがある場合は他相の對地容量を通して結合することになり、c) は殘線へ一様に行くとしても、d) ではコンデンサー



第 12 圖

のある殘線にのみ導線歸路成分が大きくなる。なお b), c), d) いずれの場合も送端からの距離が大であってもコンデンサー附近では大地歸路成分が発生することが豫想される (このことは今回實驗の後半に行つた空中線結合現場においても認められた)。

この實驗の I 赤, I 白相は上述の d) の場合に相當するわけで、この兩相への電壓成分が特に大きいのであると思われる。



第 13 圖

4. 結 言

以上送電線上の搬送通信電壓分布の實測結果とその理

論的検討を行つたが、その要點をあげれば

1) 均一送電線の場合には電圧分布は理論計算とよく一致し、大地歸路成分の減衰の大きいこと、傳播速度が小さいことのために残相電圧は時計針方向に廻轉しつゝ、一定關係に落着く。

2) 結合コンデンサーが挿入されている場合には、その相の成分が増加し複雑な傾向を示す。

なおこの實驗の後半に行つた空中線結合實測結果によれば、電圧分布測定が極めて重要な要素であり、その測定値の妥當であることを認めた。ちなみにこの空中線結合損失は 8.0 db で充分實用し得ることを知つた。

終りに協同研究者である東京電力通信係の方々、御指導、御教示頂いた本所星合、藤高教授に厚く御禮申上げる。(1952・6・30)

超音波厚み計の實用化進む

板の厚みを測るのに最も普通に使われているのは、物指、ノギス、マイクロメーター等の機械的測定法である。しかしこれらは板の周囲の部分しか測れず、板の周邊から遠い所や、ボイラー、タンク等の厚みは測れないために、従來は必要に迫られると孔をあけて測定するほかはなかつた。そこで孔をあけずにすませる測定法として X 線や γ 線の透過吸収を利用する厚み計が考えられるが、板の兩側に装置をおく必要がある點で應用範圍が制限される。

ところが一面から音速のわかつている超音速のインパルスを瞬間的に發射し、他面に當つて反射して戻ってくるまでの時間を測定すれば、一面に接するだけで厚みが求められる。これがいわゆる超音波探傷器で、金屬中の傷を見出すのにすでに實用されている。一方、板内に超音波の定在波を作り、その波から厚みを知る超音波厚み計は探傷器よりは、はるかに簡單でしかも或る程度の探傷も行い得るので最近注目されるに至つた。

第 3 部高木研究室では、探傷器の研究と併行してこの超音波厚み計の研究を進めてきた。まず發射する超音波の波長をダイヤルで變えて、板内に定在波のできたことを受話器で知る音響型超音波厚み計を試作したところ、現場で實用するには周囲の騒音にじゃまされ

やすいのと、手でダイヤルを廻すのが不便なことから、その實用性を疑問視してきた。そこで自動的に周波數を變え、板中での厚みに應じた共振圖形をブラウン管上に直接畫かせるブラウン管型超音波厚み計を試作した。これによれば共振點のブラウン管上の位置から厚みが知られるだけでなく、その強さから他端面の腐蝕狀況、板内の傷の有無等までも或る程度知り得る。

同研究室では、試作した装置を用い、硫酸、鹽酸、苛性ソーダ等の貯藏タンク、發酵用反應タンク等について裏張りの有無、腐蝕狀況等による影響を測つて、その實用性を確かめ、かつ工場からの實用測定の要求に應じてきた。また鋼管の製造工程中で、偏心を測るのにも利用され、マイクロメーターによる値と一致した傾向が得られている。板厚の測定誤差は良い面では 1~3% 以下にできる。

もちろん、この厚み計の對象は金屬ばかりでなく、超音波の通りやすいものならば、ガラス、陶器等の非金屬にも應用されている。

また厚みが知れていれば、被測定物中の音速が求められるので、水産廳からの依頼で魚肉等の音速を測り、また地震研究所からの依頼で岩石中の音速測定を行っている。最近重工業、化學工業方面からの要求が多いので、同研究室の設計を工場に移し、製品化が進められている。(1952・7・9)

“生産研究” 第 4 卷 第 8 號 (8 月 號)

正 誤 表

頁	段	行	種 別	正	誤
13	左	下 7	本 文	…ができるなら、	…ができるなる、
19	〃	3 7	〃	…することも	…することを
23	〃	2	〃	1935 年から 1938 年に…	1935 年から年に…
〃	〃	下 14	〃	以下同様に C ₃ A	以下同様に C ₄ A
〃	〃	下 9	〃	10,	16,
24	右	下 17	〃	中庸熱セメント	中鹽研セメント
〃	〃		第 2 表	(1946), <35 (右端)	(1930), <30
27	左		圖 面	第 3 圖	第 4 圖
29	〃	2	本 文	kVA	kAA
〃	〃		筆 者 紹 介	主任研究員, 工博, 元教授	主任研究員,
31	右	下 3	本 文	鹽分除去	庸素除去