



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	斷線に依り無負荷送電系統に發生する過電壓
Author(s)	小池, 東一郎; Koike, Tōichiro
Citation	北海道大學工學部研究報告, 9, 22-30
Issue Date	1953-12-10
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/40526">https://hdl.handle.net/2115/40526</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	9_22-30.pdf



# 斷線に依り無負荷送電系統に發生する過電壓

小池 東 一 郎

(昭和28年8月30日受理)

## Over Voltages caused by Opening the one or two lines of No Load Power System

Tōichiro KOIKE

### Abstract

Immediately after the interrupting of one or two phase conductors of power system having unloaded receiving terminal transformers, the over voltages are produced in some cases by ferro resonance of transformer inductance together with system zero sequence capacitance.

The method of calculation of these values is presented in this paper by means of Symmetrical Components and graphical solution.

And the calculated values are checked by experimentally obtained results.

無負荷受電端變壓器の連る系統に於て、送電端にて各相非同時遮斷を行つた場合、又は一線或いは二線斷線故障の發生した時等に於て、對地容量と變壓器との間に發生する可能性のある鐵共振に原因する過電壓値の決定は、飽和の存在の爲嚴密には困難であるが、テブナンの法則及び圖式解法による負荷對地電壓の決定法が、ペーターソン氏によつて呈出されている<sup>1)</sup>。しかし今對稱座標法を用い、圖式解法を併用して解けば、更に系統各部の過電壓が容易に決定出来る事となる。但し高調波分に就いては之を省略するものとする。

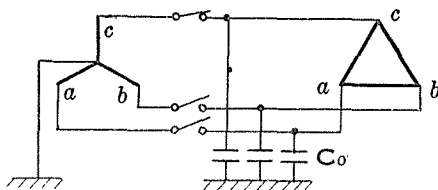
### [A] 一 線 斷 線

今、系統を第1圖の如く考え、定格電壓の下に於ける受電端變壓器の勵磁リアクタンスを

$X_m \Omega$  と置き、飽和を示す係數として

$$\delta = \frac{\text{定格端子電壓の倍數}}{\text{定格勵磁電流値の倍數}}$$

を考え、各邊の  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  を夫々  $X_m$  に乗すれば、斷線状態の下に於ける定常勵磁リアクタンスを、各端子電壓の函數として取扱う事が出来る。



第 1 圖

今、受電端變壓器回路を變換して

$$\left. \begin{aligned} Y_{ab} &= \frac{Z_c}{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a} \\ Y_{bc} &= \frac{Z_a}{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a} \\ Y_{ca} &= \frac{Z_b}{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_a &= r + j \frac{X_m \delta_1 \delta_3}{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3} \\ Z_b &= r + j \frac{X_m \delta_1 \delta_2}{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3} \\ Z_c &= r + j \frac{X_m \delta_2 \delta_3}{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

とし、對地容量を

$$Y = j\omega C_0 = jB_0 \dots\dots\dots (3)$$

と置き、更に

$V'_a, V'_b, V'_c; V_a, V_b, V_c =$  故障點電源側及び負荷側各相電壓

$I_a, I_b, I_c =$  故障點各相電流

$V'_0, V'_1, V'_2; V_0, V_1, V_2 =$  故障點電源側及び負荷側各相對稱分電壓

$I_0, I_1, I_2 =$  故障點各相對稱分電流

$Z_{0A}, Z_{1A}, Z_{2A} =$  故障點より見たる電源側各相分インピーダンス

$Y_{0A}, Y_{1A}, Y_{2A} =$  無負荷變壓器及び線路抵抗の各相分アドミッタンス

$Y'_{a0}, Y'_{a1}, Y'_{a2} =$  對地容量各相分アドミッタンス

とし、 $a$  相斷線の場合  $3V$  を斷線點兩端間に現われる電壓とすれば、次の諸式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} V'_0 &= V_0 + V = -Z_{0A} I_0 \\ V'_1 &= V_1 + V = E_a - Z_{1A} I_1 \\ V'_2 &= V_2 + V = -Z_{2A} I_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= Y_{a0} V_0 + Y_{a2} V_1 + Y_{a1} V_2 \\ I_1 &= Y_{a1} V_0 + (Y_{a0} + 3Y'_{a0}) V_1 + (Y_{a2} - 3Y'_{a2}) V_2 \\ I_2 &= Y_{a2} V_0 + (Y_{a1} - 3Y'_{a1}) V_1 + (Y_{a0} + 3Y'_{a0}) V_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} Y'_{a0} &= \frac{1}{3} (Y_{bc} + Y_{ca} + Y_{ab}) \\ Y'_{a1} &= \frac{1}{3} (Y_{bc} + a Y_{ca} + a^2 Y_{ab}) \\ Y'_{a2} &= \frac{1}{3} (Y_{bc} + a^2 Y_{ca} + a Y_{ab}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

又對地容量は各相相等しく  $Y$  であるから

$$\left. \begin{array}{l} Y_{a0} = Y \\ Y_{a1} = Y_{a2} = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \dots\dots\dots (8)$$

(7) を (5) に代入し

$$\left. \begin{array}{l} I_0 = YV_0 \\ I_1 = (Y + 3Y'_{a0})V_1 - 3Y'_{a2}V_2 \\ I_2 = -3Y'_{a1}V_1 + (Y + 3Y'_{a0})V_2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

今

$$Z_{1A} = Z_{2A} \dots\dots\dots (10)$$

とし, 更に

$$\left. \begin{array}{l} Y + 3Y'_{a0} = y \\ 1 + YZ_{0A} = z \end{array} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$\left. \begin{array}{l} z(y - 3Y'_{a2}) + Y(1 + yZ_{1A}) = P \\ z(y - 3Y'_{a2}) - 3YY'_{a2}Z_{1A} = Q \\ z(3Y'_{a1} - y) + 3YY'_{a1}Z_{1A} = R \\ z(3Y'_{a1} - y) - Y(1 + yZ_{1A}) = S \end{array} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

と置き, (4), (6), (8), (9), (11) 及び (12) 式に依り計算を行えば, 次の結果が得られる。

$$\left. \begin{array}{l} I_0 = Y\{y(R-S) - 3Y'_{a1}(P-Q)\} E_a/(PS-QR) \\ I_1 = Y(yS - 3Y'_{a1}Q) E_a/(PS-QR) \\ I_2 = Y(3Y'_{a1}P - yR) E_a/(PS-QR) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

$$\left. \begin{array}{l} V_0 = \{y(R-S) - 3Y'_{a1}(P-Q)\} E_a/(PS-QR) \\ V_1 = \{PS - QR - y(YZ_{1A} + z)S - 3Y'_{a1}(YZ_{1A} - z)Q + yzR - 3Y'_{a1}zP\} E_a/(PS-QR) \\ V_2 = \{-3YY'_{a1}Z_{1A}P + YZ_{1A}yR + yz(R-S) + 3Y'_{a1}z(Q-P)\} E_a/(PS-QR) \end{array} \right\} (14)$$

$$V = -z\{y(R-S) - 3Y'_{a1}(P-Q)\} E_a/(PS-QR) \dots\dots\dots (15)$$

今

$$Z_{1A} = Z_{2A} = Z_{0A} = 0 \dots\dots\dots (16)$$

とすれば, 上記諸式は夫々

$$\left. \begin{array}{l} P = Q + X \\ Q = Y + 3(Y'_{a0} - Y'_{a2}) \\ R = -\{Y + 3(Y'_{a0} - Y'_{a1})\} \\ S = R - Y \end{array} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

$$\left. \begin{array}{l} I_0 = Y\{Y + 3(Y'_{a0} - Y'_{a1})\} E_a/T \\ I_1 = \{-2Y^2 - 9YY'_{a0} - 9Y'_{a1}{}^2 + 9Y'_{a1}Y'_{a2}\} E_a/T \\ I_2 = \{Y^2 + 3YY'_{a1} + 6YY'_{a0}{}^2 + 9Y'_{a0}{}^2 - 9Y'_{a1}Y'_{a2}\} E_a/T \\ T = -3(Y + 2Y'_{a0} - Y'_{a1} - Y'_{a2}) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= I_0/Y \\ V_1 &= E_a + V_0 \\ V_2 &= V_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

$$V = -V_0 \dots\dots\dots (20)$$

となり, (4) 及び (19) 式より

$$\left. \begin{aligned} V_a &= E_a + 3V_0 \\ V_b &= a^2 E_a \\ V_c &= a E_a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

及び

$$\left. \begin{aligned} V_{ab} &= \left( \frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) E_a + 3V_0 \\ V_{bc} &= -j\sqrt{3} E_a \\ V_{ca} &= - \left( \frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) E_a - 3V_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

である。更に  $r=0$  の場合には次式が成立つので、簡単に圖式解法が適用出来る。

$$|V_{ab}| = |V_{ca}| \dots\dots\dots (23)$$

又此の場合は (1), (2) より

$$\left. \begin{aligned} Y_{ab} &= \frac{1}{jX_m \delta_1} \\ Y_{bc} &= \frac{1}{jX_m \delta_2} \\ Y_{ca} &= \frac{1}{jX_m \delta_3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

故に (6) より

$$\left. \begin{aligned} Y'_{a0} &= -j \frac{1}{3} \frac{\delta_3 \delta_1 + \delta_1 \delta_2 + \delta_2 \delta_3}{X_m \delta_1 \delta_2 \delta_3} \\ Y'_{a1} &= -j \frac{1}{3} \frac{\delta_3 \delta_1 + a \delta_1 \delta_2 + a^2 \delta_2 \delta_3}{X_m \delta_1 \delta_2 \delta_3} \\ Y'_{a2} &= -j \frac{1}{3} \frac{\delta_3 \delta_1 + a^2 \delta_1 \delta_2 + a \delta_2 \delta_3}{X_m \delta_1 \delta_2 \delta_3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

今

$$V_0 = r_0 + jX_0 \dots\dots\dots (26)$$

と置けば, (3), (18), (19) 及び (25) より

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= - \frac{1}{3 \{ B_0 \delta_1 \delta_2 \delta_3 - \delta_2 (\delta_1 + \delta_3) \}} [X_m B_0 \delta_1 \delta_2 \delta_3 - 1.5 \delta_2 (\delta_1 + \delta_3)] E_a \\ X_0 &= - \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{\delta_2}{B_0 \delta_1 \delta_2 \delta_3 - \delta_2 (\delta_1 + \delta_3)} (\delta_1 - \delta_3) E_a \end{aligned} \right\} \dots\dots (27)$$

(22), (27) より, (23) が成立つ爲には

$$X_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (28)$$

即ち

$$B_0\delta_1\delta_2\delta_3 - \delta_2(\delta_1 + \delta_3) = \infty$$

又は

$$\delta_1 - \delta_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (29)$$

かくて  $X_m\delta_2$  變壓器相が開放された場合, 對地容量が無限大となつた場合以外では  $\delta_1 = \delta_3$  が條件となる。

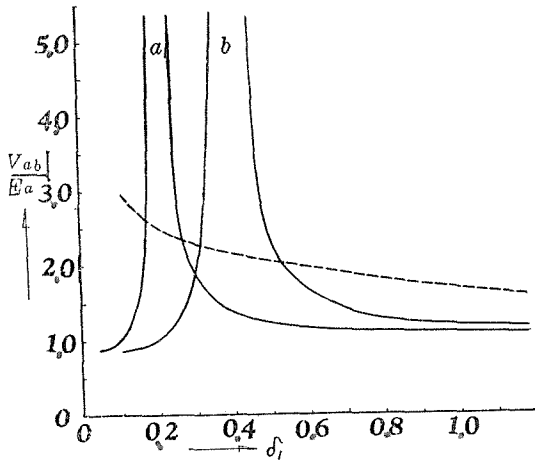
扱て此の場合は, (22), (27) 及び (29) より結局

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_{ab}}{E_a} &= \frac{0.5B_0X_m\delta_1}{B_0X_m\delta_1 - 2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{V_{ca}}{E_a} &= -\frac{0.5B_0X_m\delta_1}{B_0X_m\delta_1 - 2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{V_{bc}}{E_a} &= -j\sqrt{3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

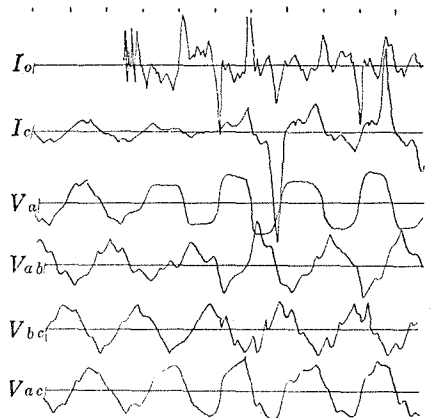
となる。

次に, 受電端變壓器無負荷飽和特性曲線より,  $|V_{ab}/E_a| - \delta_1$  曲線を求め, また (30) で得た  $|V_{ab}/E_a| - \delta_1$  曲線を計算して, 之等を同一面上にて示せば, 兩曲線の交點は求むる電壓及び飽和度を示すものであつて, 鐵共振を生ずる定數範圍にては一般に3點で交叉する。かくて  $\delta_1$  の夫々の値より, 系統各部の生じ得べき基本周波數の電壓が計算出来ることとなる。此の場合  $\delta_2 = 1$  であり,  $\delta_1$  の3つの値の中間のものは一般に不安定である。

第2圖は送電端 210 V, 3 KVA × 3, Δ-Y 結線, 受電端 1 KVA × 3, Δ-Δ 結線,  $X_m = 300 \Omega$



第 2 圖



第 3 圖

なる模擬線に就いて、對地容量各相 (a) 102 M.F.D. 及び (b) 54.4 M.F.D. の場合の計算結果を示したものである。點線は 1 KVA 變壓器の飽和特性より求めた  $|V_{ab}/E_a| - \delta_1$  曲線である。實測値は各相抵抗、電源側インピーダンス、及び高調波の影響で嚴密には合致しないが、(a) で受電端各相線間電壓は夫々 293, 264, 212 V, 又 (b) で 296, 268, 210 V の讀みとなつてゐる。第 3 圖はオッシログラフの 1 例である。

### [B] 二線断線

二線断線の場合も同様な假定の下にて圖式的に求め得る。第 1 圖にて今 a, b 相断線とする時、断線線條端間に現われる電壓を夫々  $3V$ ,  $3V'$  とすれば、次の諸式が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} V'_a &= V_a + 3V \\ V'_b &= V_b + 3V' \\ V'_c &= V_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= YV_0 \\ I_1 &= (Y + 3Y'_{a0})V_1 - 3Y'_{a2}V_2 \\ I_2 &= -3Y'_{a1}V_1 + (Y + 3Y'_{a0})V_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (32)$$

$$\left. \begin{aligned} Y'_{a0} &= \frac{1}{3} (Y_{bc} + Y_{ca} + Y_{ab}) \\ Y'_{a1} &= \frac{1}{3} (Y_{bc} + aY_{ca} + a^2Y_{ab}) \\ Y'_{a2} &= \frac{1}{3} (Y_{bc} + a^2Y_{ca} + aY_{ab}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (33)$$

$$Y = jB_0 \dots\dots\dots (34)$$

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_0 + I_1 + I_2 = 0 \\ I_b &= I_0 + a^2I_1 + aI_2 = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (35)$$

又

$$\left. \begin{aligned} V'_0 &= -Z_{0A}I_0 \\ V'_1 &= E_a - Z_{1A}I_1 \\ V'_2 &= -Z_{2A}I_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (36)$$

かくて上諸式より  $V_0, V_1, V_2, I_0, I_1, I_2, V, V'$  を求め得るが、今

$$\left. \begin{aligned} Y + 3Y'_{a0} &= y \\ 1 + YZ_{0A} &= z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (37)$$

$$\left. \begin{aligned} Y - ayz + YZ_{1A}y + 3aY'_{a2}z + 3(a+1)YY'_{a2}Z_{2A} &= P' \\ Y + (a+1)yz + YZ_{1A}y + 3Y'_{a2}z + 3(a+1)YY'_{a2}Z_{2A} &= Q' \\ -(a+1)Y + 3aY'_{a1}z - 3YY'_{a1}Z_{1A} - ayz - (a+1)YZ_{2A}y &= R' \\ -(a+1)Y - 3(a+1)Y'_{a1}z - 3YY'_{a1}Z_{1A} - yz - (a+1)YZ_{2A}y &= S' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (38)$$

と置けば、結局

$$\left. \begin{aligned} V &= z(yS' + 3Y'_{a1}Q') E_a/T' \\ V' &= -z(yR' + 3Y'_{a1}P') E_a/T' \\ T' &= (P'S' - Q'R')/a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (39)$$

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= -\frac{Y(V+V')}{z} \\ I_1 &= \frac{I_0}{a} \\ I_2 &= -\frac{(a+1)}{a} I_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (40)$$

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= \{y(R' - S') + 3Y'_{a1}(P' - Q')\} E_a/T' \\ V_1 &= E_a - a(YZ_{1A} - az)(yS' + 3Y'_{a1}Q') E_a/T' \\ &\quad - a\{(1+a)z + YZ_{1A}\}(yR' + 3Y'_{a1}P') E_a/T' \\ V_2 &= -a\{az + (a+1)YZ_{2A}\}(yS' + 3Y'_{a1}Q') E_a/T' \\ &\quad + a\{z + (a+1)YZ_{2A}\}(yR' + 3Y'_{a1}P') E_a/T' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (41)$$

今  $Z_{0A} = Z_{1A} = Z_{2A} = 0, r = 0$  とすれば, 上諸式は

$$\left. \begin{aligned} P' &= Y - ay + 3aY'_{a2} \\ Q' &= Y + (a+1)y + 3Y'_{a2} \\ R' &= -(a+1)Y + 3aY'_{a1} - ay \\ S' &= -(a+1)Y - 3(a+1)Y'_{a1} - y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (42)$$

$$\left. \begin{aligned} V &= (yS' + 3Y'_{a1}Q') E_a/T' \\ V' &= -(yR' + 3Y'_{a1}P') E_a/T' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (43)$$

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= -Y(V+V') \\ I_1 &= \frac{I_0}{a} \\ I_2 &= -\frac{(a+1)}{a} I_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (44)$$

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= -(V+V') \\ V_1 &= E_a - \frac{aV - (a+1)V'}{a} \\ V_2 &= -\frac{aV + V'}{a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (45)$$

となり, (45) より

$$\left. \begin{aligned} V_a &= E_a - 3V \\ V_b &= a^2 E_a - 3V' \\ V_c &= aE_a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (46)$$

かくて  $r = 0$  故

$$V_a = V_b \dots\dots\dots (47)$$

即ち

$$(1-a^2) E_a = 3(K-V) \quad \dots\dots\dots (48)$$

が成立ち (43), (48) 及び (25) より

$$\begin{aligned} \delta_1 B_0 (a-a^2) (\delta_2 - \delta_3) &= 0 \\ \delta_2 &= \delta_3 \quad \dots\dots\dots (49) \end{aligned}$$

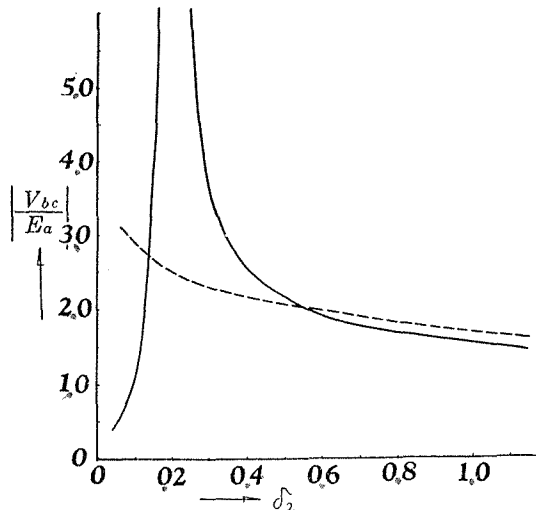
(46) より

$$\left. \begin{aligned} V_{ab} &= 0 \\ V_{bc} &= (a^2-a) E_a - 3V' \\ V_{ca} &= (a-1) E_a + 3V' \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (50)$$

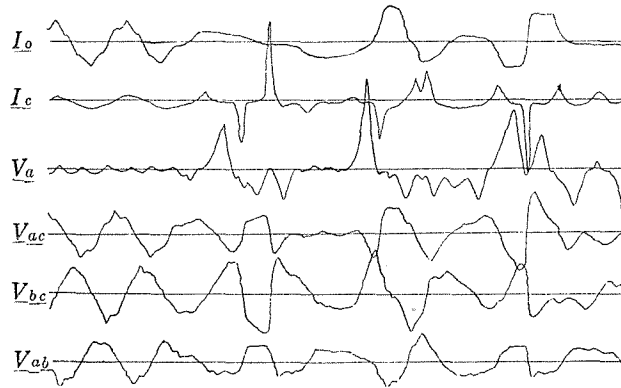
上式と (49) より

$$\frac{V_{cb}}{E_a} = \frac{V_{ca}}{E_a} = - \left( \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \frac{X_m B_0 \delta_2}{X_m B_0 \delta_2 - 1} \quad \dots\dots\dots (51)$$

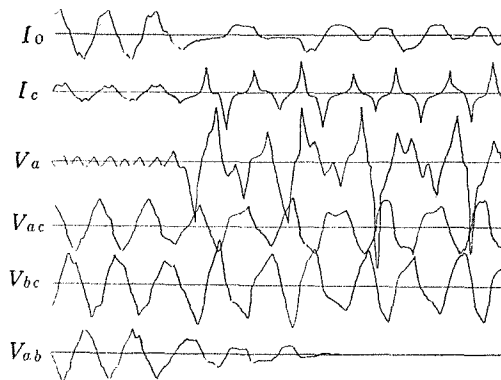
此の場合も上式の計算と、實測せる飽和特性より別々に  $|V_{ca}/E_a| - \delta_2$  曲線を求めて、同一座標軸上の交点を求め得る。第4圖は前記模擬線に對する計算結果であり、第5圖はオッシログラム例である。(a) は  $r=0.17 \Omega$ , (b) は  $r=4.17 \Omega$  の場合であつて、(a) では計器の讀取は困難である。



第4圖



第 5 圖 (a)



第 5 圖 (b)

## 結 言

斷線事故等の場合，負荷側無負荷變壓器の飽和係数を圖式方法を併用して決定し，回路状態を知る事が出来る。しかしオッシログラムで判明する如く，低壓模擬回路では，抵抗分，電源インピーダンス，高調波等，計算で省略した因子の影響がかなり存在するので，結果の誤差は免れ得ないが，實際の送電系統に於ては，之等の影響は比較的少ないので，計算値に近接するものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) H. A. Peterson: Transients in Power Systems. p. 252.