

# 接地測距電驛之 動作原理與運用

■ 彭雲將



## 一、前言

電力系統的故障可分為短路、接地、及開路。接地故障發生的機率最大，約為85~90%。短路故障發生的機率次之，約為10~15%。開路發生的機率極微。

保護電驛系統之任務為儘速清除電力系統之故障，保護人員及設備之安全，確保電力系統之穩定運轉及連續供電。接地保護電驛係針對接地故障設計，故其動作深受零相序電流 ( $I_0$ )及零相序電壓 ( $V_0$ )之影響。

在高電壓及超高壓之大型輸電網路系統裡，使用方向性過電流電

驛保護輸電線而想獲得適妥的保護協調，有其事實上的困難。因此，測距電驛也就廣泛的被使用於高電壓或超高壓輸電線保護。測距電驛係根據電驛裝設位置與故障點間之阻抗大小而產生當的反應。此阻抗與到故障點的距離成比例，因此也稱為阻抗電驛。根據線間電壓及兩線電流間之差而產生反應者稱為相間測距電驛 (2I)。利用線至中性點之電壓、線電流及其零相序電流而產生反應者稱為接地測距電驛 (2IN)。

相間測距電驛可以偵測兩相短路、兩相接地、及三相短路。接地

測距電驛能偵測單相接地故障。

## 二、單相接地故障計算

電力系統如發生單相接地故障時，(如 A 相接地)，則故障點可用下述方程式描述：

$$V_a=0 \text{ 及 } I_B=I_C=0$$

$$\text{由 } \begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{得 } Ia_0 = Ia_1 = Ia_2 = \frac{1}{3} Ia$$

$$\text{另由 } V_{a0} = -Z_0 Ia_0$$

$$V_{a1} = Vf - Z_1 Ia_1$$

$$V_{a2} = -Z_2 Ia_2$$

$$\text{得 } V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = Vf - Z_0 Ia_0 - Z_1 Ia_1 - Z_2 Ia_2$$

$$V_a = Vf - (Z_0 + Z_1 + Z_2) Ia_0$$

$$0 = Vf - (Z_0 + Z_1 + Z_2) Ia_0$$

$$Ia = \frac{Vf}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

$$Ia = Ia_0 + Ia_2 + Ia_3$$

$$= 3 Ia_0 = \frac{3Vf}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

綜合前述關係式，得知電力系統發生單相接地故障時，於故障點之系統等效電路如圖 1 所示。

## 三、接地測距電驛之動作原理

接地測距電驛(21N)擬分成(1)機電式(2)固態式說明其動作原理如后。機電式接地測距電驛之動作力矩方程式為：

$$T = K_1 I^2 - K_2 VI \sin \theta - K_3$$

$$\text{式中，動作力矩：} KI^2$$

$$\text{抑制力矩：} K_2 VI \sin \theta + K_3$$

電驛始動時， $T = 0$ 。即

$$K_1 I^2 - K_2 VI \sin \theta - K_3 = 0$$

$$K_2 VI \sin \theta = K_1 I^2 - K_3$$

$$\frac{V}{I} \sin \theta = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}$$

$$\cong \frac{K^1}{K^2}$$

$$Z \sin \theta \cong \frac{K_1}{K_2} = K$$

故得  $X=K$  其動作曲線如圖 2。

今以美國 General Electric 公司生產之 GCXG 為例分析於后：力矩方程式為

$$T = KIa'(Ia'Zt) \sin \phi - K' Ia'(Ea') \sin \theta$$

$\phi$ ： $Ia'$  與  $Ia'Zt$  間之相位差。 $\theta$ ： $Ea'$  與  $Ia'$  之相位差。

電驛始動時： $T=0$ ，即

$$KIa'(Ia'Zt) \sin \phi - K' Ia'(Ea') \sin \theta = 0$$

$$K' Ia'(Ea') \sin \theta = KIa'(Ia'Zt) \sin \phi$$

$$\begin{aligned}
 &= (KZ' \sin \phi) Ia'^2 \\
 &= K'' Ia'^2 \\
 \frac{Ea'}{Ia'} \sin \theta &= \frac{K''}{K'} \\
 Z \sin \theta &= \frac{K''}{K'} \\
 &= \frac{K''}{K'} \\
 &= K \\
 X &= K
 \end{aligned}$$

G CXG 外形如圖 3 所示。

固態式接地測距電驛動作特性分析於后：假設兩信號  $S_1$  及  $S_2$  分別為：

$$\begin{aligned}
 S_1 &= |S_1| \angle \alpha_1 = K_1 V + Zr_1 I \\
 &= a + jb
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_2 &= |S_2| \angle \alpha_2 = K_2 V + Zr_2 I \\
 &= c + jd
 \end{aligned}$$

$$\text{令: } V = |V| \angle 0^\circ$$

$$I = |I| \angle -\theta$$

$$Zr_1 = |Zr_1| \angle \phi_1$$

$$Zr_2 = |Zr_2| \angle \phi_2$$

分別代入  $S_1$  及  $S_2$  後得：

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \{K_1 |V| + |Zr_1| |I| \cos(\phi_1 - \theta)\} \\
 &\quad + j |Zr_1| |I| \sin(\phi_1 - \theta) \\
 &= a + jb
 \end{aligned}$$

$$a = \{K_1 |V| + |Zr_1| |I| \cos(\phi_1 - \theta)\}$$

$$b = |Zr_1| |I| \sin(\phi_1 - \theta)$$

$$\begin{aligned}
 S_2 &= \{K_2 |V| + |Zr_2| |I| \cos(\phi_2 - \theta)\} \\
 &\quad + \{j |Zr_2| |I| \sin(\phi_2 - \theta)\} \\
 &= c + jd
 \end{aligned}$$

$$c = K_2 |V| + |Zr_2| |I| \cos(\phi_2 - \theta)$$

$$d = |Zr_2| |I| \sin(\phi_2 - \theta)$$

假設兩信號  $S_1$  及  $S_2$  輸入固態電驛之相位比較器電路，若比較器電路有輸出信號，亦即固態電驛動作，其條件為

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{S_1}{S_2} \right)$$

$$-\lambda \leq \alpha \leq \lambda 2$$

若  $\lambda 1 = \lambda 2 = \frac{\pi}{2}$  時，可獲得機電式接地測距電驛之動作特性曲線。

$$\text{即 } -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$$

故得  $\cos \alpha \geq 0$ ，

$$\text{另因 } \frac{S_1}{S_2} = \frac{|S_1|}{|S_2|} \angle \alpha$$

$$= \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\sqrt{c^2 + d^2}} (\cos \alpha + j \sin \alpha)$$

$$= \frac{a + jb}{c + jd}$$

$$= \frac{(ac + bd) + j(bc - ad)}{c^2 + d^2}$$

$$= \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\sqrt{c^2 + d^2}} \cos \alpha$$

$$= \frac{ac + bd}{c^2 + d^2}$$

$$\cos \alpha = \frac{ac + bd}{\sqrt{(ac + bd)^2 + (bc + ad)^2}} \geq 0$$

故得  $ac + bd \geq 0$

將 a, b, c, 及 d 代入上式後得

$$K_1 K_2 |V|^2 + |V| |I| \{K_1 |Zr_2| \cos(\phi_2 - \theta) + K_2$$

$$|Zr_1| + \cos(\phi_1 - \theta)\} + |I|^2 |Zr_1| |Zr_2| \cos$$

$$(\phi_1 - \phi_2) \geq 0$$



令固態式電驛看到之阻抗(Z)為

$$Z = \frac{V}{I}$$

$$= |Z| \angle \theta$$

代入上式後得

$$K_1 K_2 |Z|^2 + |Z| \{ K_1 |Z_{r2}| \cos(\phi_2 - \theta) + K_2 |Z_{r1}| \cos(\phi_1 - \theta) \} + |Z_{r1}| |Z_{r2}| \cos(\phi_1 - \phi_2) \geq 0 \text{ (通式)}$$

於通式中，令  $K_1 = K$ ， $K_2 = 0$ ，

$$Z_{r1} = Z_{r2} = Z_r, \phi_1 = \phi_2 = 90^\circ$$

則得電抗電驛之動作特性曲線(圖4)，即

$$|Z| \cos(90^\circ - \theta) \leq \frac{|Z_r|}{K}$$

$$|Z| \sin \theta \leq \frac{|Z_r|}{K}$$

$$X \leq \frac{|Z_r|}{K}$$

另通式中，令  $K_1 = K$ ， $K_2 = -K$ ，從

$$|Z_{r1}| = 0, |Z_{r2}| = |Z_r|, \phi_1 = \phi_2 = \phi$$

即得下式：

$$-K^2 |Z|^2 + |Z| \{ K |Z_r| \cos(\phi - \theta) \} \geq 0$$

$$|Z| \leq \frac{|Z_r|}{K} \cos(\phi - \theta)$$

從而獲得姆歐電驛之動作特性曲線(圖5)。

#### 四、接地測距電驛之運用

台電161KV輸電線之接地測距電驛(21N)保護係分為三區段之保護方式；即第一區段之保範圍為該受保護

中華民國八十四年十一月

輸電線之70~75%，瞬時跳脫。第二區段之保護範圍為該受保護輸電線之100%，另加聯接於該受保護輸電線之對方匯流排(或變電所)所有輸電線中阻抗值最小之輸電線的50%，延時20週波跳脫。第三區段之保護範圍為該受保護輸電線之100%，另加聯接於該受保護輸電線之對方匯流排(或變電所)所有輸電線中阻抗值最大之輸電線的100%，再加連接於阻抗值最大之輸電線的另一端匯流排(或變電所)所有輸電線中阻抗值最小者之25%，延時30週波跳脫；詳如(圖6)所示。

例題1：若電力系統如圖7所示，試計算標示21N處之標置阻抗( $X_1, X_2$ 及 $X_3$ )。

解：

$$X_{1SEC} = 11.570 \times \frac{2000}{161000} \times 0.75$$

$$= 2.479(\Omega)$$

$$X_{2SEC} = (11.570 + 6.155 \times 0.5) \times \frac{2000}{161000} = 4.185(\Omega)$$

$$X_{3SEC} = (11.570 + 8.859 + 10.745 \times 0.25) \times \frac{2000}{161000} = 6.604(\Omega)$$

21N 通常作為高壓或超高壓輸電線接地故障之後衛保護。於運用時，應注意：(1)零相序成分及零相序互偶阻抗或電抗所引起之補償問題。(2)故障電阻( $R_F$ )所引起之問題。(如圖 8)所示，從 F 點至參考匯流排之電壓降成分為

$$V_{a1} = E_a - jX_1 I_1$$

$$V_{a2} = -jX_2 I_2$$

$$V_{a0} = -jX_0 I_{01} - jX_{om} I_{02}$$

$$V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = E_a - jX_1 I_1 - jX_2 I_2 - jX_0 I_{01} - jX_{om} I_{02}$$

$$V_a = E_a - jX_1(I_1 + I_2) - jX_0 I_{01} - jX_{om} I_{02}$$

$$0 = E_a - jX_1(I_a - I_{01}) - jX_0 I_{01} - jX_{om} I_{02}$$

$$E_a = jX_1(I_a - I_{01}) + jX_0 I_{01} + jX_{om} I_{02}$$

$$E_a = jX_1 I_a + j(X_0 - X_1)I_{01} + jX_{om} I_{02}$$

$$\frac{E_a}{jX_1} = I_a + \left(\frac{X_0 - X_1}{X_1}\right)I_{01} + \left(\frac{X_{om}}{X_1}\right)I_{02}$$

$$\text{令 } \frac{E_a}{jX_1} = I_a', \quad m = \frac{X_0 - X_1}{X_1}, \quad m' = \frac{X_{om}}{X_1}$$

$$\text{故得 } I_a' = I_a + m I_{01} + m' I_{02}$$

由上式得知，由於零相序成分及零相序互耦電抗等因素影響，21N 若欲準確測得故障點的位置，則必須適當補償。

$$\text{即 } jX_1 = \frac{E_a}{I_a' - m I_{01} - m' I_{02}}, \text{ 式中 } m \text{ 及}$$

$m$  為補償因子。次由

$$E_a = jX_1 I_a$$

$$+ j(X_0 - X_1)I_{01} + jX_{om} I_{02}$$

$$\frac{E_a}{I_a} = \left\{ X_1 + (X_0 - X_1) \frac{I_{01}}{I_a} + X_{om} \frac{I_{02}}{I_a} \right\}$$

$$\frac{E_a}{I_a} = X_{app}, \text{ 21N 測得之視在電抗 } (X_{app})$$

$$\text{為 } X_{app} = X_1 + (X_0 - X_1) \frac{I_{01}}{I_a} + X_{om} \frac{I_{02}}{I_a}。$$

21N 之標置電抗( $X_{set}$ )與其視在電抗( $X_{app}$ )間之關係如圖 9 所示。

例題 2：某一電力系統單線圖如圖 10 所示，系統有關常數均標示於圖上。假設 F 點發生單相接地故障。試比較：(1) $I_a$  及  $I_a'$ 。(2) $X_1$  及  $X_{app}$ ，即知欲使 21N 準確動作，適當補償是必要的。

解：

$$jX_1 = j3.449(\Omega)$$

$$jX_1' = j5.749 + j2.3 = j8.049(\Omega)$$

$$-j\beta_1 = \frac{1}{jX_1} + \frac{1}{jX_1'}$$

$$\beta_1 = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_1'}$$

$$= \frac{1}{3.449} + \frac{1}{8.049} = 0.414$$

$$(jX_1 \parallel jX_1') = \frac{1}{-j0.414}$$

$$= j2.414$$

$$jX_{1r} = jX_{1s} + (jX_1 \parallel jX_1')$$

$$= j3.436 + j2.414$$

$$jX_{1r} = j5.850$$

$$-j\beta_0 = \frac{1}{jX_0} + \frac{1}{jX_0'}$$

$$\begin{aligned}\beta_0 &= \frac{1}{X_0} + \frac{1}{X_0'} \\ &= \frac{1}{12.555} + \frac{1}{29.295} \\ &= 0.1138 \\ (jX_0 \parallel jX_0') &= \frac{1}{-j0.1138} \\ &= j8.7885(\Omega)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}jX_T &= jX_{0s} + (jX_0 \parallel jX_0') \\ &= j8.537 + j8.7885 \\ &= j17.3255(\Omega)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_0 = I_1 = I_2 &= \frac{Vf}{jX_{1T} + jX_{2T} + jX_{0T}} \\ &= \frac{Vf}{j2X_{1T} + jX_{0T}} = \frac{\frac{161000}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ}{j11.70 + j17.3255} \\ &= \frac{\frac{161000}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ}{j29.0255} = 3202.6 \angle -90^\circ \\ &= -j3202.6(A)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_{11} &= \frac{j8.049}{j3.449 + j8.049} \times (-j3202.6) \\ &= -j2241.9(A)\end{aligned}$$

$$I_{21} = -j2241.9(A)$$

$$\begin{aligned}I_{01} &= \frac{j29.295}{j12.555 + j29.295} \times (-j3202.6) \\ &= -j2241.9(A)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_{02} &= I_0 - I_{01} = -j3202.6 - (-j2241.9) \\ &= -j960.7(A)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_a &= I_{01} + I_{11} + I_{21} \\ &= -j6725.7(A)\end{aligned}$$

如圖11所示

$$(2) I_a = -j6725.5(A)$$

$$\begin{aligned}I_a' &= I_a + \left(\frac{X_0 - X_1}{X_0}\right)I_{01} + \left(\frac{X_{0m}}{X_1}\right)I_{02} \\ &= -j6725.5 + \left(\frac{12.555 - 3.449}{3.449}\right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&(-j2241.9) + \left(\frac{8.128}{3.449}\right)(-j960.7) \\ &= -j14908.7(A)\end{aligned}$$

$$(2) \cdot X_1 = 3.449$$

$$\begin{aligned}X_{app} &= 3.449 + (12.555 - 3.449) \\ &\quad \times \frac{2241.9}{6725.7} + (8.128) \frac{960.7}{6725.7} \\ &= 7.645\end{aligned}$$

由以上計算得知，共架輸電線應用21N作接地保護時，若不採取適當的補償，則由於零相序成分及零相序互耦電抗，將影響21N動作準確性。

故障電阻(R<sub>F</sub>)分爲(1)弧光電阻。(2)大地電阻。大地電阻僅於接地故障時才存在。弧光電阻之近似值可由經驗式(表1)求得。

表一、計算弧光電阻之經驗式

	Warrington 計算式	Soviet Unit 計算式
$R = \frac{440L}{I}$ 或 $R = \frac{76(KV)^2}{(KVA)_{sc}}$	$R = \frac{2.9 \times 10^4 L}{I^{1.4}}$ 或 $R = \frac{50(V_1 + V_t)}{I}$	$R = 1050 \frac{L}{I}$
L : 弧長 (呎) I : 流經弧 阻之故障電 流(安培) KV : 系統 公稱電壓 (線間) (KVA) <sub>sc</sub> : 三相短路故 障容量。	L : 空氣中 之弧長(公 尺)。 I : 故障電 流(安培)。 V <sub>1</sub> : 系統 公稱電壓 (KV) V : 風速 (Km/hour)。 t : 時間(秒)	L : 導體間 距(相間故 障)，導體 至鐵塔間之 距離(接地 故障)



故障電阻( $R_F$ )為影響 21N 正確動作之另一重要因素,  $R_F$  受地質及環境因素(如濕度、溫度、氣候)影響, 變化很大。

由圖12得知

$$E_a = jX_1 I_a + (jX_0 - jX_1) I_0 + jX_{om} I_0' + (I_a + I_a') R_F$$

$$\frac{E_a}{I_a} = jX_1 + j(X_0 + X_1) \frac{I_0'}{I_a} + jX_{om}$$

$$\frac{I_0'}{I_a} + R_F \left(1 + \frac{I_a'}{I_a}\right)$$

令  $Z_{app}$  為不考慮故障電阻時, 21N

測得故障點之視在阻抗

$$Z_{app} = jX_1 + j(X_0 - X_1) \frac{I_0'}{I_a} + jX_{om}$$

$$\frac{I_0'}{I_a} \cdot Z'_{app} \text{ 為考慮故障電阻時 21N 測}$$

得之視在阻。故得

$$Z'_{app} = Z_{app} + \left(1 + \frac{I_a'}{I_a}\right) R_F, \text{ 故障電阻}$$

$$\text{存在所產生之影響為 } \left(1 + \frac{I_a'}{I_a}\right) R_F$$

例題3：某一電力系統單線圖(如圖13所示。系統之有關常數均標示於圖上。假設F點發生單相接地故障, 故障電阻  $R_F = 0.5 \Omega$ 。試求  $Z'_{app}$ 。

解：承(例題2)

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{\frac{161000}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ}{j11.70 + j17.3255 + 1.5} = \frac{\frac{161000}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ}{1.5 + j29.0255}$$

$$= 3198.3 \angle -87.04^\circ (A)$$

$$I_{01} = \frac{j29.295}{j12.555 + j29.295} \times 3198.3 \angle -81.04^\circ$$

$$= 2238.8 \angle -87.04^\circ (A)$$

$$I_{01} = \frac{j29.295}{j12.555 + j29.295} \times 3198.3 \angle -81.04^\circ$$

$$= 2238.8 \angle -87.04^\circ (A)$$

$$I_{02} = I_0 - I_{01} = (3198.3 - 2238.8) \angle -87.04^\circ = 959.5 \angle -87.04^\circ (A)$$

$$I_{11} = I_{21} = \frac{j8.049}{j3.449 + j8.049} \times 3198.3 \angle -87.04^\circ$$

$$= 2238.9 \angle -87.04^\circ (A)$$

$$I_{12} = I_{22} = (I_1 - I_{11}) = (3198.3 - 2238.9) \angle -87.04^\circ = 959.5 \angle -87.04^\circ (A)$$

$$I_a = I_{01} + I_{11} + I_{21} = 3I_{01} = 6716.4 \angle -87.04^\circ (A)$$

$$Z'_{app} = jX_1 + j(X_0 - X_1) \frac{I_{01}}{I_a} + jX_{om} \frac{I_{02}}{I_a} + \left(1 + \frac{I_a'}{I_a}\right) R_F = j3.449 + j(12.555 - 3.449)$$

$$\frac{2238.8}{6716.4} + (j8.128) \frac{959.5}{2878.5} + \left(1 + \frac{2878.5}{6716.4}\right) (0.5)$$

$$= 0.714 + j9.194 (\Omega)$$

$$= 9.222 \angle 85.56^\circ (\Omega)$$

## 五、結語

根據過去電力系統事故資料分析, 單相接地故障占電力系統故障之大宗(約80%), 對系統供電及設備

中華民國八十四年十一月

安全之影響甚大，故其保護須作深入研討及謀求最妥適對策，以期系統或設備獲得最佳之保護。

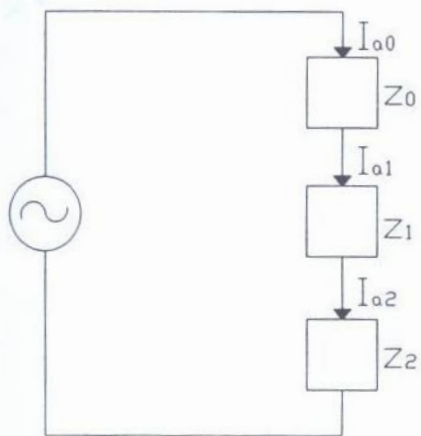
接地測距電驛 (21N) 為高壓或 (及) 超高壓輸電線路保護設備中最常使用之後衛保護電驛。是故，對其動作原理及運用應充分瞭解。

本文首對單相接地故障作一簡要解說。其次，闡釋21N之動作原理及運用，輔以實例演算，以期讀者易於瞭解。

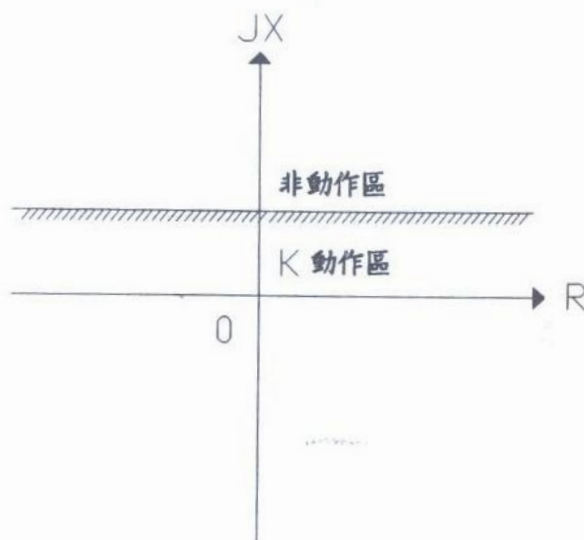
### 參考資料

1. G.E. Instruction Book。
2. 輸配電 (中央圖書出版社：邢福文、李森源、彭雲將譯)。
3. Protective Relaying theory and applications (ABB: Walter A. Elmore)。
4. Protective Relaying : Principles and applications (開發圖書公司： J.Lewis Blackburn)。
5. Power System Protection and Switchgear (Wiley & Sons : B.Ravindranath & M.chander)
6. Power System Relaying (RSP : Stanley H. Horwity & Arun G. phad ke)。

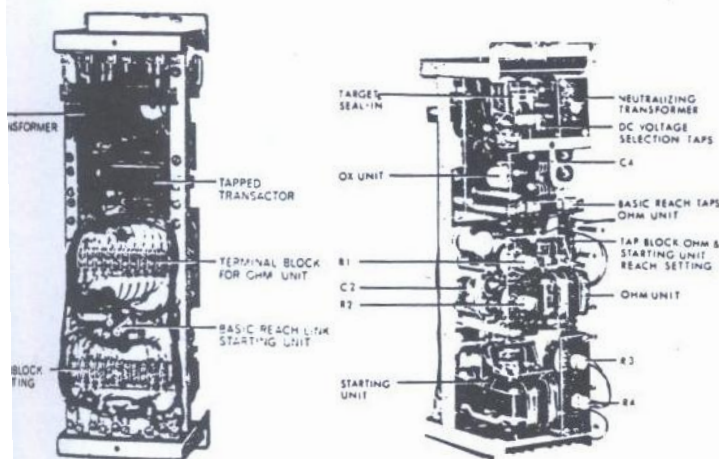




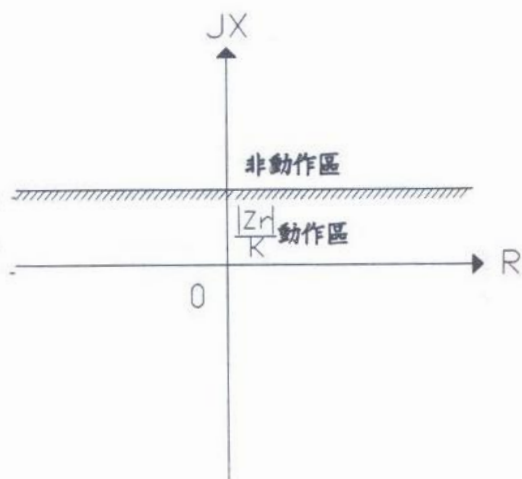
圖一



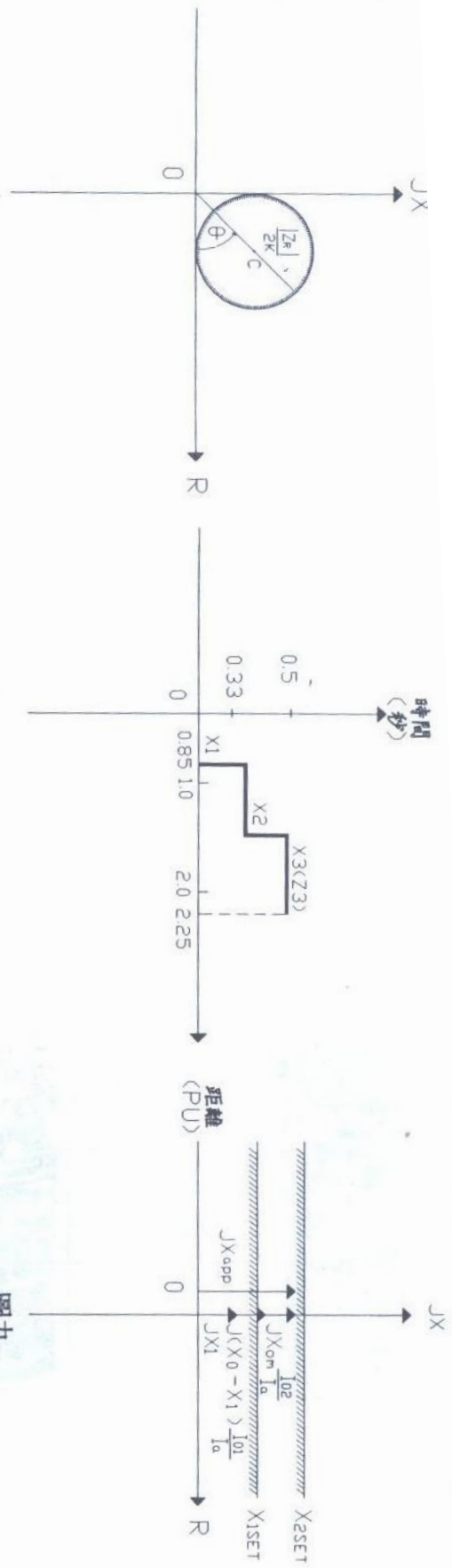
圖二、21N 動作特性曲線



圖三



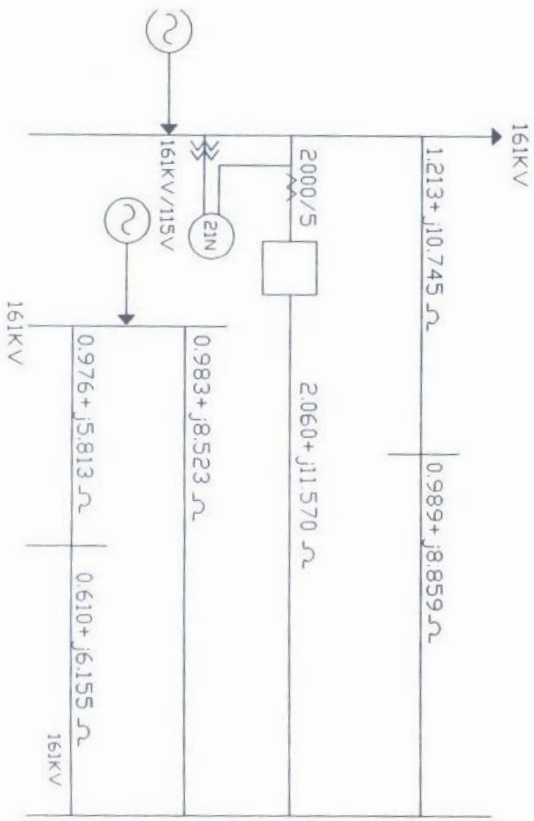
圖四



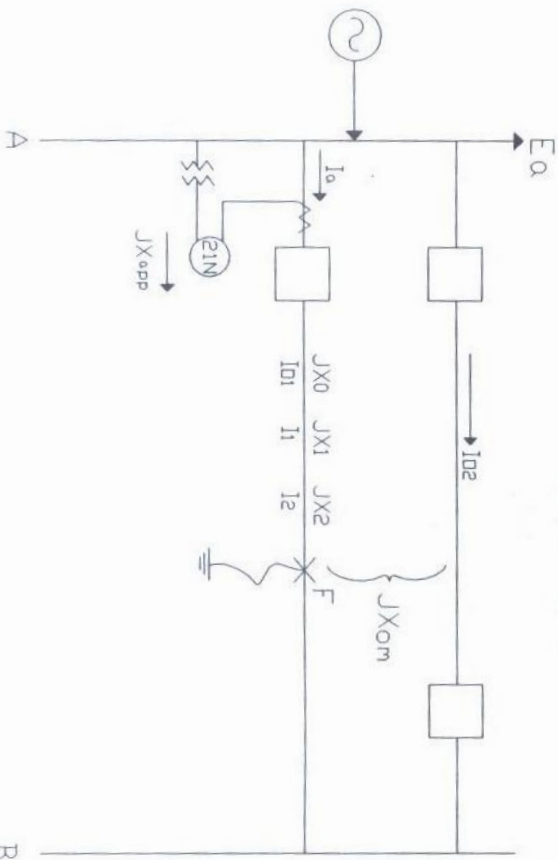
圖五

圖六

圖九



圖七



圖八

