

非接地系統中性點電位移 及其保護方式

呂世彬

台電高屏供電區營運處

壹、前言

電力系統接地方式包括直接接地、電阻接地、電抗接地與非接地等方式，完全看系統電壓之大小及故障電流多寡，以及設備規格、保護電驛方式、對通訊干擾的程度等加以選擇，這之中並無統一的規定。對於保護電驛而言，當然是直接接地最好，因其接地故障電流最大，電驛可以很靈活的設定，對於輕微的接地事故電驛仍可很迅速的動作。

對於非接地系統而言，一旦發生單相接地事故，理論上接地故障電流為零，雖然實際上會因為設備對地有耦合電容存在，而產生極微小的故障電流，但電驛恐乃無法有效偵測出故障。因此在非接地系統中是無法以接地過電流電驛來做為接地故障保護的。所幸在非接地系統中尚有一

種方式可以做為接地事故時極為靈敏的保護，那就是使用接地變壓器（GPT：Ground Potential Transformer）以取得零序電壓，本文將對此一方式加以探討。

非接地系統有一現象是與接地系統完全不同的，在中性點直接接地的系統中，中性點（亦稱為零電位點）的電位是不會移動的，然而對於中性點未接地的系統而言，系統發生接地事故時，其中性點是會移動的；或者雖然未發生接地事故，但因負載不平衡亦會使中性點移動。何以會有此現象？本文將做進一步探討。

貳、非接地系統中性點電位

在非接地系統之中性點電位隨著接地事故發生及負載不平衡時而移動，其結果會是什麼現象？讓我們透過例題來作說

明。以圖 1 三相四線式迴路來探討，各相之電動勢各以 E_a 、 E_b 、 E_c 表示，電源之中性點（共同點）自 O 起至負載的中性點 O' 為止，各相之導納以 Y_a 、 Y_b 、 Y_c 表示，而中性線導納以 Y_o 表示之。

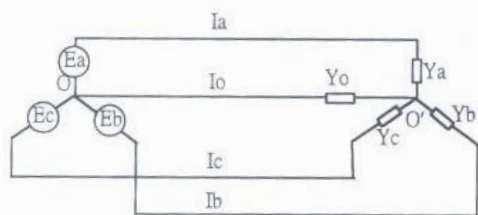


圖 1. 非接地系統三相四線式迴路

因此，如果電源供給的是三相平衡電壓，而負載也是三相平衡時，則 O 與 O' 之電位均為零。換句話說，只要全系統內電源及負載均是三相平衡時，中性點的電位將是零。但是只要電動勢 $E_a + E_b + E_c \neq 0$ 或是負載不平衡時，負載的中性點間的 O' 對電源中性點 O 點就會有電位差，也就是 O 點若為零電位，則 O' 點就不會是零電位，反之亦然。此時若負載的中性點 O' 電位為 E_o ，則 E_o 可由下式求出，由圖 1 依克希荷夫定律：

$$E_a - E_o = I_a / Y_a, I_a = (E_a - E_o) \times Y_a \quad ①$$

$$E_b - E_o = I_b / Y_b, I_b = (E_b - E_o) \times Y_b \quad ②$$

$$E_c - E_o = I_c / Y_c, I_c = (E_c - E_o) \times Y_c \quad ③$$

$$-E_o = I_o / Y_o, I_o = -E_o \times Y_o \quad ④$$

①+②+③+④，並利用 $I_a + I_b + I_c + I_o = 0$ 之關係以求出 E_o ，

$$\begin{aligned} I_a + I_b + I_c + I_o &= (E_a - E_o) \times Y_a + \\ &+ (E_b - E_o) \times Y_b + (E_c - E_o) \times Y_c - E_o \times Y_o \\ &= E_a Y_a + E_b Y_b + E_c Y_c - (Y_a + Y_b + Y_c + Y_o) \times E_o = 0 \end{aligned}$$

故

$$E_o = (E_a Y_a + E_b Y_b + E_c Y_c) / (Y_a + Y_b + Y_c + Y_o) \quad ⑤$$

如以一通式表示則為：

$$E_o = (\sum EY) / (Y_o + \sum Y) \quad ⑥$$

如再三相三線式系統時，⑥式之 $Y_o = 0$ ，茲以⑥式為基礎，用下列情形說明。

一、接地事故發生時

圖 2 所示為一中性點非接地式的三相配電線路，當其中一線（A 相）發生接地事故，接地電阻 R 由 0 到無限大之間變化，中性點電位變化的向量軌跡是如何表示？各線對地之間的電位又是如何？假定各線之間的電壓是平衡的，其相序為 $A \rightarrow B \rightarrow C$ ，各線對地靜電容量以 C 表示之，其他線路常數則忽略之。

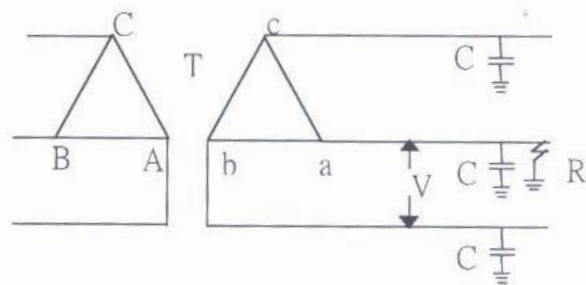


圖 2. 中性點非接地方式之三相配電線路

1. 以上述之公式①~⑥求出 E_o

$$\text{此時 } Y_a = \frac{1}{R} + j\omega C, Y_b = Y_c = j\omega C$$

因 $Y_o = 0$ （中性點未接地）

$$\text{故 } I_a = (E_a - E_o) \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right)$$

$$I_b = (E_b - E_o)(j\omega C)$$

$$I_c = (E_c - E_o)(j\omega C)$$

$$I_o = 0$$

$$I_a + I_b + I_c + I_o = (E_a - E_o) \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right)$$

$$+ (E_b - E_o)(j\omega C) + (E_c - E_o)(j\omega C)$$

$$= E_a \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right) + (j\omega C)(E_b + E_c)$$

$$- \left(\frac{1}{R} + j3\omega C \right) E_o$$

在三相平衡的對稱系統中 $E_a = E_a$, $E_b = \alpha^2 E_a$, $E_c = \alpha E_a$,

α 爲一單位向量, 大小等於 1, 但旋轉 120° , 即 $\alpha = 1 \angle 120^\circ$

$$\alpha^2 + \alpha + 1 = 0$$

$$I_a + I_b + I_c = E_a \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right) +$$

$$(j\omega C)(\alpha^2 + \alpha) - \left(\frac{1}{R} + j3\omega C \right) E_o$$

$$= (E_a / R) - \left(\frac{1}{R} + j3\omega C \right) E_o = 0$$

$$\text{故 } E_o = (E_a / R) / \left(\frac{1}{R} + j3\omega C \right)$$

$$= E_a / (1 + j3\omega RC) \text{ 或}$$

2. 直接代入⑥一般式子求 E_o

$$E_o = [E_a \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right) + E_b(j\omega C) + E_c(j\omega C)]$$

$$/ [0 + \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right) + (j\omega C) + (j\omega C)]$$

$$= (E_a / R) / \left(\frac{1}{R} + j3\omega C \right)$$

$$= E_a / (1 + j3\omega RC)$$

此爲以①~⑥式算出以電源中性點電位爲 0 時, 求出負載側中性點電位之方法。在這種情形下, 若將相當於負載的 R 與 C 之中性點視爲大地的零電位, 就會有僅相當於 E_o 的電位, 使電源側的中性點電位變高。若要說明所謂的「中性點電位之移動」的說法, 莫非就是在此時電源之中性點電位向變高之量移動的意思, 所以此時中性點電位可將 E_o 以 $-E_o$ 取而代之以求得, 亦即 $E_{oo} = -E_o$ 的意思, 即 $E_{oo} = -E_o = -E_a / (1 + j3\omega RC)$ 。此情況可由圖 2 已展開形狀畫出如圖 3 之形態, 此時 E_{oo} 是依照 R 自 0 至 ∞ 止之變化來看的, 而 E_o 是如何追隨 R 之變化描繪出向量軌跡的呢? 以下檢視驗證看看。

設 $Z = -(1 + j3\omega RC)$, R 自 0 至 ∞ 變化時, 即在圖 4 中第 3 象限的直線上描繪, 其次設 $Y = 1 / Z$, Y 之軌跡爲第 2 象限的半圓上描繪。

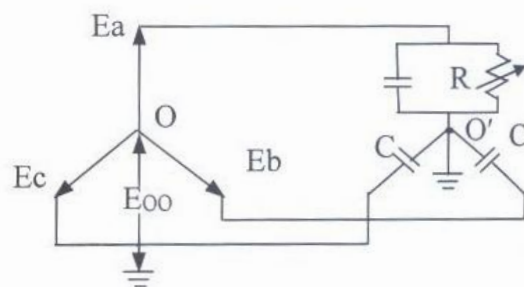


圖 3. 圖 2 之展開形式

$$\text{設 } Y = 1 / Z = -1 / (1 + j3\omega RC)$$

$$= -1 / [1 + (j3\omega RC)^2] + j3\omega RC /$$

$$[1+(j3\omega RC)^2]$$

$$\text{若 } g' = -1/[1+(j3\omega RC)^2]$$

$$b' = 3\omega RC/[1+(3\omega RC)^2]$$

則 $g'^2 + b'^2 = -g'$ ，將移至等式左方，

兩邊各加 $(1/2)^2$ 得

$$g'^2 + 2 \times g' \times (1/2) + (1/2)^2 + b'^2 = (1/2)^2$$

$$(g' + 1/2)^2 + b'^2 = (1/2)^2 \dots\dots (A)$$

(A)式為一圓心 $(-1/2, 0)$ 半徑為 $1/2$ 之圓的方程式，所以若 R 從 $0 \rightarrow \infty$ ，其 Y 向量軌跡為：第 2 象限之半圓上描繪。

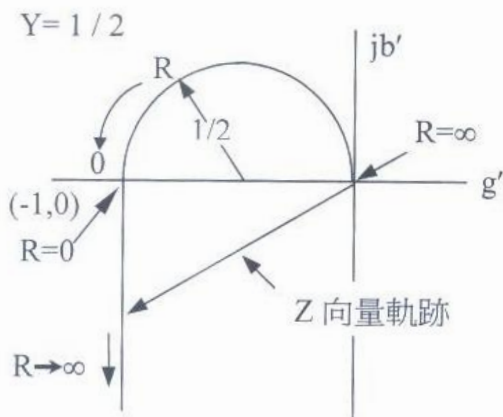


圖 4. Z 及 Y 向量軌跡

E_{oo} 的軌跡是將 Y 以 E_a 的倍數畫成，在此求出圓的方程式，將 E_{oo} 以下式表示：

$$E_{oo} = -E_o = \frac{-1}{1+j3\omega RC} E_a$$

$$= \frac{-1}{1+(3\omega RC)^2} E_a + j \frac{3\omega RC}{1+(3\omega RC)^2} E_a$$

$$= g + jb$$

$$\text{設 } E_a = E, \quad g = \frac{-1}{1+(3\omega RC)^2} E, \quad$$

$$b = \frac{3\omega RC}{1+(3\omega RC)^2} E$$

$$g^2 + b^2 = \left[\frac{E}{1+(3\omega RC)^2} \right]^2 \times E$$

$$= -g \times E,$$

$$g^2 + g \times E + b^2 = 0$$

$$g^2 + 2 \times g \times (E/2) + (E/2)^2 + b^2 = (E/2)^2$$

$$(g + E/2)^2 + b^2 = (E/2)^2$$

亦即為一圓心 $(0, -E/2)$ ，半徑 $(E/2)$ 之圓的方程式， E_o 之向量軌跡如圖 5 所示。

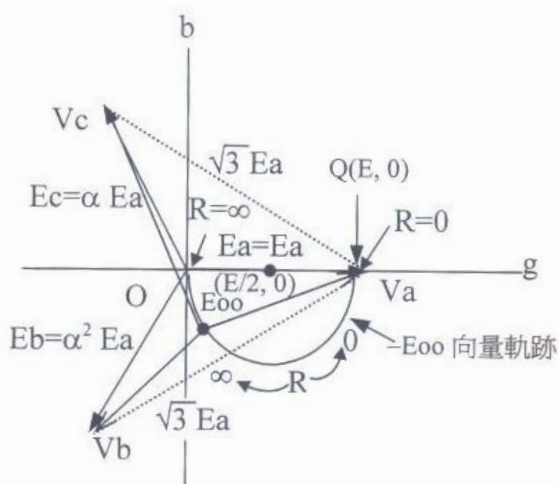


圖 5. E_o 的向量軌跡

其次，有關各線對第電位的大小 V_a, V_b 及 V_c 是以 $-E_{oo}$ 與各相電位的大小向量值相加的合成值（如圖 5），亦即

$$V_a = -E_{oo} + E_a$$

$$V_b = -E_{oo} + E_b = -E_{oo} + \alpha^2 E_a$$

$$V_c = -E_{oo} + E_c = -E_{oo} + \alpha E_a$$

這些電位的絕對值可以如上所述一一求出，在圖 5 中當電阻 R 為 ∞ 時（原點 O ），

電源及負載的中性點電位均為零，電阻 R 為 0 時（Q 點）為完全接地，B 及 C 相的電位為 $\sqrt{3} E_a$ 。

二、負載發生不平現象時

圖 6 所示為中性點非接地方式有純電阻存在的三相迴路，A 相電阻 R_x 由 0 至無限大之間變化，此時中性點電位如何變化？設各線間施以相序 A→B→C 的平衡電壓。以上述式子為基礎，求得負載側之中性點電位 E_o ，如圖 3 同樣的想法：

$$\frac{(E_a - E_o)}{R_x} + \frac{(E_b - E_o)}{R} + \frac{(E_c - E_o)}{R} = 0$$

$$= \frac{E_a}{R_x} + \frac{(E_b + E_c)}{R} - \left(\frac{1}{R_x} + \frac{2}{R}\right) \times E_o = 0$$

此時 $E_a = E$ ， $E_b = \alpha^2 E_a$ ， $E_c = \alpha E_a$ ，

$$E_a + E_c = (\alpha^2 + \alpha)E = -E$$

$$\text{則 } E_o = \frac{(R - R_x)E}{R + 2R_x}$$

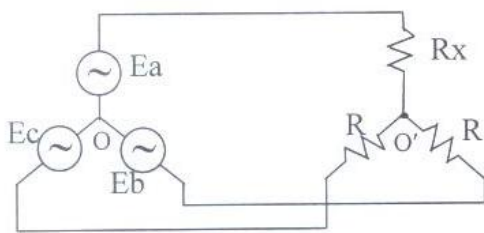


圖 6. 中性點非接地有純電阻之三相迴路

於此式中將 R_x 自零至無限大之間變化時的 E_o 調整之，現在 E_o 改以下式表示之：

$$E_o = E \left(1 - \frac{3R_x}{R + 2R_x}\right)$$

$$= E \left[1 - \frac{1}{(R/3R_x) + 2/3}\right]$$

若 $R_x \rightarrow 0$ 時，

$$\frac{1}{(R/3R_x) + 2/3} \rightarrow 0 \text{ 則 } E_o = E$$

若 $R_x \rightarrow R$ 時，

$$\frac{1}{(R/3R_x) + 2/3} \rightarrow 1 \text{ 則 } E_o = 0$$

若 $R_x \rightarrow \infty$ 時，

$$\frac{1}{(R/3R_x) + 2/3} \rightarrow 2/3 \text{ 則 } E_o = -E/2$$

相位差因屬純電阻之故，與 $E_a (=E)$ 同相。因此這種狀態以向量圖表示如圖 7，由此圖可以明白看出，隨著負載電阻 R_x 的變化 ($0 \rightarrow \infty$)，中性點電位 E_o 係以 $[E \rightarrow O \rightarrow -E/2]$ 方式的情形變化是可以理解的，因此結果可以說明負載不平衡時中性點（零電位點）也會移動。

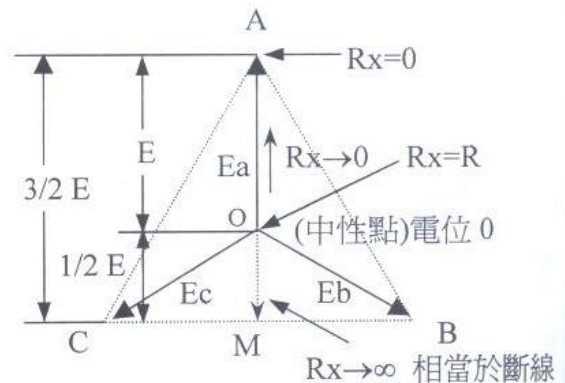


圖 7. E_o 電位 ($R_x: 0 \rightarrow \infty$)

參、零相電壓取得方式

零相電壓對於保護電驛之應用極為重

要，尤其在非接地系統的接地事故保護，電壓電驛較過電流電驛更為可靠。因此如何取得保護電驛所需的零序電壓源，是一項頗值得重視的問題。

零相電壓的取得常用的方法有下列幾種：

1. 利用單相比壓器方式

如圖 8 所示，利用比壓器直接取出中性點對地電位的簡單方法，此方法僅適用於具有中性點之系統，但中性點電阻接地時，則此方式很難取得足夠大小的零相電壓。

2. 利用單一比流器方式

如圖 9 所示，在中性點接地處的接地線上串入額定負擔相當的比流器，將取得的零序電流通於電阻 r ，利用電流經過電阻的壓降方式取得零序電壓。此方式適用於中性點低電阻接地系統，具有使用低絕緣比流器的優點。

3. 利用三相比壓器的方式

如圖 10 所示，三台比壓器一次側為星形結線中性點接地，二次側為開口三角形（Broken Delta）接線，則兩開口之間呈現各相對地電位之和。在平時中性點電位與大地電位一致，各相電壓呈平衡狀態，二次側開口端無電壓存在。一旦發生接地事故時，中性點對地電位即昇高為 V_0 ，各相電壓變為：

$$\text{A 相 } V_a = E_a + V_0$$

$$\text{B 相 } V_b = E_b + V_0$$

$$\text{C 相 } V_c = E_c + V_0$$

而比壓器二次側各相亦可得到相當的電壓，於是開口端之間即為其合成電壓，其值為（假定電壓比為 1）：

$$\begin{aligned} V_a + V_b + V_c &= (E_a + V_0) + (E_b + V_0) + (E_c + V_0) \\ &= E_a + E_b + E_c + 3V_0 \\ &= 3V_0 \quad (E_a + E_b + E_c = 0) \end{aligned}$$

得到中性點對地電位或零序電壓的三倍電壓，中性點對地電壓為：

$$V_0 = (V_a + V_b + V_c) / 3$$

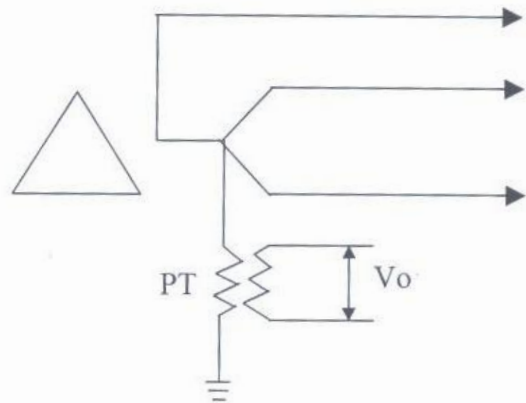


圖 8. 單一比壓器取 V_0 方式

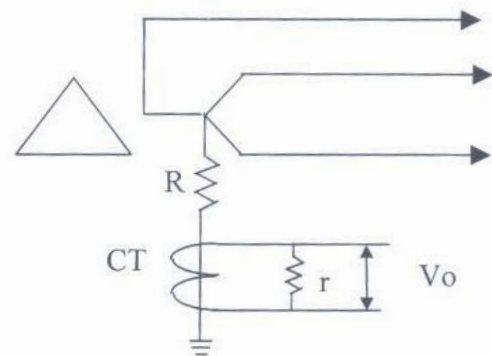
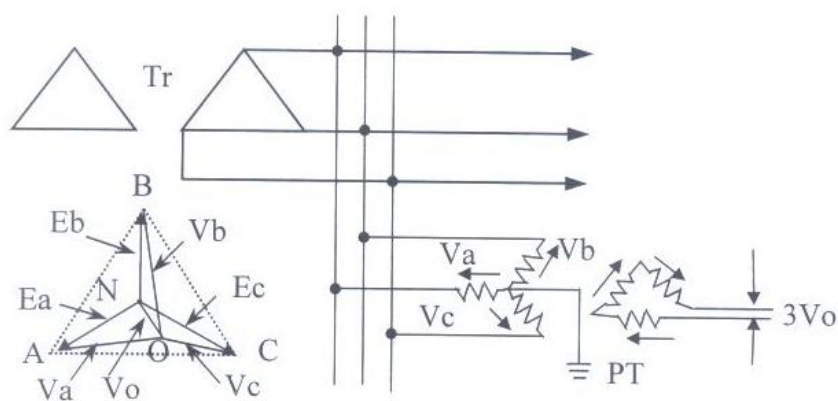


圖 9. 單一比流器取 V_0 方式

圖 10. 利用三相比壓器取 V_o

肆、接地用變壓器及其保護方式

一般中性點非接地系統的接地事故保護，大都以接地變壓器（GPT Grounded Y – Broken Delta）二次側的零序電壓，做為過電壓電驛的動作訊號，同時在 GPT 的二次側開口間接一電阻器，如圖 11 所示，該電阻有下列多種功用：

1. 抑制中性點異常電位浮動的不安定現象。
2. 適當控制故障電流以配合保護電驛需求。
3. 接地事故發生後，可避免變壓器鐵心過熱毀損。
4. 對高頻突波過電壓提供阻尼效用。
5. 控制暫態突波電壓峰值，使其限制在定值以下。

GPT 二次側開口端所並接的電阻器大小之決定，係考慮電阻損失（KW）與電容充電容量（KVA）之比值至少必須等於或大於 1，才能有效抑制暫態過電壓。當 GPT 所在系統發生接地事故時，GPT 二次側所發生之零序電壓，依電壓大小而使電驛適時選擇動作，以達到快速保護之目的。

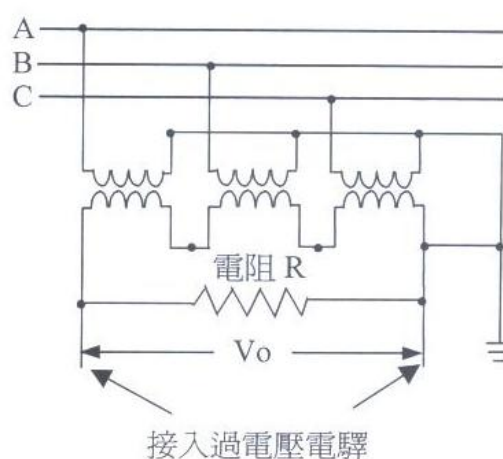


圖 11. 接地用變壓器（GPT）

伍、結語

對於中性點非接地系統中，在負載不平衡或發生接地事故時，中性點的電位會發生位移現象，而且任何一線完全接地事故，所引起故障相電壓無論是否為零，其他兩相對地的電壓將由於中性點電位位移的緣故，而提升為與線間電壓相等。三線之間電壓沒有變動，負載電流是由線間電壓決定，一線接地是沒有產生影響。但是各回線流向大地電流，在故障相為零值，其他兩相電壓電流增大為 $\sqrt{3}$ 倍，兩相流向大地之電流有 60° 之相角差，合成值是故障發生前的一相充電及洩漏電流之3倍，依線路→大地→故障點→線路之順序流動。

對於非接地系統發生單相接地事故時，並不會有顯著的故障電流產生，因此對於設備不會有立即的危險，但就怕此一事故點未被發覺之前，另一接地事故在度產生，則此兩接地事故點變成短路現象，會產生很大的故障電流而將設備燒損。另外在非接地系統中，如果一相發生直接接地事故，則其他兩相對地的電壓會提高為 $\sqrt{3}$ 倍，如果絕緣強度不足，會造成再度的事故。因此，在中性點非接地系統中，接地事故的保護仍極為重要。一般皆以 GPT (Grounded Y-Broken Delta) 二次側的零序電壓，做為過電壓電驛的動作訊號，以達快速保護之目的。

參考資料：

1. 日本中部電氣協會編，發變電所工學現場手引 2，第 9 版，昭和 31 年 5 月 15 日。
2. 日本 OHM 雜誌，1993 年 4 月。

徵稿啓事

歡迎來稿

截稿日期：

八十八年十月二十日

- ※歡迎有關線路保護電驛相關之論著、譯述或經驗談等文稿。
- ※來稿文責自負，如係譯稿請附原文及著作權所有人之書面同意文件。
- ※來稿請簡潔明瞭，並請以橫式稿紙正楷書寫（如能附完稿後之電腦磁片更佳 WORD 7.0），
- ※本刊對來稿有刪改權，無論刊登與否，恕不退稿。
- ※文章發表後，即致稿酬，版權歸本會刊所有。

請踴躍投稿