

# 串聯補償線路之測距保護一問題和解決方案

GE Power Management *Bogdan Kasztenny*

## 1. 簡介

裝設串聯電容器 (Series Capacitors (SCs)) 在長輸電線路上，其背後的技術原因為增加可傳輸功率、改善系統穩定度、減少傳輸損失、加強電壓控制和更加彈性的功率潮流控制，而有關環境議題的設計考量和直接成本效益的考慮亦是支持裝設串聯電容器在長輸電線路上。

然而當串聯電容器 (SCs) 和它們的過電壓保護元件 (典型的如金屬氧化變阻器 (Metal Oxide Varistors, MOVs) 和/或氣隙 (air gaps)) 裝上輸電線路上時，對於它們的保護電驛 (protective relays) 和故障定位器 (fault locators) 會產生許多問題，而對於保護電驛的操作狀況變得不利，如此的現象包括如電壓或電流逆向、次諧波共振 (subharmonic oscillations)、和由金屬氧化變阻器 (MOVs) 所觸發的氣隙造成的額外暫態。而由於串聯補償而導致的測距元件過區間設定可能是串聯補償電容最關鍵而且著名的結果。相反之事可能會發生：在保護線路上，一個測距功能 (distance function) 可能在檢測一個在保護線路上的低電流故障時失敗。

本文主要是著眼在幾個特別對串聯補償線路的現象，而對於這些特殊現象的深刻了解可幫助了解測距電驛放在串聯補償線路上操作時的限制。

第 2 段說明串聯補償電容 (SCs) 和金屬氧化變阻器 (MOVs) 的等效相阻抗和對

稱阻院，而零序補償因素 (compensating factor) 的問題也會被一並說明。

第 3 段分析一個在簡單串聯補償系統中低電流單線對地 (SLG) 的故障，用這個簡單的系統說明而且圖示電壓和電流反向的現象，呈現出在典型的測距比較器上幾個不同訊號反向組合的結果，這些訊號包含相、正序、負序、及零序電壓和電流，這被分析的比較器是記憶極化姆歐 (memory-polarized mho)、零序極化電抗 (zero-sequence polarized reactance)、記憶極化負序和正序方向性的 (memory polarized negative- and zero-sequence directional)。

第 4 段說明關於串聯補償的暫態現象

第 5 段說明一個確保在串聯補償線路和其鄰近線路上保護之方向性整合的解決方案：一個對負序和零序方向性元件的偏移阻抗 (offset impedance)，而且提供對偏移阻抗的設定計算規則。

第 6 段說明測距保護之電流控制適應性區間設定的概念，這是一個對於過區間設定問題的解決方案。

第 7 段討論對於在串聯補償線路上單相跳脫的相選擇問題。

第 8 段著眼在串聯補償線路上的故障定位。

## 2. 串聯電容器 (Series Capacitors) 和金屬氧化變阻器 (MOVs)-等效阻抗

非常大多數以微處理機為基礎的測距

電驛，以更多(安全性)或更慢(速度)地對於精確地濾出基本波成份作出反應，因此，了解在串聯電容器和它的過電壓保護元件在一個典型安排上的基頻電壓和電流的關係就變得重要了。

對於被用於串聯補償的三個單相電容器排組，每一個電容必須加以保護來對抗由氣隙或金屬氧化變阻器或兩者同時所產生的過電壓，在對於有負載的情形或低電流故障的情形下，在串聯電容器上橫跨的電壓降是低於電壓保護的大小：氣隙和金屬氧化變阻器皆未導通任何電流。因此，串聯電容器排組等於一個相當於實際電容器電抗的純電抗。而在非常高電流故障情形下，在串聯電容器上橫跨的電壓降會遠超過電壓保護的大小：氣隙和金屬氧化變阻器導通大多數的電流，實際上是越過 (by-passing) 串聯電容器。因此，當大電流

流過串聯電容器時，串聯電容器排阻等效於一個小電阻。

當有一個可比較數量的電流流經串聯電容器和金屬氧化變阻器時，會有兩個極端值的情形，圖 1 說明如此一個例子，隨著流通電流變得更大，因為受限於電壓保護的大小，在電容器排組上的電壓降(圖 1a)當然是更趨近於方形。電容器在初始半週時間內導通電流(圖 1b)，而金屬氧化變阻器在剩下的半週時間內導通電流(圖 1c)，相較於兩個各別的導通電流，兩導通電流和是沒有失真情形的，只是相對於在電容器排組上的電壓降往向超前的方向位移，而在電容器排組上的基頻電壓降和流過的電流的關係是一個電阻-電容性阻抗的狀態，也就是著名的 Goldsworthy 等效 [1]。

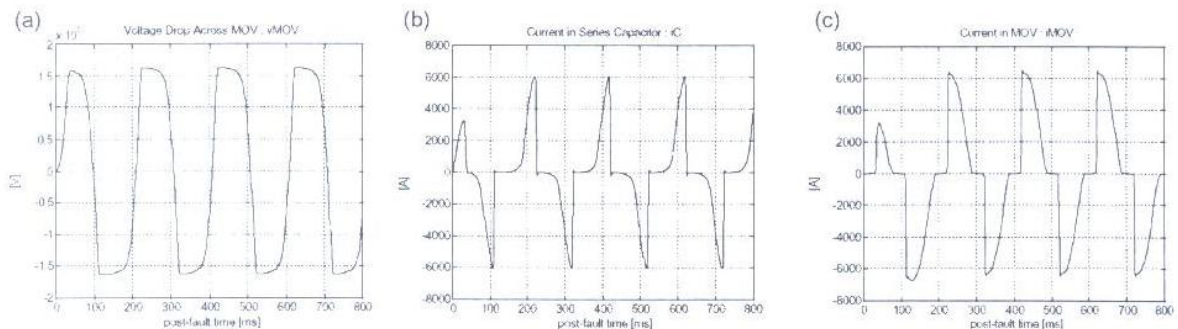


圖 1 · 在導通金屬氧化變阻器的情形下，串聯電容器上橫跨之電壓降(a)；電容器上流經之電流(b)；金屬氧化變阻器上流經之電流(c)

## 2.1 等效相阻抗

考慮圖示在圖 2a 的情況，一個理想電容器(SC)和一個非線性電阻(MOV)是並聯排列，那麼對於近似的 MOV 特性，其可以準確到足以作保護電驛分析，這是可以被下面的方程式所提供：

$$i = P \cdot \left( \frac{v}{V_{REF}} \right)^q \quad (1)$$

這裏 P 和  $V_{REF}$  是膝點(knee-point)的座標，而 q 是特徵曲線的指數(圖 2c 圖示一個簡單金屬氧化變阻器的特徵)

對於圖 2a 所示並聯連接的任何操作狀況，我們可能會分析地計算、用暫態程



式模擬、或測量橫跨在電容器排阻上的電壓和流過電流的基頻成份，而如此電壓和電流相量的比值就是等效阻抗(圖 2b)，等效電阻和等效電抗顯然是決定於流過的電流(圖 2d)。對於會產生低於電壓保護等級大小(在例子中是 2.4kA)的電壓降之電

流，電阻是等於零，而且電抗是等於串聯電容器的真實電抗(在例子中是 65 歐姆)。而對於更高的電流(在例子中是 3-4kA)，當電抗減少時，電阻同時跟著增加，而對於非常高的電流，電抗和電阻都是趨近於零。

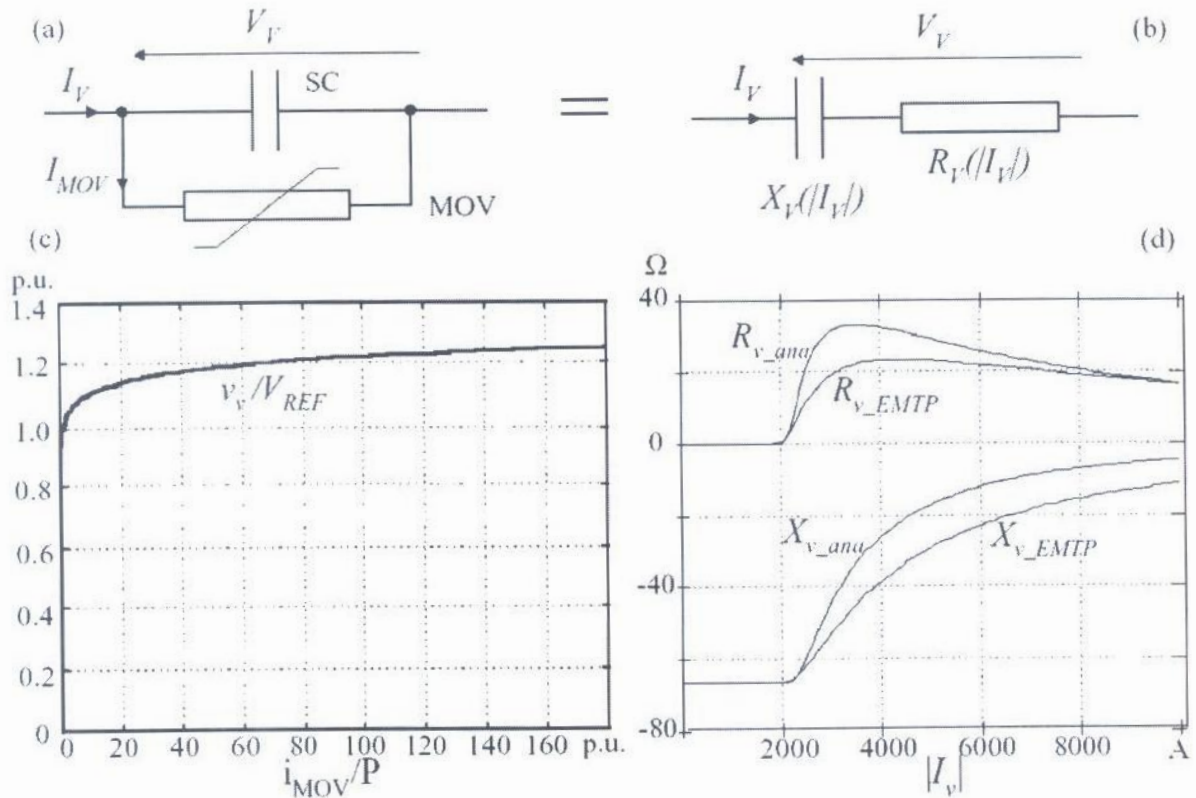


圖 2 · 附有金屬氧化變阻器的串聯電容器(a)；等效基頻阻抗(b)；樣本的金屬氧化變阻器特性圖(c)；樣本的等效阻抗之電流決定參數(d)

圖 2d 說明用兩種方法得到的等效電阻和等效電抗。

第一，用 EMTP 完成模擬這一簡單系統，並且紀錄下有自然失真情形的電壓和電流波形，再來，利用傅利葉轉換計算出相量並且推導出阻抗，針對各種不同大小的流過電流重覆這個過程而產生出系統的特性。

第二，當有流過電流時，假定是一個弦波電壓降，那麼接著阻抗就會被分析計

算出來。

從圖 2d 可看出在不同假設下所計算出的 Goldsworthy 模型之間的差異性，一般說來，EMTP 型式的等效比較適合作為保護電驛的研究，特別是如果相量是用考慮保護電驛的真實濾波技巧而推導出來的情形下。

等效阻抗的概念提供了解測距過區間設定現象的基礎，如果串聯電容器位置落於故障和電驛可能的位置之間，故障迴路

包含線對故障阻抗、故障電阻(如果有的話)和等效的串聯電容器和金屬氧化變阻器阻抗，而後面的是電阻性和電容性，會使視在阻抗位移往下而且位移至右邊，如圖 3 所示。

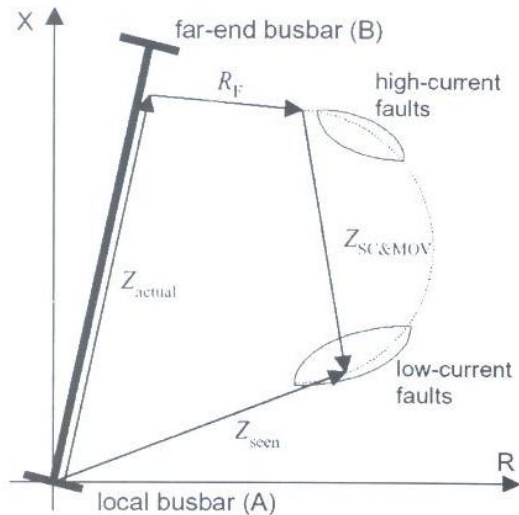


圖 3. 由於串聯補償的測距元件過區間設定

過區間設定是描述在圖 3 中情形的主要結果，在最差的狀況下-也就是對於低電流故障下-等效串聯電容器阻抗和等效金屬氧化變阻器阻抗是一個純電抗，可藉實際電容器的全部電抗來向下位移視在阻抗，當線路典型被補償在 50-70%的比例時，過區間設定可能也是高達 50-70%，而對於高電流故障時，雖然等效串聯電容器阻抗和等效金屬氧化變阻器阻抗只是輕微向右邊位移視在阻抗，但沒有過區間設定的危險，這個觀察會導致電流可控適應性區間設定的概念，這會在第 6 章描述。

在線路上有中等電流故障時，視在阻抗可能會被向右位移超過電容器電抗的一半，這個改變的位置可能會足夠高而使視在阻抗被推超出操作的特性，特別是在如果如透鏡範圍(保守地設定遮蔽阻線組

(blinders))或負載侵佔特性(load encroachment characteristics)被使用時。

從這一個簡化模型我們可得知其他的觀察，可得知測距功能是無法對低電流靠近保護電驛裝置點的故障(low-current close-in fault)作出反應，在如此一個故障情形下，將視在阻抗移至阻抗平面的第四象限是會造成方向性區別的問題。

串聯電容器和金屬氧化變阻器排組動作像”故障電流穩定器”：對於較大電流而言，當電阻越大時電容性電抗越小--比起完全補償電路，這減少了電流；對於較小電流而言，電容性電抗越大--比起未補償電路，這減少了網路阻抗而且增加了電流。結果，故障電流對故障定位特性在串聯補償線路上是比對非補償線路還要令人滿意。

Goldsworthy 模型在了解一些現象時是非常有用的，但它在實際的應用(除了用一整套數值方法做的故障研究之外)-是非常困難的。

首先，等效電阻和等效電抗是流經電流的非線性函數，這個非線性特性使得所有分析性的計算實際上變得不可能。

第二，流過的電流決定於很多因素如系統狀況、故障位置、故障型態和故障電阻。

第三，傳統電力系統分析和保護電驛原理兩者都是基於序網路和對稱成份而不是相成份和實際三相網路，例如，對於在重載線路上增加的安全性而言，電抗特性典型上是從零序和正序電流去使其極化，串聯補償在如此極化信號角度上的影響是和相電壓或相電流上的影響一樣重要的。

對於實際的結果，串聯電容器排阻的序網路在分析時必須考慮兩個不對稱：由故障所產生的並聯不對稱，和在三相補償



排阻的特別相上串聯補償電容器和金屬氧化變阻器的各種不同操作情況所產生的串聯不對稱，兩者必須要一起考慮，下一個小段落更詳細地說明這個問題。

## 2.2 等效序阻抗

一般而言，橫跨在線性三相元件上的電壓降正比於流過的電流，這個比例值稱之為阻抗，而對於三相系統而言，這可被寫成一精簡的矩陣型式，如下所示：

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

或以對稱成份而論：

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在正常的狀況下，等效  $Z_{012}$  的阻抗矩陣變化對角化，這意思是在對稱成份或序網路間沒有相互耦合的情況：

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

序網路解耦合的結果是傳統短路計算的基礎，然而，這不是對串聯電容器和金屬氧化變阻器的情形；如果串聯不對稱發生時，也就是說，如果在不同相間 Goldsworthy 的阻抗是不同時，序阻抗有可能耦合在一起，而相阻抗卻是沒有耦合。

下面方程式應用在三相串聯電容器和金屬氧化變阻器排組上：

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & 0 & 0 \\ 0 & Z_B & 0 \\ 0 & 0 & Z_C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

這裏  $Z_A$  是對 A 相的 Goldsworthy 等

效(決定於 A 相電流的大小)， $Z_B$  是對 B 相的等效，而  $Z_C$  是對 C 相的等效。

考慮在相及對稱電流和電壓的關係，對三相串聯電容器和金屬氧化變阻器排組利用方程式(5)計算出下面  $Z_{012}$  阻抗矩陣：

$$Z_{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_A + Z_B + Z_C & Z_A + a^2 Z_B + a Z_C & Z_A + a Z_B + a^2 Z_C \\ Z_A + a Z_B + a^2 Z_C & Z_A + Z_B + Z_C & Z_A + a^2 Z_B + a Z_C \\ Z_A + a^2 Z_B + a Z_C & Z_A + a Z_B + a^2 Z_C & Z_A + Z_B + Z_C \end{bmatrix} \quad (6)$$

這裏  $a$  是計算對稱成份的 120 度位移運算子。

通常三相 A、B、C 阻抗是不一樣的，這個導致矩陣(6)無法成功地對角化，電氣上而言，在表示串聯電容器排阻的序網路之間有交互耦合的情形；例如正序電壓決定於零序和負序電流。

對於各種不同故障的型式，讓我們只考慮非常高或非常低電流的極端情況。

### 低電流故障和負載狀況(沒有 MOVs 導通)

$$Z_A = Z_B = Z_C = -jX_{SC} \quad (7a)$$

利用(6)我們可計算：

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} -jX_{SC} & 0 & 0 \\ 0 & -jX_{SC} & 0 \\ 0 & 0 & -jX_{SC} \end{bmatrix} \quad (7b)$$

對於這個情況，方程式(7b)意指在序網路間沒有交互耦合的情形，串聯電容器排組的零序、正序、和負序阻抗等於電容的實際物理上的電抗。

### 高電流單線對地故障(A 相 MOV 導通所有電流)

$$Z_A = 0, \quad Z_B = Z_C = -jX_{SC} \quad (8a)$$

利用(6)計算出：

$$Z_{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -2jX_{SC} & jX_{SC} & jX_{SC} \\ jX_{SC} & -2jX_{SC} & jX_{SC} \\ jX_{SC} & jX_{SC} & -2jX_{SC} \end{bmatrix} \quad (8b)$$

對於這種情形，方程式(8b)意指在序網路間有交互耦合的情形，自感阻抗(00、11、22)都是電容性的而且等於電容器之實際物理上電抗的三分之二，後面事實說明例如正序電流對零序電壓產生一個領先的電壓降。

### 高電流線對線(LL)和雙線對地(LLG)故障(A相和B相 MOVs 導通所有電流)

$$Z_A = Z_B = 0, \quad Z_C = -jX_{SC} \quad (9a)$$

利用(6)可計算出：

$$Z_{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -jX_{SC} & -jX_{SC} & -jX_{SC} \\ -jX_{SC} & -jX_{SC} & -jX_{SC} \\ -jX_{SC} & -jX_{SC} & -jX_{SC} \end{bmatrix} \quad (9b)$$

在這種情形下，方程式(9b)說明了由於串聯不對稱而在序網路間有交互耦合的情形。方程式(6)到(9)揭露出一個很複雜的狀況：數學上阻抗矩陣沒有對角化，或電氣上在序網路上有交互耦合的狀況，然而，當考慮下面的情形時，狀況也就沒有那麼的複雜：

首先，對於高電流單線對地故障而言，故障相上的串聯電容器被越過(bypassed)而那一相的電壓降比起線上的電壓降而言是較小的，僅管串聯電容器的影響下，在兩條正常線路上的電壓降是一樣的小，因為比起故障相上的電流，這兩條線路上的電流算是非常小，而對於在遠端匯流排上的故障，就考慮欠區間設定而言，在三相經補償排組上的電壓降比起線上的電壓降而言是可以忽略的(圖 4a)。

這意指對於高電流單線對地故障的一次近似分析，串聯電容器和金屬氧化變阻器的序阻抗( $Z_0$ 、 $Z_1$ 和 $Z_2$ )可被假設為零。

同樣的結果可經由利用方程式(8b)和假設  $I_1=I_2=I_0$ (對單線對路故障時，在對稱電流間的關係)來獲得。

第二，線對線(LL)和雙線對地(LLG)故障是非常不像高電阻故障的，假設串聯電容器在故障相將有效地被繞過(bypassed)是有原因的，正常相將導通低電流，結果因為在故障相有較低的 Goldsworthy 等效阻抗，所以有故障相的電壓降比起線上的電壓降是較小的，因為在正常相上的電流是比較低的，所以僅管串聯電容器裝設在適當的地方，在正常相上的電壓降還是一樣的低。

相似於先前的狀況(圖 4b)，對於高電流的單線對地(LL)、雙線對地(LLG)、和三相短路(3P)故障的一次近似分析而言，串聯電容器和金屬氧化變阻器的序阻抗( $Z_0$ 、 $Z_1$ 和 $Z_2$ )可被假設為零。

同樣的結果可經由利用方程式(9b)和假設  $I_1=-I_2$  得到。

第三，在非常弱的系統和/或在高故障電阻下，低電流故障是可能會發生的，當串聯電容器比電感性系統電抗小時，初次改變不會加諸太多危險於保護電驛上，有效補償準位將會非常少，而有關於串聯補償的主要問題將不會發生，第二個改變叫作高故障電阻，然而，實際上高故障電阻只會在單線對地故障時遇到。

結論：對於高電流故障，不管任何故障型式，是有足夠理由忽略三相的串聯電容器和金屬氧化變阻器排組，而對於低電流情況下而言，有效的串聯電抗比起實際物理上電容的電抗是比較小的，只有在高電阻單線對地故障時才須考慮全部的物理上的電抗(造成最大過區間設定的原因)，然而在後面的狀況下，當對稱網路被解耦合時而且  $Z_0=Z_1=Z_2=-jX_{SC}$  時，分析就變



得較簡單多了。

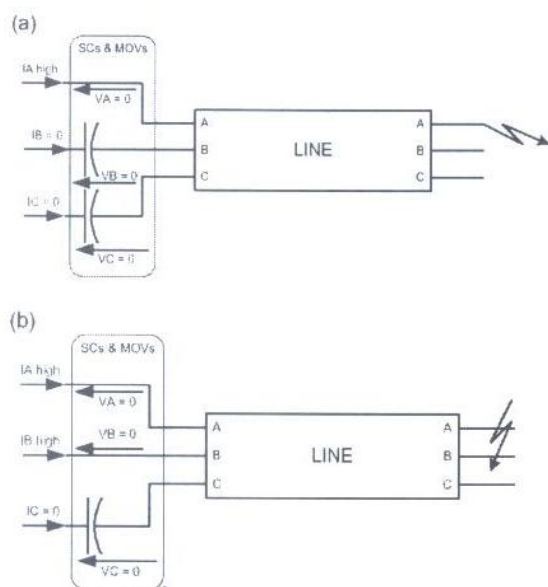


圖 4 · 在高電流故障時串聯電容器上的電壓降：單線對地故障(a)和線對線/雙線對地故障(b)

### 2.3 零序補償因素

零序補償因素是一個由不同供應商可能有不同定義的設定，但依據接地測距電驛的每一原理，適當的補償(說明在正序和零序電抗間的差異性)是須要下面的操作：

對於 A 相 21G 功能的電流：

$$I_{AG} = I_A + \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \left( \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \right) \quad (10)$$

$(Z_0 - Z_1)/Z_1$  值是複數，而且決定於電驛的潛在點(potential point)至故障點間之零序和正序阻抗的比例，正常下的情況，保護電路是同質的或只有輕微的不容質： $Z_0/Z_1$  的比例在沿著線路是固定常數，或者依據故障地點而有輕微的改變，典型上，測距電驛對於第一個接地區段和其餘區段提供個別的 K0 設定。

在有串聯補償線路的情形下，如果串聯電容介於故障和電驛潛在點之間，

$Z_0/Z_1$  比例可能會被故障點和故障電流大小的不同而被遽烈影響。

通常對中等電流故障而言，當 Goldsworthy 的等效阻抗不是零也不是純電抗時，序電壓和序電流間就會有互相耦合的狀況發生，而且會破壞傳統接地測距保護的原則，換句話說，古典方程式(10)並未提供 A 相接地保護的精確迴路電流，理論上至少視在正序電抗可被電驛計算出來，但方程式變成非線性而且不實際，一些對串聯補償線路的故障定位演算法(如演算法[2])考慮電流相依 Goldsworthy 的參數，然而對於測距電驛而言，這些方法都是不實際的。

大多數的保護工程師很有可能使用未補償線路的  $Z_0/Z_1$  資料，或使用針對在預期區間設定點上故障的短路程式計算的”K0”因素，後面的作法可能包含，也可能不包含串聯電容器，如果有包含，電容器被視為是對低電流故障，也就是  $Z_A = Z_B = Z_C = Z_0 = Z_1 = Z_2 = -jX_{SC}$ 。

考慮低電流單線對地故障，精確的  $Z_0/Z_1$  比例該應是反應出從潛在點到故障的阻抗，例如，如果短路電容器位於變電所，電壓感測器是在串聯電容器的匯流排那一邊上，而且故障位置距離有串聯電容器的變電所為  $\alpha$ ，下面的式子就可應用上：

$$\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} = \frac{\alpha \cdot Z_{0LINE} - jX_{SC}}{\alpha \cdot Z_{1LINE} - jX_{SC}} - 1 \quad (11)$$

令人感到驚奇的是零序補償設定的精確值決定於故障位置，沒有一個有效的電驛提供如此一個特徵，由於其他有限制地接地測距保護的區間設定精確度因素，如方程式(11)的作法就沒有考慮的那麼實際。

圖 5 畫出了在方程式(11)的情形中



$(Z_0-Z_1)/Z_1$  值的圖，對於剛超過串聯電容器的故障而言，故障迴路單獨由串聯電容器組成，因為對於在低電流故障下的串聯電容器而言  $Z_0=Z_1$ ，所以  $(Z_0-Z_1)/Z_1 = 0$ ，故不須要補償，對於進入線路更遠的故障，一些補償是需要的，但它的符號是相反於未補償線路的，在這個例子中故障大約 70%， $Z_1$  值是非常小的(電容性和電感性電抗相互抵消，而且  $Z_1$  等於電路電阻)，因此結果  $(Z_0-Z_1)/Z_1$  值是非常大，而當故障移遠離電驛點時， $(Z_0-Z_1)/Z_1$  值是逐漸地在線值上收斂。

在這個例子裏內，對於未補償的線路採用  $(Z_0-Z_1)/Z_1$  值，電驛將被往錯誤的方向作補償(精確的數值  $(Z_0-Z_1)/Z_1$  是負的-角度接近 180 度)，而在故障上至約 30% 線路長度時，電驛會被補償過度，而在故障靠近 70% 線路長度時，電驛會被補償不足。

對於未補償的線路而言，評估過補償和欠補償的結果是相當直接簡單的：過補償增加迴路電流，如此，減少視在阻抗進而造成過區間設定；而欠補償造成相反的影響。

對於串聯補償線路而言，由於訊號改變而使序電流間的關係可能會十分不同，結果就不是那麼的簡單。

結果，未補償線路的零序補償因素可能是個實際適當選擇，無論如何，當電驛允許使用者輸入固定數字時，就會限制這個設定應用。

如果在預期的區間設定和電驛設定點之間沒有串聯補償電容器，那麼就不會影響到零序補償因素，然而外部故障所需要的補償因素和保護線路所需要的補償因素是相當不一樣的，因此，對於串聯補償應用而言，採取減少接地測距元件(相對於

相元件而言)的區間設定是比較有效的。

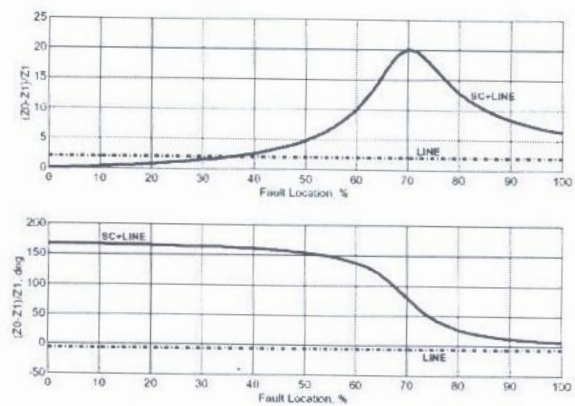


圖 5 · 在低電流單線對地故障時，由電驛看過串聯補電容器(匯流排潛在源)的零序補償因素為故障位置的函數

### 3. 低電流單線對地故障

就如前段所提，低電流單線對地故障是會導致串聯補償線路測距保護真正問題的情況。

如果是由弱系統所導致的低電流故障，電容性電抗有很大限度可被電源電感性電抗消除，而由串聯補償所引發的問題也不會出現，而在相對地強系統中高電阻故障也是應如此被考量的事件。

這一段分析在一個樣本系統上電驛點的詳細的訊號，而且在同一系統上也研究傳統測距比較器的反應，雖然用一單獨系統，這一段用實際的方式來說明在串聯補償線路上幾個測距應用的特性。

#### 3.1 在一樣本系統中的保護訊號

考慮如圖 6 所示的系統，為了要分析在保護線路上和其未端的故障，系統可以被等效為如圖 7 所示。



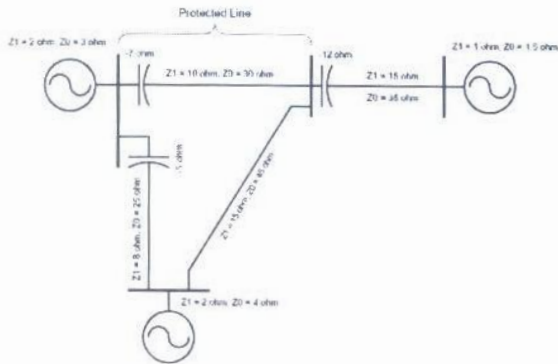


圖 6. 有串聯補償線路(第二歐姆)的樣本系統

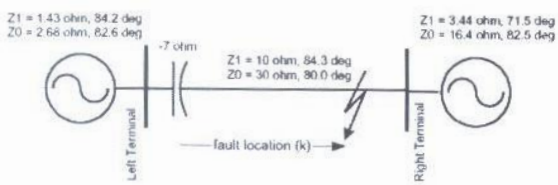


圖 7. 對於內部故障而言樣本系統的等效

假設在線上從左端算起距離  $k$  [pu] 處有一單線對地故障，當這是一低電流故障時，金屬氧化變阻器並未導通，串聯電容器的序網路被解耦合，而短路計算的等效圖也如圖 8 所示，所有我們感興趣的訊號都可以容易地從這一網路計算出來，在下面的例子中，假設一 10-歐姆(第二的)故障電阻。

圖 9 顯示大小值和相角(所有相角都是以左端故障前電壓為參考點)，對於在約線路 35%更近的故障而言，故障電流是電容性的，這是因為從故障點看進去零序、正序、和負序的總和是電容性的，而對在約 35%線路的故障而言，電容性和電感性電抗相互抵消，而故障電流是純電阻性的，只會受限於圖 8 中故障迴路的總電阻，因此，對於這個故障而言，故障電流是最大的。

在有感的故障情形下，對於比 35%

還近的故障中電流會發生”反向”的現象，然而，”反向”這個詞還不是十分精確：在串聯網路中發生了什麼事，應該說是相對於一個給定相量”中性點”的位置而言，有一個”不中性”的相量位移，實際上 180 度”反向”是從未發生。

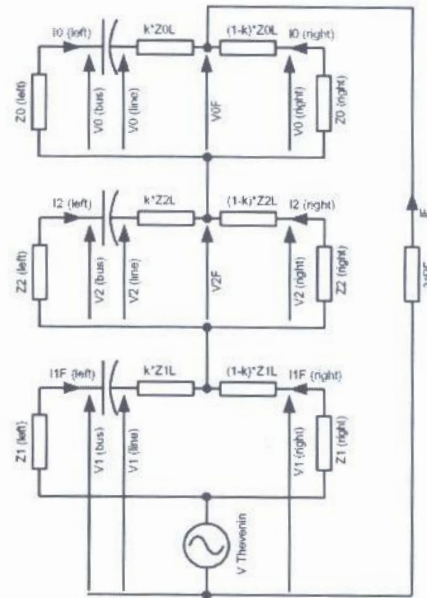


圖 8. 在低電流單線對地故障中序網路和對稱成份

圖 10 顯示出在故障相左右兩末端的電流，典型上，隨著故障越移離末端，故障電流的大小也會跟著減少，在圖 10 這個例子中，當故障離線路的右末端約 55%時，右端電流達到它的最小值，而對於更長距離的故障時右端的故障電流才開始增加，當故障靠近左端點時，實際上有點不尋常的是兩電流是反向的，兩電流都是非中性的位移，左端電流是電容性的，而右端電流實際上是電阻性的而且是和 A 相電壓是反相的。

這個情況可能會對相比較保護(phase comparison protection)產生潛在性問題，而當電流在大小上有明顯的不同時，即使反相，電流差動電驛(current differential

relay)依然可以動作正確，這個可能的結果是一個很大的差電流和跳脫。

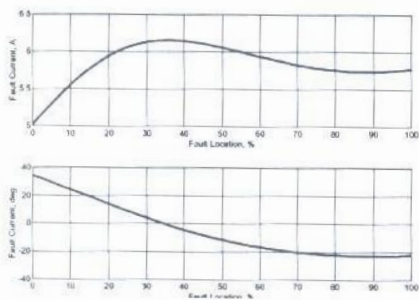


圖 9 · 故障電流：大小(上圖)和相角(下圖)

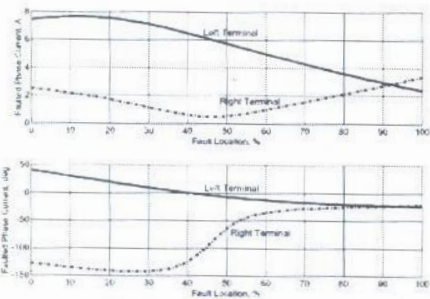


圖 10 · 故障相電流：大小(上圖)和相角(下圖)

圖 11 顯示在故障的右末端和左末端(匯流排側和線路側兩邊的比壓器)的相電壓，對於超過約 25%線路的故障而言，線路側的電壓是明顯的高過標稱電壓(nominal value)，這是因為電感性的電流流過電容性阻抗，而導致一個和故障前電壓反相的電壓降，這個從匯流排電壓減下的負電壓降會增加串聯電容器線路側上的電壓，使之超過故障前的值，而依序而言，對於 close in 故障而言，匯流排側電壓會上升超過它的標稱值，這是一個電容性的相電流經電感性系統阻抗，而導致一個和系統電磁力(electromotive force (e.m.f.))反相的電壓降，減掉負值形成在匯流排側過電壓情形的結果。

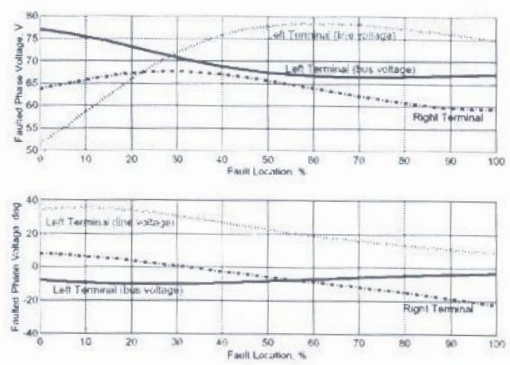


圖 11 · 故障相電壓：大小(上圖)和相角(下圖)

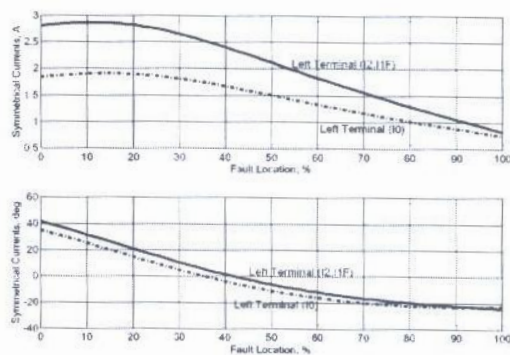


圖 12 · 在左端上的對稱電流：大小(上圖)和相角(下圖)

圖 12 顯示在左端電流的對稱成份，對於在 35-40%範圍內的故障而言，負序和零序電流都是電容性的，由於系統的零序和負序阻抗的差異性，對於兩電流的開關轉換點(switchover points)是不一同的，這在線路 30-40%間產生的一個點是當左端的負序電流是電容性時，零序電流是電感性。

圖 13 顯示用對未補償線路的零序補償設定所獲得的左端故障迴路電流(方程式(10))，對於故障比線路約 40%還近時，電流是電容性的，這將會對動態姆歐特性造成方向性的問題，這個特性擴張了正向故障(電感性電流)和縮小了反向故障(電容性電流)。



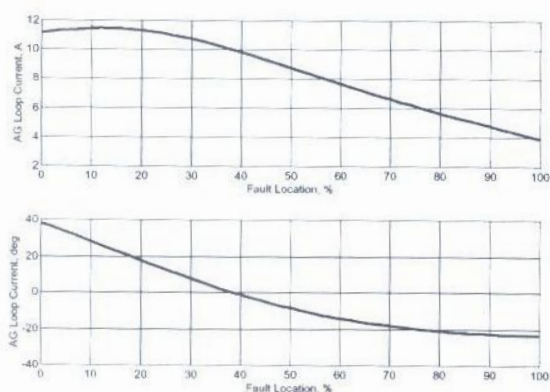


圖 13 · 在左端故障迴路電流：大小(上圖)和相角(下圖)

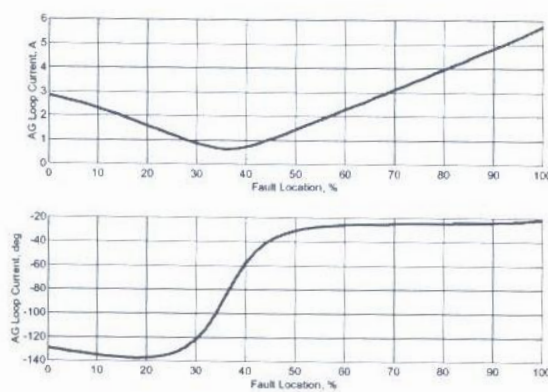


圖 15 · 在左端故障迴路電流：大小(上圖)和相角(下圖)

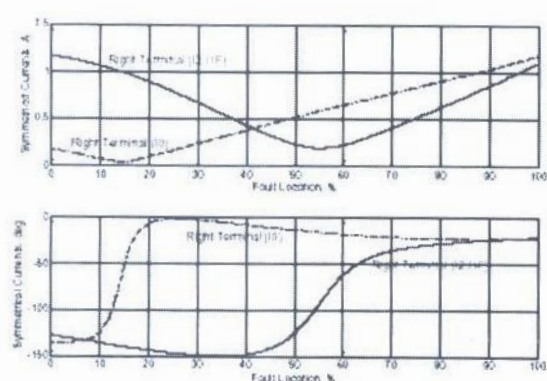


圖 14 · 在左端對稱成份電流：大小(上圖)和相角(下圖)

圖 14 顯示右端上的對稱電流，大小值圖表示最小值發生在從線路右端測過來 45% 和 85% 處，在這個區間內，負序和零序電流實際上的反相的，而當故障靠近端點時，電流是同相的，正當情況下對於單線對地(AG)故障而言，正序、零序、和負序電流的故障成份都是同相的，因此，對於使用零序和負序電流兩者關係(對於在未補償線路上所有已知的故障型態而言，這兩電流是不會反相)的演算法而言，針對在這一樣本系統 45% 至 85% 間的故障特，可能會在右端產生潛在相位選擇問題。

圖 15 顯示對於右端電驛的故障電流(至於未補償線路有零序補償設定)，電流明顯地從故障的中性位置位移靠近到線路的左端。

圖 16 和 17 顯示在左端的對稱電壓，對於一單線對地故障正常而言，兩電壓是反相於故障前正序電壓，由於串聯補償的原因，兩電壓明顯地從中性點位置位移，而在 close-in 故障時，線側電壓是靠近它們的中性位置，但對於遠端故障而言，線側電壓是約偏離 110 度(圖 16)，而對匯流排側電壓而言，對於遠端故障時是較靠近它的中性點(約遠離 40 度)，但對於 close-in 故障時是明顯地位移(約遠離 120 度-圖 17)。

圖 18 顯示在右端的對稱電壓，它的角位置是近乎正確的：零序和負序電壓都是在約 40 度內而限制在 -180 度的位置，兩電壓的大小表示出一個有趣的圖樣：相對於從右端算來 45% 和 85% 的故障，分別被右端電驛量測出的電壓是非常小的(實際上是零)，這對負序和零序方向性元件會產生一些問題，除非在如果極化電壓是非常小時，元件被向運作的方向偏移(這是已知而且較好的解決方案；第 5 段有更詳細說明)。

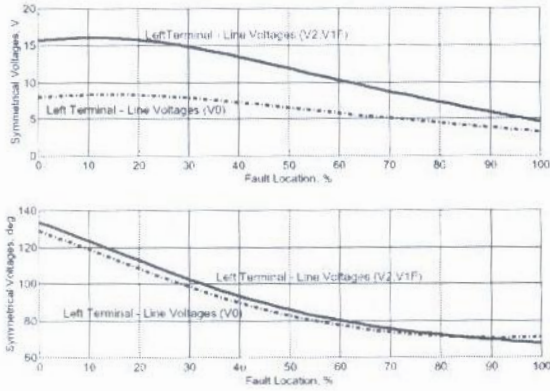


圖 16 · 對稱電壓-左端，線側比壓器：大小(上圖)和相角(下圖)。

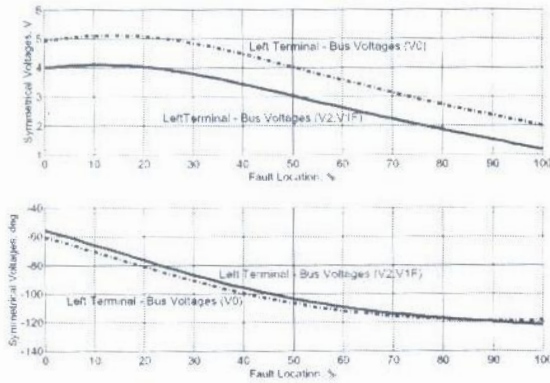


圖 17 · 對稱電壓-左端，匯流排側比壓器：大小(上圖)和相角(下圖)

### 3.2 電壓和電流反向

由在前段實際地說明，不同的電流(故障、相、故障迴路、序)和電壓(相、序)可能會顯示出相對於它的中性位置有明顯的相位移，除非“電壓”和“電流”項被定義成“反向”項，否則“電壓反向”或“電流反向”是沒有意義的，在這篇論文用，反向被定義是從一給定的中性點相量位移超過 90 度。

用上述定義到右端電驛，可推斷出沒有電壓或電流是反向的，幾個信號顯示出明顯的相位移，但沒有一個是被真正地反向的。

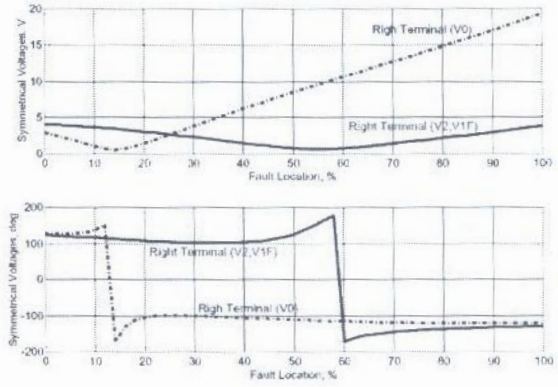


圖 18 · 對稱電壓-左端：大小(上圖)和相角(下圖)

左端電驛經歷了電流和電壓反向，圖 19 圖示了可使特定訊號反向的故障位置，具體地而言：

對於超過串聯電容器而遠達線路長度約 30-40%的故障，零序、負序(和正序的故障成份)電流會被反向，因此，故障相電流和接地迴路電流也一樣會被反向，如在圖 19a 所看到的，而會有故障點是只有某些前述的電流會被反向。

如果從匯流排側比壓器投入左邊電驛，對於超過串聯電容器遠達約線路長度 30-40%的故障而言，零序和負序電壓會被反向，而如果從線路側比壓器投入電驛，只有對於靠近右端的故障的情況，電壓才會被反向。

後面所提的現象可能似乎是不被預期的，它可以用下面來解釋，對於靠近右端的故障而言，從故障點到左邊電動勢的負序和零序對稱網路是電感性的，而從故障點到右邊電動勢的網路也是電感性的，因此，從故障點看入，零序、負序、和正序的等效阻抗都是電感性的，故障電流是電感性的，而在故障點的序電壓沒有被反向，既然在故障點的負序和零序沒有被反向，而網路不是電容性的，那麼在左端的負序和零序電流也是沒有被反向的，然



而，從潛在點(線路側比壓器)回看至左邊 e.m.f.的阻抗是電容性的，電感性負序電流經電容性阻抗導致負序電壓的反向，當負序電流被反向時(圖 19a)，這個現象對於 close in faults 而言並未發生，而反向的電流和電容性阻抗造成負序電壓出現在它的中性點位置。

The above simple method can be used to analyze inversions of all the relevant signals.

What is interesting is that practically all the system parameters influence any particular inversion. For example, the zero-sequence impedance affects inversion of the fault current, thus inversion of the sequence voltage at the fault point, thus inversion of the negative-sequence current at a given terminal, thus inversion of the negative-sequence voltage at that terminal.

上述簡單的方法可被用來分析所有相關訊號的反向，有趣的是所有系統會影響任何特定的反向，例如，零序阻抗影響故障電流的反向，還有故障點序電壓的反向、在一給定端的負序電流的反向、和在那端負序電壓的反向。

### 3.3 選用的比較器對訊號反向的響應

如在前面小段所說明的，對於不同的故障位置可能對不同的訊號造成反向或是位移相當大，現代電驛實際測“測距元件”被架設於幾個交互管理比較器之外，這些比較器包含幾個不同的電流和電壓，為了預測任何特定對串聯補償線路上故障的響應，所以必須使用真實的方程式。

這一段繼續前面的例子說明下面測距比較器的響應：

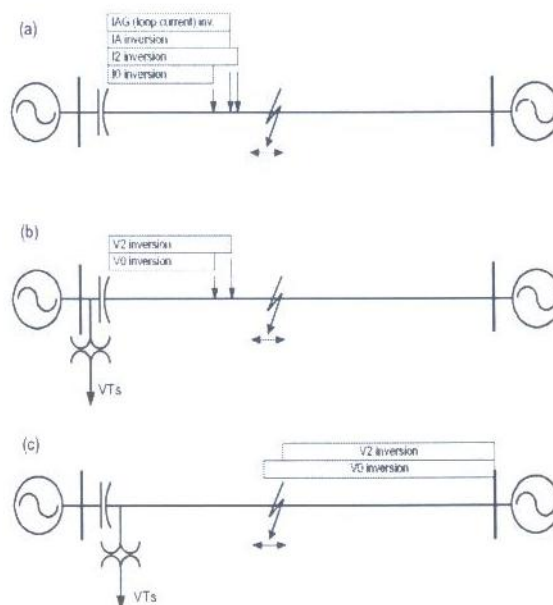


圖 19 · 在左端電驛導致電流和電壓反向的故障位置：電流(a)，用匯流排側比壓器時電壓(b)，和用線路側比壓器時電壓(c)。

### 100%記憶極化動態姆歐

$$I_{AG} Z - V_{AG} \text{ versus } V_{1A\_mem} \quad (12)$$

### 零序電流極化電抗

$$I_{AG} Z - V_{AG} \text{ versus } I_0 Z \quad (13)$$

### 100%記憶極化負序方向性的

$$I_2 Z \text{ versus } V_{1A\_mem} \quad (14)$$

### 100%記憶極化零序方向性的

$$I_0 Z \text{ versus } V_{1A\_mem} \quad (15)$$

這裏 Z 是設定區間阻抗

一個可行的姆歐測距功能應包含狀況 (12)，(13)，(14)，和(15)，一個可能的四邊型的功能應包含狀況(13)，(14)，和

(15)。

圖 20 顯示對於從匯流排側投入的左端電驛和右端電驛之比較器(12)至(15)的包含範圍，這設定區間被設定在兩倍的線路阻抗(未補償)，而且分析過區間設定範圍。

右端電驛的姆歐比較器覆蓋只有約線路 10%，僅管事實上區間設定被設定在兩倍線路阻抗，高故障電阻和訊號反向的結合並未造成覆蓋更多。

在電抗特性的覆蓋上有間斷：對於從右端測起約線路長度 60%-90%的故障將不會被測知到。

負序和零序記憶極化方向性功覆蓋整個線路。

The response of both the mho and reactance comparators is unexpected as at the right terminal none of the signals is truly inverted. It is enough, however, for the signals to be shifted from their natural positions to cause problems.

當在右端沒有訊號真正被反向，姆歐和電抗比較器兩者的阻抗無法預期的，但是對訊號而言是從中性點有足夠的位移而造成問題。

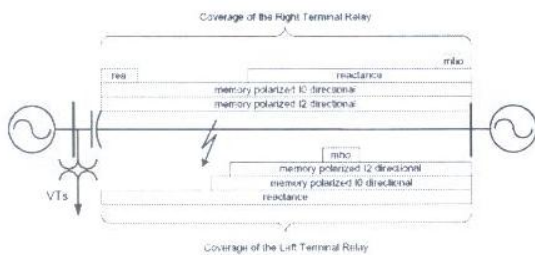


圖 20 · 用匯流排比壓器時不同比較器的覆蓋。

提供匯流器側電壓之左端電驛姆歐比較器將只會覆蓋約 10%線路長度，而在線路的中間是無法預測這覆蓋點，由於訊

號反向，比較器將不會測知 close-in 故障，而由於對於區間設定點的姆歐有限的電阻性覆蓋，比較器將不會測知落於更遠的故障。

令人意外的是，電抗函數覆蓋全部線路(僅管訊號反向)，負序和零序記憶極化方向性元件說明了因電流反向(圖 19a)而對於 close-in 故障的盲點。

圖 21 表示同樣線路的覆蓋，但是當從線路側比壓器投入左端電驛的情形下，除了姆歐比較器外，情況是相當類似的：它也沒有覆蓋全部線路(同時區間設定也是被設定在兩倍線路阻抗)。

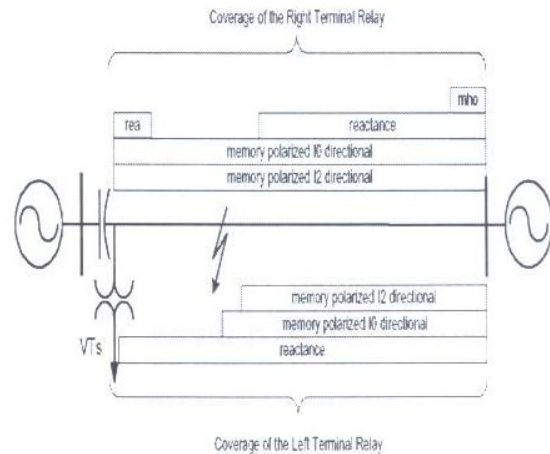


圖 21 · 用線路側比壓器時不同比較器的覆蓋

如在這一段所說明，串聯補償線路在低電流故障情況下，幾個不正常現象可能會發生。特別對串聯補償而言，暫態更進一步複雜化。

#### 4. 暫態

大部份對於裝設在串聯補償線路上電驛的暫態問題，多是由次同步共振所造成的，串聯電容如果在故障期間沒有有效的被氣隙和/或金屬氧化變阻器 by-passed，



是會使故障迴路變成電容性—電感性—電阻性，如此電路有它自己的共振頻率，此共振頻率是非常靠近標稱系統頻率，依照等效電路和電路參數的變化，共振頻率決定於故障位置和故障型態，在任何的情況下，次同步共振只會偏離系統標稱頻率 5-10Hz。

除非應用非常長資料窗在數位濾波器上，否則次同步共振是無有效被電驛濾出，而且電驛速度上會明顯地慢下來，典型上，電驛對正規的應用用相同的濾波技巧，結果被電驛估算出的相位追隨著訊號的 envelopes。

次同步共振也會跟隨著高電流故障發生：在故障期時 MOVs 導通，而電路會被好好地控制住，然而在故障清除後，電流會下降，MOVs 會停止導通，而且串聯電容將會有效地再投入系統，這會造成大的故障後振盪，在故障時儲存在線路上的高能量導致了這些振盪的強度。

例如，圖 22 和 23 表示出在一樣本串聯補償系統上一低電流單相接地故障的情形。

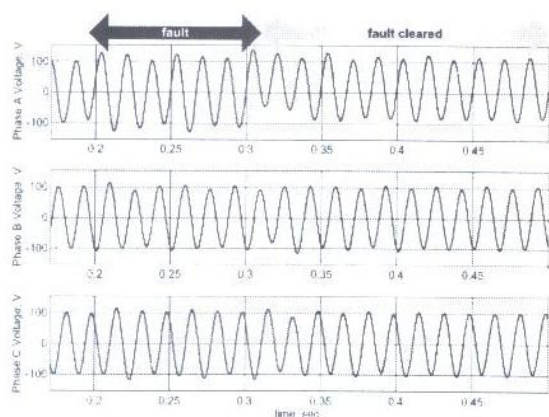


圖 22 · 在串聯補償線路上樣本故障：線路側比壓器電壓。

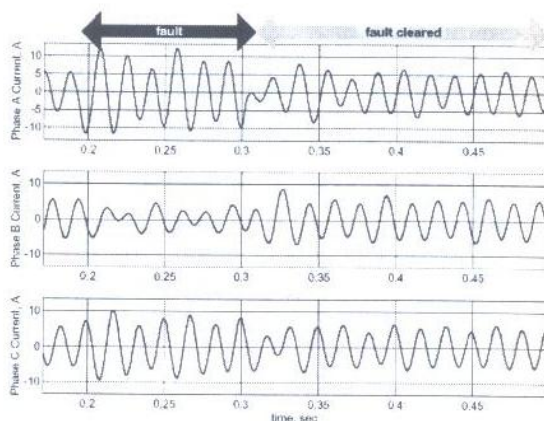


圖 23 · 在串聯補償線路上樣本故障：電流

嚴重的振盪是都可在電流和電壓上看到的，電驛頻率追蹤可能是被這種訊號失真嚴重影響的一個特徵，波型的越零點在時間上是浮動的，如果頻率追蹤是基於越零偵測而且過快，這會造成嚴重的問題，如果頻率追蹤的基於相位，在故障期間由於次同步共振的原因，相位也會跟著移動，所以也無法免除錯誤，頻率追蹤並不須太快，因此，像平均和/或其他後面濾波的中間濾波可解決這個問題。

圖 24 和 25 表示用一個週期的數位評估器(傅利葉演算法的變形)所量算出電壓和電流大小的圖，如圖所看到的，估算出來的大小值會跟隨著它們波形的 envelopes。

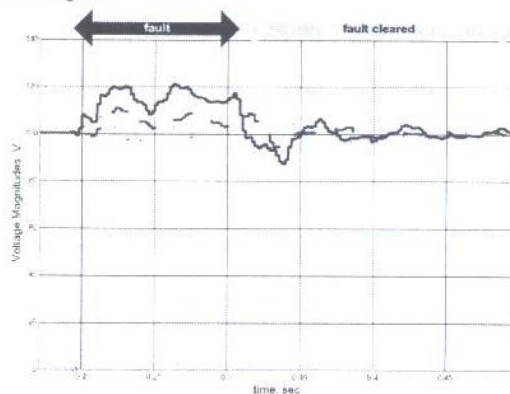


圖 24 · 在串聯補償線路上的樣本故障：電壓大小

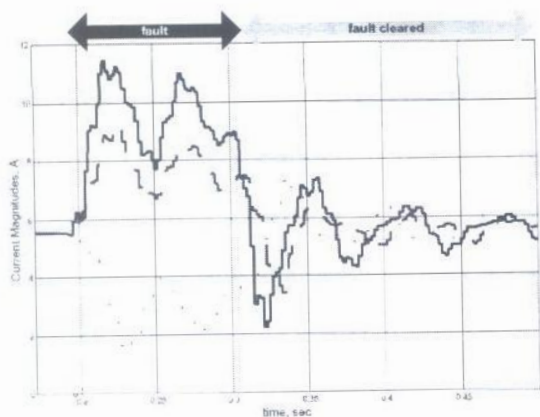


圖 25 · 在串聯補償線路上的樣本故障：  
電流大小

次同步共振對於測距功能的暫態精確度會造成明顯的影響，另外對於補償程度的穩態的過區間設定，當設定欠區間設定測距功能時，必須考慮明顯的暫態過區間設定。

在考慮所有錯誤的來源(50%-70%的穩態過區間設定，10-20%比壓器/比流器/阻抗的誤差，和 10-30%的暫態過區間設定)，它證明出實際上欠區間設定測距範圍是不能被設定的，段落 6 說明了對這一問題的解決方案。

## 5. 負序和正序方向性元件

如在第 3 和 4 段所說明的，過區間測距元件可能無法測知在保護線路上的所有低電流故障，更進一步，如果串聯補償器是位落於電驛潛在源和遠端匯流排之間，或者是有其他源於遠端匯流排而且有串聯補償器裝設在遠端變電站上的補償線路時，欠區間設定的測距區段就不能被設定為含覆保護線路相當大的範圍。

對這個問題的一個解決方法是依靠接地方向性元件，如對載波輔助方案(pilot-aided schemes)的負序或零序，還有在對欠區間設定的測距元件時，電流控制適應

性區間設定方法的負序或零序，這段說明這一方案的第一部分，而下一段說明第二部分。

### 5.1 對接地方向性元件的偏移阻抗方法

當圖 26b 表示出相關的負序訊號相量圖時，圖 26a 表示出對前向故障的負序電壓圖，正常而言，電流落後電反相電壓的角度為從潛在源測回至區域等效網路的負序阻抗，因此，極化和操作的量值被定義為：

$$S_{pol} = -V_2, \quad S_{op} = I_2 \cdot 1 \angle ECA \quad (16)$$

這裏 ECA 是一個元件特性角度，設定如上面說明的。

對於應用在未補償線路上而言，有極化訊號(負序訊號)可能太低而導致無法確保對於前向故障可靠操作的危險，如果區域系統是非常強，那這種一情況可能會發生，增加一個同相操作訊號的小電壓於極化訊號，就可解決這個問題，因此，偏移阻抗方向性元件被定義如下：

向前看(“跳脫”)負序方向性元件：

$$S_{pol} = -V_2 + I_2 \cdot Z_{offset} \cdot 1 \angle ECA, \quad S_{op} = I_2 \cdot 1 \angle ECA \quad (17a)$$

向後看(“停止”)負序方向性元件：

$$S_{pol} = -V_2 + I_2 \cdot Z_{offset} \cdot 1 \angle ECA, \quad S_{op} = -I_2 \cdot 1 \angle ECA \quad (17b)$$

如在圖 26b 所示，偏移阻抗增加極化訊號而且確保適當的操作。

圖 26c 表示上對於反向故障的電壓圖形，在反向故障期間，在電驛點的電壓至少是線阻抗乘上在電驛點的電流，偏移阻抗減少了極化訊號，但只要偏移阻抗比線阻抗和遠端阻抗還低(圖 26d)，元件就會



正確地反應。

對於未補償線路的應用，偏移阻抗是被設定在線路阻抗 10-25% 的大小，這會改善操作速度，而且即使在非常強的系統下，也會保證前向故障的偵測。

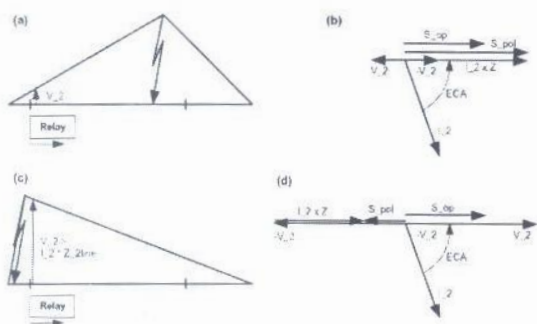


圖 26 · 對於前向故障((a)和(b))和反向故障(c)和(d))的負序電流和電壓

這個著名的方法在可被用在串聯補償線路上時，可造成一個非常強健、可靠、而且安全的方向性元件。

在串聯補償應用上，如果負序電壓被反向，會產生一個錯誤的方向性指示，然而，如果偏移阻抗足夠高，錯方向是被相抵消的，而且元件會正確地反應。

同樣的方法可應用到零序方向性的元件。

## 5.2 對於偏移阻抗方向性元件的設定建議

在電驛點上負序電壓和電流之間的關係，是完全決定於從電驛潛在點到區域等效電路 e.m.f. 之間的負序電抗，如果這個阻抗是電感性的，那麼負序電壓和電流是在“中性”的關係，如果這個電抗是電容性的，這關係以致於方向性的確認是錯誤的。上述產生非常直接的設定建議：

1. 如果在電驛潛在源和區域等效系統的 e.m.f. 之間的網路阻抗是電感性

的，那麼是不需要偏移阻抗的，如果電抗是電容性的，那麼偏移應至少是如此電容性阻抗的電抗，這確保元件在所有前向故障時操作在它的區間設定內。

2. 偏移阻抗不可以高於在電驛潛在源和遠端等效系統 e.m.f. 之間的網路電感性阻抗，否則元件是過度補償的，而在反向故障時將會被測知。

考慮圖 7 的系統，忽略在相關阻抗間的角度差，可計算下面的設定：

### 右邊電驛的負序方向性成份：

$Z_{\text{offset}} > 0$  (當在電驛後的阻抗是電感性時，不須要偏移)

$Z_{\text{offset}} < 10 \cdot 7 + 1.43 = 4.43$  姆歐 (偏移不能高於從電驛潛在源和前向 e.m.f. 之間的網路阻抗)

### 右邊電驛的零序方向性成份：

$Z_{\text{offset}} > 0$

$Z_{\text{offset}} < 30 \cdot 7 + 2.68 = 25.6$  姆歐

### 左邊電驛 (線路側比壓器) 的零序方向性成份：

$Z_{\text{offset}} > -(-7 + 1.43) = 5.57$  姆歐 (必需採用超 5.57 姆歐的偏移，否則前向故障將不會被偵測)

$Z_{\text{offset}} < 10 + 3.44 = 13.44$  姆歐 (偏移不能高於從電驛潛在源和前向 e.m.f. 之間的網路阻抗)

### 左邊電驛 (線路側比壓器) 的零序方向性成份：

$Z_{\text{offset}} > -(-7 + 2.68) = 4.32$  姆歐

$Z_{\text{offset}} < 30 + 16.4 = 46.4$  姆歐

### 左邊電驛（匯流排側比壓器）的負序方向性成份：

$Z_{\text{offset}} > 0$ （當在電驛後的阻抗是電感性時，不須要偏移）

$Z_{\text{offset}} < -7+10+3.44 = 6.44$  姆歐（偏移不能高於從電驛潛在源和前向 e.m.f. 之間的網路阻抗）

### 左邊電驛（線路側比壓器）的零序方向性成份：

$Z_{\text{offset}} > 0$

$Z_{\text{offset}} < -7+30+16.4 = 39.4$  姆歐

如果圖 6 的系統明顯地改變形態，原始的系統應被考慮，而不是圖 7 的等效，因此，設定也可能是不一樣的。

偏移負序和正序成份對載波輔助方案提供一個完美的方向性整合，不管比壓器和串聯電容器的位置，它們不僅保證正確地操作在串聯補償線路上，而且快速和敏感[3]。

只要保護的網路不是過補償，成分總是可以被設定，換句話說，兩個設定規則總是可以被滿足。

## 6. 適應性測距區間設定

如在第 3 段所說明的，當測距功能被應用至串聯補償線路上時，是無法對低電流故障提供可靠的保護，首先，即使在保護線路上明顯地過區間保護時，它們還是可能失敗地測知內部故障。第二，對於一個欠區間設定直接地跳脫操作，它們必須要謹慎地被設定，為了要避免由於次同步共振的過區間設定有時會設定低至線路 10-20% 而已。

對於用於串聯補償線路上測距保護有效應用的問題，其解決方案是使用一電流

控制適應性區間設定方法，在這個解決方案內，測距功能的區間設定被下面的值所減少：

$$Z_{\text{effective}}(|I|) = Z_{\text{SET}} - \frac{V_{\text{LIM}}}{|I|} \cdot 1 \angle \text{angle}(Z_{\text{SET}}) \quad (18a)$$

有效的區間設定是迴路電流(I)之大小的函數，區間設定的減少會沿著最大轉矩角度線發生：對於越高的電流，越少的減少。對於大電流而言，區間設定被非常小部分的拉回，另一方面，對於低於某一個值的電流而言，測距元件會被有效地限制住：

$$|I| < \frac{V_{\text{LIM}}}{|Z_{\text{SET}}|} \rightarrow \text{block} \quad (18b)$$

$V_{\text{LIM}}$  值是一個設定參數，而且應被設定為從電驛潛在點到沒有區間設定範圍的所有串聯電容器電壓保護大小值的和。

圖 27 說明了適應性區間設定的方法：對於導致橫跨在預期的區間設定內串聯電容器的電壓降小於電壓保護大小的電流而言，區間設定被完全拉回，而且實際上範圍是被限制住的，對於導致 MOVs 和/或氣隙只導通一些電流的大電流、穩定次同步共振、和由於串聯電容器減少有效的過區間設定而言，區間設定相對應地被減少，而對於實際上使串聯電容器被完全地 by-pass 時的非常大電流，區間設定一點也沒有被減少。

這個方法提供了最大的安全性，但如果故障電流可以高到足夠對測距保護原則確保適合的操作狀況，那麼這方法同時在欠區間設定範圍可允許覆蓋高達線路傳統的 80-85%，而低電流故障可被接地方向性功能覆蓋。

圖 28 說明了適應性區間設定方法，在區間設定點的低電流故障由於次同步共振，會造成明顯地穩態過區間設定和額外



的暫態過區間設定，在如此的情況(圖 28a)，區間設定被相當地減少，以致於這地區沒有過區間設定。而在區間設定點有高電流故障時(圖 28b)，區域的區間設定並沒減少，但當有效的 Goldsworthy 電抗非常小而且無次同步共振時，在這同時區間設定是不需要被減少的，因為區間設定沒有減少，所以高電流內部故障被覆蓋的如在傳統應用一般(圖 28c)。

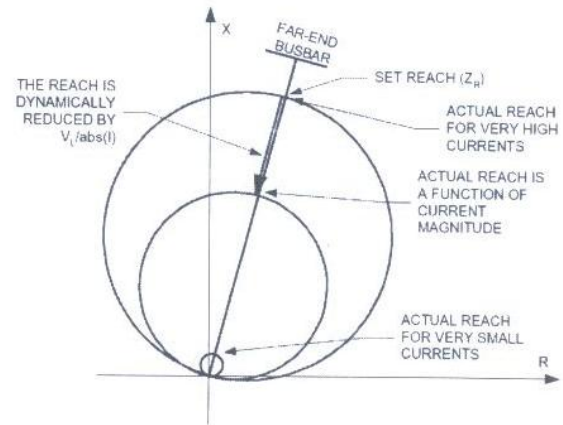


圖 27 電流相依適應性區間設定

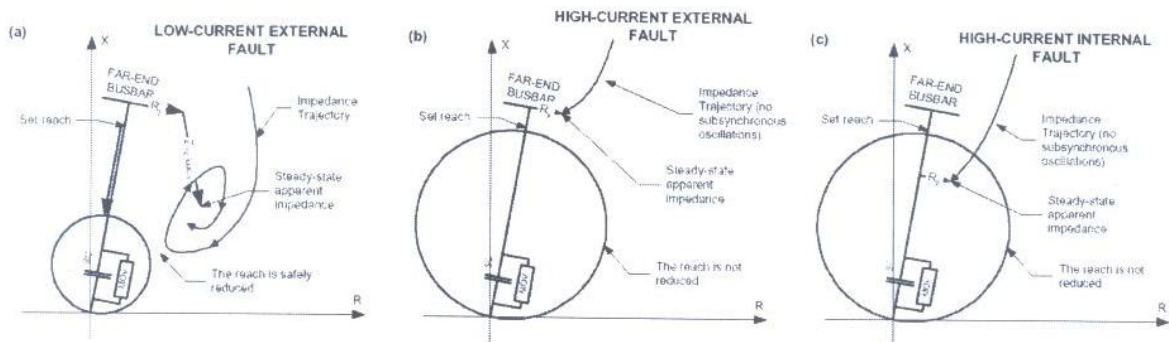


圖 28 · 圖示電流相依適應性區間設定

對於過區間設定區段， $V_{LIM}$  的設定應被設定在零。

對於欠區間設定區段， $V_{LIM}$  設定應被設定為從電驛潛在點到預期區間設定點之間所有串聯電容器電壓保護大小的和，例如，對於圖 6 的系統，應用下面的設定：

#### 右端電驛：

$V_{LIM} = 7$  歐姆和 5 歐姆串聯電容器之電壓保護等級的和(當 2-歐姆等效系統被解聯或變非常弱時，對於超越 5-歐姆的故障而言，右端區域-1 必須不是過區間設定)

#### 左端電驛(匯流排側比壓器)：

$V_{LIM} = 7$  歐姆和 12 歐姆串聯電容器之電壓保護等級的和(對於超越 12-歐姆的故障而言，左端區域-1 必須不是過區間設定)

#### 左端電驛(線路側比壓器)：

$V_{LIM} = 12$  歐姆串聯電容器之電壓保護等級。

用電流控制適應性區間設定的方法時，可能在設定欠區間設定區域時會非常侵略性地設定在未補償線路阻抗 80-85%。

### 7. 對單相跳脫的相選擇

在電力系統的輸電骨幹中，串聯補償線路是非常強的連結，很多電力公司為了使在單線接地故障時，使其他兩正常相能

工作正常，而且維持減少的電力傳輸，會選擇應用單相跳線。

對於單相跳脫而言，快速而且準確地作相選擇是非常重要的，而針對於精確的作相選擇而言，下面所要討論的議題就有需要被考慮。

在低電流故障時訊號反向時可能會導致錯誤的故障確認，這個影響決定於被電驛使用特定的相選擇方法。

因為被電驛量測的訊號-典型是相位-會有大的估測誤差，所以次同步共振可能造成額外的問題。

但對於高電流故障而言，在串聯補償線路上比起未補償線路上，相選擇並未加更多的問題。

採用對故障型態識別之等級體系的方法的相選擇演算法[4]，如果電流失敗於識別故障，電壓會被利用，而電流和電壓都會被用正序、負序、和零序訊號之間的角度關係來分析。

在第一個步驟，正序、負序、和零序訊號的故障成分大小必需被確認，如果一個給定的成分是大到足以提供故障型式額外的訊號，那麼預期用來確認的門檻是適應性的：正序和零序電流小心選擇部份是被用作適應性門檻。要是一給定的對稱成分是有用的話，它相對於其它兩成分的角度位置會被用著名的故障型態(如圖 29 所示)檢視。

在正序和負序電流之間關係總是會被檢視，如果零序電流也被呈現出來，那麼在正序和負序電流之間關係也一樣會被檢視，如果正序對負序和負序對零序的故障型式被檢視，為了要識別一給定的故障型態，那麼它們必須要相符。

如果電流在識別故障時失敗，電壓會被用於完全同樣的方法，當從 close-in 變

壓器流出的零序電流支配正序和負序電流時，實際上是會破壞在相電流上的任何不對稱，而且使相選擇變的不可能，因而在弱投入的情況下，電流可能會失敗，如果是這樣的一個情況，電壓顯示出大量不對稱，允許電驛識別故障型式，如果電壓失敗(例如隨著遠離電驛點之內部故障的 cross country 故障)，演算法利用欠區間設定測距範圍來決定故障型態，在如此的環境下，後面似乎是對的。

藉著利用兩故障型態，演算法更安全，如在[4]中所說明和圖示，因為演算法是用訊號的相角，那在故障前狀態是零，所以演算法是非常快速的，而且在任何特定方向上並沒有偏移，例如，僅管在三相上的共振和電流大小似乎相同，顯示在圖 23 的波形利用 2-msec 長的資料而被正確地識別為 A 相對地故障。

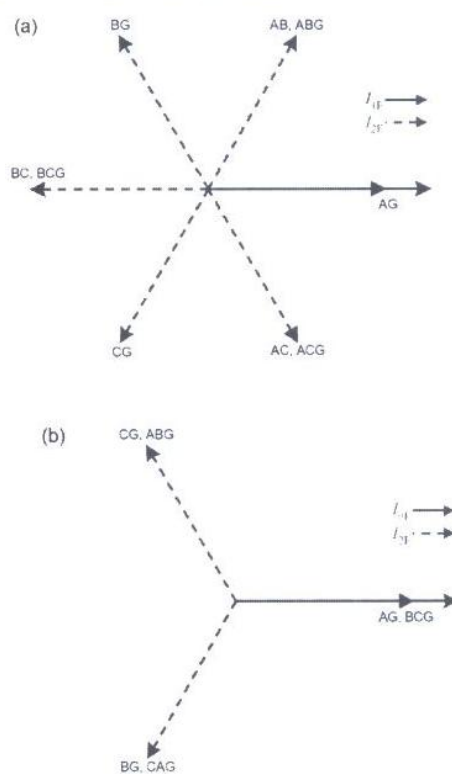


圖 29 · 負序對正序故障特徵(a)和負序對零序故障特徵(b)



在 cross country 故障期間時，和/或由於串聯補償相選擇的問題時，可能會呈現一些問題，然而，它非常不太可能的在兩端的相選擇器會錯誤動作，如果一個電驛會失敗於正確識別故障，呈現在[4]的多位元傳輸方案會確保在主要有問題狀況下適當地操作，在多位元方案中電驛用超過一個位元來傳送出允許或停止的訊號給其它同等的電驛，在這個方式中，在故障型態上的額外訊息會被在電驛中互相交換，現今，隨著電驛通訊系統的進步，用超過一位元來作為發出訊號的方案不是困難的事，也不是昂貴的，所以在串聯補償的困難狀況下單極跳脫的應用中應被考慮使用。

## 8. 故障定位

因為串聯補償線路典型上都是很長，精確的故障定位是很基本的，然而，在串聯補償線路上做精確的定位是一個相當大的挑戰，當區間設定精確時，方向性的整合和可靠性是對於測距功能唯一的需求，而對於線路上的任何故障可以精確指出的能力，這是故障定位器的需求。

在過去已提出一系列的故障定位的演算法，其範圍從單端阻抗為基礎的方法到以傳送波為基礎的技巧，大多數商業可用的故障定位器，通常是以 Digital Fault Recorder (DFR) 套裝軟體的一部分或獨立運作設備或來提供，或跟數位電驛整合在一起，這些故障定位器都是基於基本頻率的電壓和電流，從而基於視在阻抗。

以單端阻抗為基礎的演算法是利用一組不充分完全的方程式，例如，為了要完成故障定位計算而一個方程式是找不到的，而為了要產生找不到的方程式和推導出故障定位的演算法，就會用各種不同的

假設，如線兩端的電流故障成分須是同相的、故障阻抗須是純電阻、或區域和遠端系統的等效阻抗是已知的。各種不同的假設也產生各種不同的故障定位方法。

雙端演算法是用一組過份充分的方程式，換句話說，決定於在兩端測量到資料的總數，這是可以產生比未知更多的方程式，這可故障定位器避免使用可能不精確的資料(像系統的零序阻抗)，而且改善故障定位的精確性。

不管所採用的方法，對於描述未知故障點的簡化電路的方程式組是用電抗演算法來解(而且當成一個副產品-故障電阻)，如果串聯電容器和 MOVs 不在這些方程式裏面，故障定位就會不精確，當傳統的演算法應用至串聯補償線路時，可能暴露出 20% 的誤差。

如果考慮在串聯補償線路上作一成功的故障定位，會有幾個困難。

首先，Goldsworthy 模型中的非線性電流相依阻抗必須要考慮，這個阻抗決定於流過的電流，而且使方程式變成非線性，另外，表示三相串聯電容器排組和 MOVs 的序網路是相互耦合的，當有作精確的故障定位須求時，耦合是不能忽略的，因此，當設計的演算法不能解方程式時，故障定位器就須要用數值方法來解。

第二，可能有一個或兩個的補償排阻裝設在線路上不同的位置，這個須要幾個平行的演算法，或是假設故障在分離線段上的“故障定位器”，每一個次演算法發表出它自己故障定位估算值，必須要發展一個分離選擇的程序來決定最有可能的故障位置，或者至少對檢查人員排列出優先檢查的順序。

第三，單端法並沒有在遠端測量電流，如果串聯電容器在故障點和遠端間，



因為補償排組的流經電流不能被直接量出，所以 Goldsworthy 模型不能被很容易的應用到單端法上，而且串聯電容器和 MOVs 的工作點會影響故障定位的準確度，對這一問題的解決方法是對遠端電流相互的求解[2,5]，但這個解決方案須要遠端系統的等效阻抗。

第四，如果電驛快速保護電路跳脫，那麼對於故障定位器可能只有利用很短的資料窗長度，次同步共振的出現可能會嚴重影響相位評估和故障定位的精確性。

第五，對於低速電驛和開關器的操作而言，MOVs 可能累積它們的最大可允許能量，可能被由 MOV 熱保護激發的氣隙來 by-passed，如果這發生，對於夠長的有效資料窗長度會被分成幾個分別的部分，每一部分分別對應不同的網路架構 (MOVs on 和 bypassed)，每一段的記錄資料都太短而無法作出精確的故障定位。

特別對串聯補償線路發展而以阻抗為基礎的故障定位演算法，它是應用 Goldsworthy 的等效阻抗，取代用故障迴路的方法，演算法用中性三相座標(也就是對相電壓和電流)來解方程式，對於有一串聯電容器排組在線上的線路而言，演算法在跑兩個內部的”故障定位器”：一個假設故障在電驛和串聯電容器間，另一個假設故障在串聯電容後，一個分辨選擇的演算法被提出來指出兩者之中那一個才是對的。

## 9. 結論

特別對於串聯補償線路而言，保護電驛問題只有在低流故障時才會遭到它們的全範圍，低電流故障會在弱系統中或由於大故障電阻而發生，在前面的情況，串聯補償的影響實際上會被系統的大電感性阻

抗抵消，後面的情況實際上只會發生在單線接地故障時，當對串聯補償係作一般分析是十分困難的(Goldsworthy 等效，在序網路中的相互耦合)，由於實際情況，可考慮低電流單線接地故障的直接基本情形。

通常，對於接地測距保護最佳的零序補償因素是故障位置和故障電流的複雜函數，實際上，當影響接地測距保護精確度的其他因素是有較大程度高的重要性，那麼從線路參數計算出來的值就可以被利用。

電驛潛在源的兩個匯流排側和線路側位置造成它們自己的問題，利用線路側電壓不會簡化串聯補償的應用，串聯電容器依然在那裏，有可能是向前的方向，也有可能是向後的方向。

測距保護在低電流故障時或在串聯補償線路附近時面對嚴重的困難，由於串聯補償的測距保護過區間設定在有次同步共振時會有很大的錯誤，而且也可能由於訊號反向而失敗於偵測內部故障，欠區間保護範圍必須被縮小非常多而只保護一小部分線路，過區間設定範圍即使它的區間設定是非常大也是要面對可靠性的限制。

對於接地(負序和中性)方向功能對過區間設定測距保護提供了一個很好的選擇，不管串聯補償的程度及串聯電容器和電壓變壓器的位置，偏移阻抗的方法保證非常好的方向性整合。

電流控制適應性區間設定，對於直接跳脫測距區域的穩態和暫態過區間設定問題是一個較好的解決方案，這個解決方案提供了最大的安全性，而且同時允許在傳統 80-85%線路長度內的高電流故障跳脫。

對於串聯補償的單相跳脫也會遭遇到



問題，先進的相選擇演算法和多位元載波輔助方案會改善保護系統的特性。

在串聯補償線路上的故障定位會被嚴重的影響，傳統的演算法可能會有 20% 程度的誤差，而特別對串聯補償發展的以傳送波為基礎的演算法和新型以阻抗為基礎的方法是更精確的。

僅管固定增加的電力需求，串聯補償線路還是十分罕見，是值得利用數位模擬器和/或 play back 系統對串聯補償應用，如微調和驗證設定，作暫態情況的模擬，最後測試電驛系統。

## 9. 參考文獻

1. GOLDSWORTHY D.L., "A linearized model for MOV-protected series capacitors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.2, No.4, pp.953-958, November 1987.
2. SAHA M.M., IZYKOWSKI J., ROSOLOWSKI E., KASZTENNY B., "A new accurate fault locating algorithm for series compensated lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, No.3, July 1999, pp.789-797.
3. KASZTENNY B., SHARPLES D., CAMPBELL B., POZZUOLI M., "Fast Ground Directional Overcurrent Protection—Limitations and Solutions", Proceedings of the 27th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 24-26, 2000.
4. KASZTENNY B., CAMPBELL B., MAZEREEUW B., "Phase Selection for

Single-Pole Tripping – Weak Infeed Conditions and Cross Country Faults", ", Proceedings of the 27th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 24-26, 2000.

5. SAHA M.M., HILLSTROM B., IZYKOWSKI J., ROSOLOWSKI E., KASZTENNY B., "A method of fault location for series-compensated lines", Patent WO99/32894, issued July 1, 1999.

## 10. 作者簡介

**Bogdan Kasztenny** 的碩士和博士都是畢業於波蘭的 Wroclaw 科技大學(the Wroclaw University of Technology (WUT))。畢業後他任職於 WUT 的電機學院，後來他到在 Carbondale 的 Southern Illinois University 和在 College Station 的 Texas A&M University，在從 1989 到 1999 年間，Kasztenny 博士參與了許多電力公司、電驛供應商、及科學基金會的研究專案，而從 1999 年起，Kasztenny 博士工作於 GE Power Management，當首席應用工程師，Kasztenny 博士是 IEEE 的資深會員，已經發表超過 100 篇技術文章，而且是五個專利的發明人，他的研究興趣主要在於對以微處理機為基礎之電驛的先進保護和控制演算法、電力系統模型化和分析、及數位訊號處理。

11. 本文係由 GE 公司免費提供本協會轉載，以饗本會會員。

