

## 工業配電系統三相短路故障電流分析

### 壹、前言

三相短路故障電流計算為配電設計重要的一環，有關係統的保護與協調、斷路器或熔絲之瞬時及啟斷容量的選擇、機械強度的決定等，皆與該項資料發生密切的關係。解析工業配電系統三相短路故障電流的方法有匯流排阻抗矩陣法、將匯流排導納矩做反矩陣計算，以得到匯流排阻抗矩陣法及組成解故障電流結構等方法[1-5]。本輔助教學主要以上述方法為分析對象，並以 Microsoft Visual Studio .NET 為工具，撰寫其教學網頁。

### 貳、匯流排阻抗矩陣法分析工業配電系統三相短路故障電流

本節分為元件阻抗標么計算、匯流排阻抗矩陣之組成及故障電流與啟斷容量等小節說明如下：

#### 一、元件阻抗標么計算

工業配電系統的元件主要有台電電源、變壓器、導線與旋轉電機。設基值容量為  $VA_{base}$ ，且選擇變壓器的額定電壓為基值電壓  $V_{base}$ ，則：

(一) 台電電源阻抗標么：

設責任分界點之短路容量為  $VA_s$ ，其電抗與電阻比為  $XR_s$ ，則電源

阻抗標么  $ZB_{s(pu)}$  為：

$$ZB_{s(pu)} = \left( \frac{1}{XR_s} + j1 \right) \times \frac{XR_s}{\sqrt{1 + XR_s^2}} \times \frac{VA_{base}}{VA_s} \quad (1)$$

(二) 變壓器阻抗標么：

設變壓器的容量為  $VA_T$ ，其百分比阻抗為  $R_T(\%) + jX_T(\%)$ ，則其阻

抗標么  $ZB_{T(pu)}$  為：

$$ZB_{T(pu)} = \left( \frac{R_T(\%) + jX_T(\%)}{100(\%)} \right) \times \frac{VA_{base}}{VA_T} \quad (2)$$

(三) 導線阻抗標么：

設每條導線單位長度之阻抗為  $R_u + jX_u \Omega/kM$ ，架設長度為  $L$  公

尺，每相並聯之導線數目為  $PN$ ，則其阻抗標么  $ZB_{c(pu)}$  為：

$$ZB_{c(pu)} = (R_u + jX_u) \times \frac{L}{1000 \times PN} \times \frac{VA_{base}}{V_{base}^2} \quad (3)$$

(四) 旋轉電機阻抗標么

設同步發電機、同步電動機或三相感應電動機等旋轉電機的阻抗

標么值為  $Z_{M,pu}$ ，電抗與電阻比為  $XR_M$ 、額定容量為  $VA_M$ ，則其阻抗標

么  $ZB_{M(pu)}$  為：

$$ZB_{M(pu)} = \left( \frac{1}{XR_M} + j1 \right) \times \frac{XR_M}{\sqrt{1 + XR_M^2}} \times Z_{M,pu} \times \frac{VA_{base}}{VA_M} \quad (4)$$

## 二、匯流排阻抗矩陣的衍化與修正

將台電公司變電所的匯流排將其編號定為 1，則元件組成匯流排阻抗矩陣，有下列四種情況。

(一) 情況 1：從新匯流排 p 經  $Z_b$  接至參考匯流排 1

新匯流排 p 經  $Z_b$  接至參考匯流排加入網路時，如圖 1 所示。

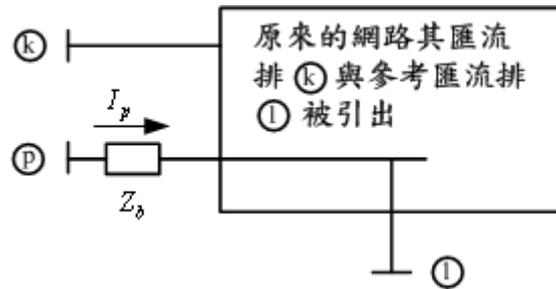


圖 1 新的匯流排 p 和參考匯流 1 加上阻抗為  $Z_b$  的元件

由於未與網路中的其他匯流排相接，所以當電流  $I_p$  注入此新匯流排時，對原來匯流排電壓皆不會影響。此新匯流排的電壓  $V_p$  為  $I_p Z_b$ 。

由矩陣所表示之方程式為：

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \\ \dots \\ V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & 0 \\ & & & & 0 \\ & & & & \vdots \\ & & & & 0 \\ \hline 0 & 0 & \dots & 0 & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \\ \dots \\ I_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

(二) 情況 2：在新匯流排 p 經由  $Z_b$  接至既有匯流排經 k

在新匯流排 p 經由  $Z_b$  接至既有匯流排經 k，如圖 2 所示。

電流  $I_p$  注入匯流排 k 使原來的電壓  $V_k$  增加  $I_p Z_{kk}$ ；且  $V_p$  比新的  $V_k$  電

壓高出  $I_p Z_b$ ，即：

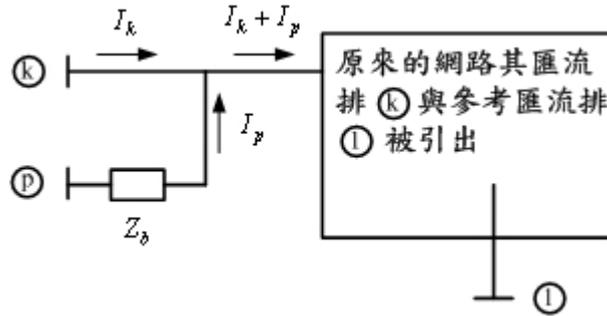


圖 2 新的匯流排 p 和既有匯流 k 間加上阻抗為  $Z_b$  的元件

$$\begin{aligned}
 V_{k,new} &= V_{k(orig)} + I_p Z_{kk} \\
 V_p &= V_{k(orig)} + I_p (Z_{kk} + Z_b) \\
 &= I_2 Z_{k2} + I_3 Z_{k3} + \dots + I_n Z_{kn} + I_p (Z_{kk} + Z_b)
 \end{aligned}$$

由矩陣所表示之方程式為：

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \\ \dots \\ V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & 0 \\ & & & & 0 \\ & & & & \vdots \\ & & & & 0 \\ Z_{k2} & Z_{k3} & \dots & Z_{kn} & Z_{kk} + Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \\ \dots \\ I_p \end{bmatrix} \quad (6)$$

(三) 情況 3：在既有匯流排 k 經由  $Z_b$  接至參考匯流排 1

在既存匯流排 k 經由  $Z_b$  接至參考匯流排 1，如圖 3 所示。

在這種情形下如何改變  $Z_{bus(orig)}$ ，可分為下述的兩個程序：

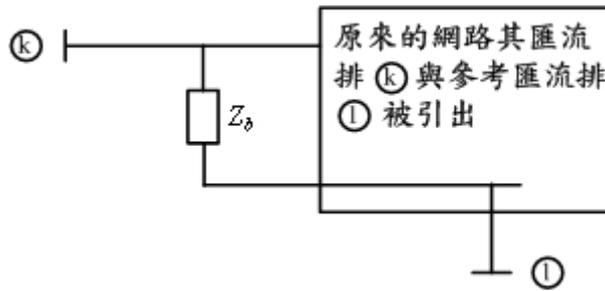


圖 3 既有匯流 k 間加上阻抗為  $Z_b$  的元件至參考匯流排 1

程序 1：先將一新匯流排 p 經  $Z_b$  至匯流 k，然後將匯流排 p 短路至參考匯流排。使  $V_p$  為零時可得到一個與(6)式相同的矩陣方程式，此時式

中的  $V_p$  等於零。



阻抗為  $Z_b$  的元件加入後真實的  $Z_{bus}$ ，並記為  $Z_{bus(new)}$ ，仍為一  $(n-1) \times (n-1)$  的矩陣。新矩陣的每一元素，可由下式加以修正而得。

$$Z_{i,j} = Z_{i,j(orig)} - \frac{Z_{in} \times Z_{nj}}{Z_b + Z_{jj} + Z_{kk} - 2Z_{jk}} \quad (14)$$

$(i, j = 2, 3, \dots, n)$

### 三、組成匯流排阻抗矩陣 $Z_{bus}$ 矩陣之流程圖

設工業配電系統的元件相互間並無耦合(Coupling)的情形，則匯流排阻抗矩陣  $Z_{bus}$  之非對角線元素應有下列的對稱關係：

$$Z_{ij} = Z_{ji} \quad (15)$$

$$\left( \begin{array}{l} i, j = 2, 3, 4, \dots, n \\ i \neq j \end{array} \right)$$

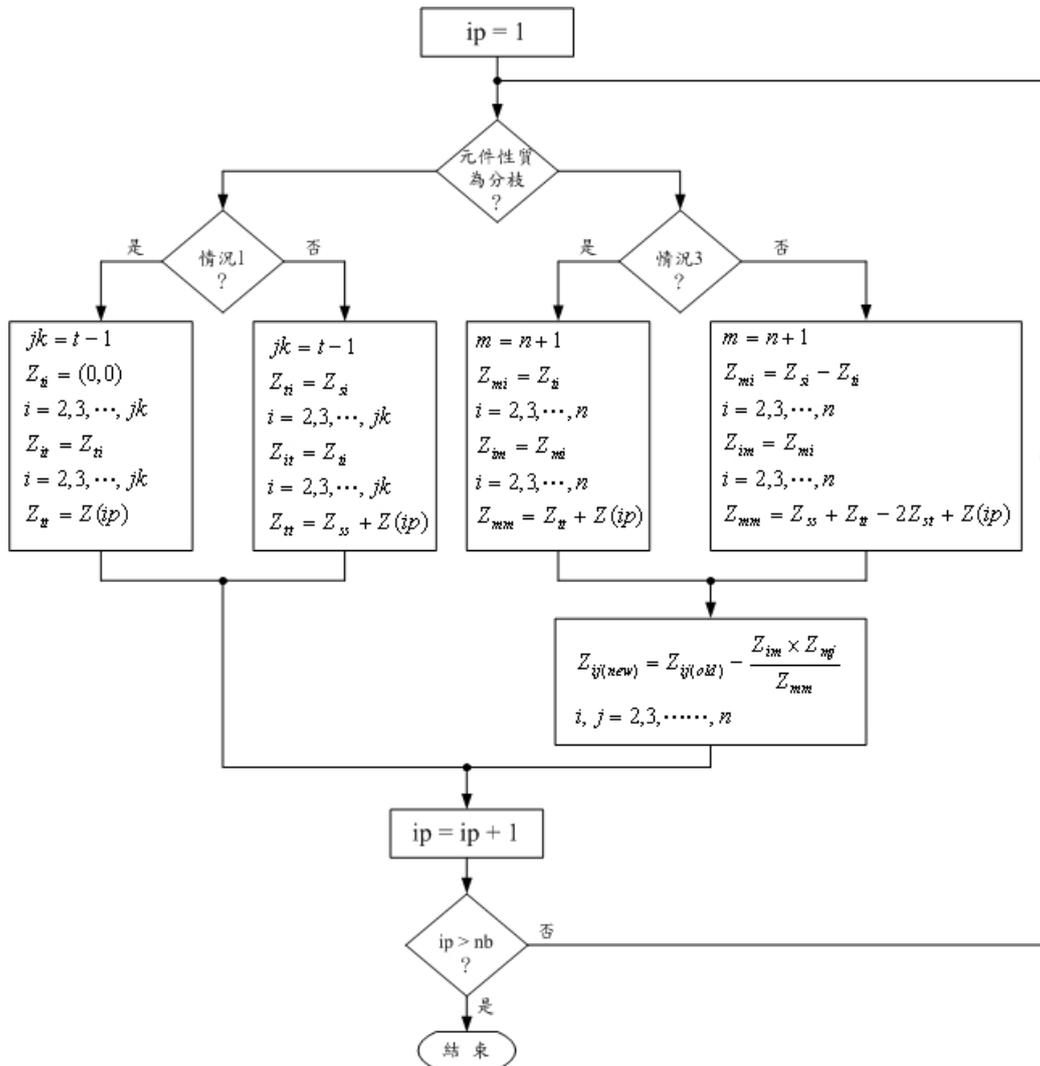


圖 5 匯流排阻抗矩陣  $Z_{bus}$  組成的流程圖

圖 5 所示為  $Z_{bus}$  矩陣組成的流程圖中，係依下述條件而撰寫：

- (一) 設工業配電系統的元件總數為 nb，匯流排的總數為 n。
- (二) 系統的每一元件均予編號，組成匯流排阻抗矩陣  $Z_{bus}$  的過程，係由編號最小的元件最先加入組成，然後依序且逐次的加入元件以組成  $Z_{bus}$  矩陣，直至編號為最後的元件為止。
- (三) 設元件加於匯流排 s 與 t 之間，其中 s 為元件的起始匯流排，t 為元件的終止匯流排。且匯流排 1 或參考匯流排被設定為起始匯流排。
- (四) 流程圖之  $Z(ip)$  為編號 ip 元件之阻抗； $Z_{ij}$  為  $Z_{bus}$  矩陣之第 i 列與第 j 列的元素。
- (五) 若元件特性為分枝，則每加入一個分枝會使系統匯流排數目及編號增 1。

設元件起始匯流排編號為 ifo(i)、終止匯流排編號為 ito(i)、元件電阻標么值為 brgpu(i)、電抗標么值為 brxpu(i)、且元件總數為 nb 及匯流排總數為 nbus，則匯流排導納矩陣  $Y_{bus}$  的組成，其程式撰寫如下：

#### 計算匯流排驅動點阻抗

```

Public Sub bulid_zbus()
  For i = 1 To nb
    k = ifo(i)
    kk = ito(i)
    If brprotery(i) = 1 Then
      rbus(k, k) = brrpu(i)
      xbus(k, k) = brxpu(i)
    ElseIf brprotery(i) = 2 Then
      jj = kk - 1
      For j = 1 To jj
        rbus(kk, j) = rbus(k, j)
        xbus(kk, j) = xbus(k, j)
        rbus(j, kk) = rbus(kk, j)
        xbus(j, kk) = xbus(kk, j)
      Next j
      rbus(kk, kk) = rbus(k, k) + brrpu(i)
      xbus(kk, kk) = xbus(k, k) + brxpu(i)
    ElseIf brprotery(i) = 3 Then
      mm = nbus + 1
      For j = 1 To nbus
        rbus(mm, j) = rbus(k, j)
        xbus(mm, j) = xbus(k, j)
        rbus(j, mm) = rbus(mm, j)
        xbus(j, mm) = xbus(mm, j)
      Next j
      rbus(mm, mm) = rbus(k, k) + brrpu(i)
      xbus(mm, mm) = xbus(k, k) + brxpu(i)
    For i1 = 1 To nbus
      For j1 = 1 To nbus
        r1 = rbus(i1, mm)
        x1 = xbus(i1, mm)
        r2 = rbus(mm, j1)
        x2 = xbus(mm, j1)
      
```

```

    Call cmpmult
    r3 = rbus(mm, mm)
    x3 = xbus(mm, mm)
    Call cmpdiv
    rbus(i1, j1) = rbus(i1, j1) - rdiv
    xbus(i1, j1) = xbus(i1, j1) - xdiv
  Next j1
Next i1
ElseIf brprotery(i) = 4 Then
  mm = nbus + 1
  For j = 1 To nbus
    rbus(mm, j) = rbus(k, j) - rbus(kk, j)
    xbus(mm, j) = xbus(k, j) - xbus(kk, j)
    rbus(j, mm) = rbus(mm, j)
    xbus(j, mm) = xbus(mm, j)
  Next j
  rbus(mm, mm) = rbus(k, k) + brrpu(i) + rbus(kk, kk) - 2 * rbus(k, kk)
  xbus(mm, mm) = xbus(k, k) + brxpu(i) + xbus(kk, kk) - 2 * xbus(k, kk)
  For i1 = 1 To nbus
    For j1 = 1 To nbus
      r1 = rbus(i1, mm)
      x1 = xbus(i1, mm)
      r2 = rbus(mm, j1)
      x2 = xbus(mm, j1)
      Call cmpmult
      r3 = rbus(mm, mm)
      x3 = xbus(mm, mm)
      Call cmpdiv
      rbus(i1, j1) = rbus(i1, j1) - rdiv
      xbus(i1, j1) = xbus(i1, j1) - xdiv
    Next j1
  Next i1
End If
Next i
End Su

```

#### ‘處理複數乘法運算

```

Private Sub cmpmult()
  rmu = r1 * r2 - x1 * x2
  xmu = r1 * x2 + r2 * x1
End Sub

```

#### ‘處理複數除法運算

```

Private Sub cmpdiv()
  sqz = r3 ^ 2 + x3 ^ 2
  rdiv = (rmu * r3 + xmu * x3) / sqz
  xdiv = (xmu * r3 - rmu * x3) / sqz
End Sub

```

#### 四、匯流排瞬時與啟斷容量的計算

計算匯流排瞬時與啟斷容量之目的在提供相關資料以供保護器作規格選擇。圖 6 所示為工業配電系統典型的短路電流，故障初期除交流穩態成分外尚有直流成分，因此保護器的瞬時與啟斷容量應分別考慮其對稱與非對稱容量；對非對稱係數  $k$  則定義為非對稱短路電流與對稱短路電流的比值。

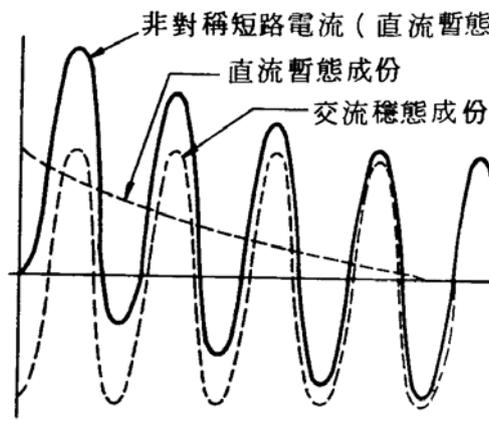


圖 6 工業配電系統典型的短路電流

本小節依高壓電力熔絲、高壓斷路器與低壓斷路器等情形分別說明如下：

##### (一) 高壓電力熔絲與高壓斷路器

###### 1. 瞬時容量

高壓電力熔絲或高壓斷路器的瞬時容量係指半波時的最大短路電流。當系統發生單相接地故障時，非對稱係數  $k$  的值最大為 1.732；在考慮故障處的  $X/R$  比值，若工業配電系統設置於近發電廠處則  $k$  值選用 1.6，遠離發電廠處則  $k$  值選用 1.5[6-7]。在計算瞬時容量，每部旋轉電機的電抗應採用次暫態電抗作計算。

###### 2. 啟斷容量

高壓電力熔絲的啟斷容量應等於瞬時容量。一般工業配電系統用的高壓斷路器，啟斷時間約在 5~8 週波，而短路電流的直流成分約在 6 週波消失，因此高壓斷路器的啟斷容量依其動作時間選用不同的  $k$  值，如 8 週波動作者  $k=1.0$ ，5 週波動作者  $k=1.1$ 。若匯流排責務容量在 500MVA 以上者，其  $k$  值應加 0.1[6-7]。計算裝設高壓斷路器之匯流排的啟斷容量，旋轉電機的電抗計算資料在同步發電機選用次暫態電抗、同步電動機選用暫態電抗、感應電動機的電抗則視為無限大。

###### 3. 瞬時與啟斷容量的計算

設系統的基值容量為  $VA_{base}$ 、匯流排  $i$  的次暫態與暫態驅動點阻抗 (Driving Point Impedance) 分別為  $Z''_{ii}$  與  $Z'_{ii}$ 、瞬時容量之對稱與非

對稱值分別為  $I_{i,sym}$  與  $I_{i,asy}$  啟斷容量之對稱與非對稱值分別為  $S_{i,sym}$  與  $S_{i,asy}$ ，則高壓匯流排之各種短路容量為：

$$I_{i,sym} = \frac{VA_b}{\sqrt{3}V_i |Z''_{ii}|} \quad (16)$$

$$I_{i,asy} = 1.6 \times I_{i,sym} \quad (17)$$

$$\left( \begin{array}{l} i = 2,3,4, \dots, n \\ V_i \geq 0.6kV \end{array} \right)$$

$$S_{i,sym} = \frac{VA_{base}}{|Z'_{ii}|} \quad (18)$$

$$S_{i,asy} = k_i \times S_{i,sym} \quad (19)$$

$$\left( \begin{array}{l} i = 2,3,4, \dots, n \\ V_i \geq 0.6kV \end{array} \right)$$

(二) 低壓斷路器：

600 伏以下的低壓斷路器其瞬時與啟斷容量相同。通常以半週時的非對稱短路容量之三相平均值，作為選擇斷路器啟斷容量之依據。其非對稱係數  $k_i$  可依下式計算之：

$$k_i = \sqrt{1 + e^{-2\pi R_{ii}/X_{ii}}} \quad (20)$$

低壓匯流排之對稱啟斷容量  $I_{i,sym}$  與非對稱啟斷容量  $I_{i,asy}$  分別為：

$$I_{i,sym} = \frac{VA_{base}}{\sqrt{3}V_i \times Z_{ii}} \quad (21)$$

$$I_{i,asy} = k_i \times I_{i,sym} \quad (22)$$

$$\left( \begin{array}{l} i = 2,3, \dots, n \\ V_i < 0.6kV \end{array} \right)$$

五、匯流排瞬時與啟斷容量的流程圖

依照上述，可規劃計算匯流排瞬時與啟斷容量的流程圖，如圖 7 所示。

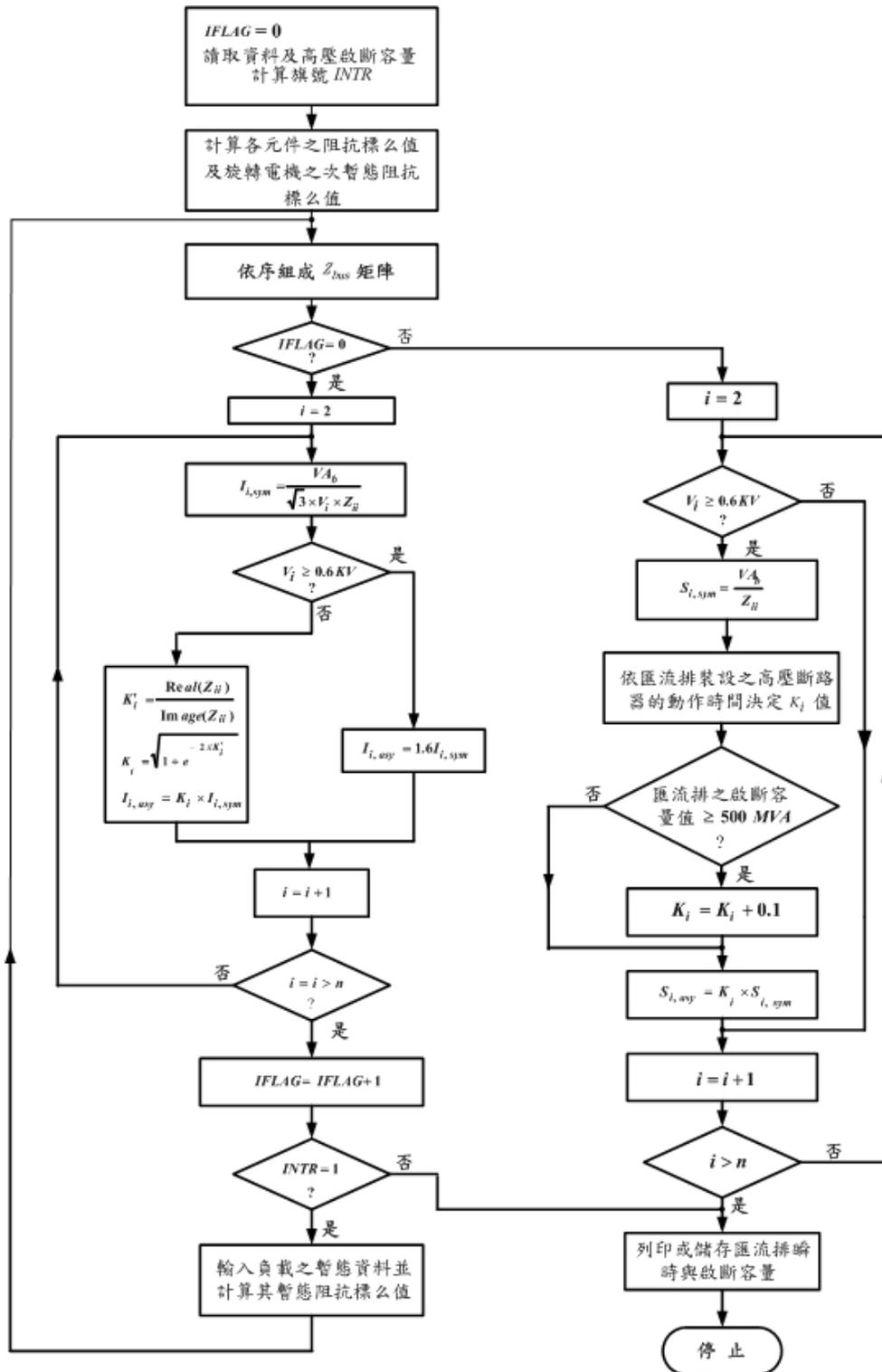


圖 7 計算匯流排瞬時與啟斷容量的流程圖

**參、以匯流排導納矩陣  $Y_{bus}$  為基礎的工業配電系統三相短路故障電流**

對一工業配電系統可由節點電壓方程式，得到下式的結果，即：

$$Y_{bus}V_{bus} = I_{bus} \quad (23)$$

其中  $I_{bus}$  為流入匯流排的匯流排電流向量，而  $Y_{bus}$  為匯流排的導納矩陣。

對(23)式做處理可得

$$V_{bus} = Y_{bus}^{-1}I_{bus} = Z_{bus}I_{bus} \quad (24)$$

由(24)式可知匯流排的阻抗矩陣  $Z_{bus}$ ，可由匯流排的導納矩陣  $Y_{bus}$  取反矩陣而得。本節分為匯流排的導納矩陣  $Y_{bus}$  的組成，及導納矩陣  $Y_{bus}$  的反矩陣運算。

**一、匯流排的導納矩陣  $Y_{bus}$  的組成**

設工業配電系統匯流排的總數為  $n$ ，且設台電公司變電所的匯流排編號為 1，且為參考匯流排。則匯流排導納矩陣  $Y_{bus}$  的大小為  $(n-1) \times (n-1)$ 。設連接至  $i$  匯流排有  $m$  個元件，則  $i$  匯流排的對角線元素為所有連接至該匯流排的導納和，即

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^m y_{ij} \quad (25)$$

$(i = 2, 3, \dots, n)$

非對角線元素為連接兩匯流排間導納的負值，即

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (26)$$

$$\begin{pmatrix} j \neq i \\ i = 2, 3, 4, \dots, n \\ j = 2, 3, \dots, n \end{pmatrix}$$

使用 Visual Basic6.0 為軟體發展工具，設元件起始匯流排編號為 ifo(i)、終止匯流排編號為 ito(i)、元件電導標么值為 brgpu(i)、電納標么值為 brgpi(i)、且元件總數為 nbt 及匯流排總數為 nbus，則匯流排導納矩陣  $Y_{bus}$  的組成，其程式撰寫如下：

**'計算匯流排導納矩陣(nbus)\*(nbus)**

```
Public Sub cal_ybus()
  For i = 1 To nbus
    For j = 1 To nbus
      bbus(i, j) = 0
      gbus(i, j) = 0
    Next
  Next
  For i = 1 To nbt
    bbus(ifo(i), ifo(i)) = bbus(ifo(i), ifo(i)) + brbpu(i)
    gbus(ifo(i), ifo(i)) = gbus(ifo(i), ifo(i)) + brgpi(i)
    If ito(i) = 1 Then
      GoTo 5
    End If
  Next
End Sub
```

```

bbus(ito(i), ito(i)) = bbus(ito(i), ito(i)) + brbp(i)
bbus(ifo(i), ito(i)) = bbus(ifo(i), ito(i)) - brbp(i)
bbus(ito(i), ifo(i)) = bbus(ifo(i), ito(i))
gbus(ito(i), ito(i)) = gbus(ito(i), ito(i)) + brgpu(i)
gbus(ifo(i), ito(i)) = gbus(ifo(i), ito(i)) - brgpu(i)
gbus(ito(i), ifo(i)) = gbus(ifo(i), ito(i))

```

5 Next

**'將匯流排導納矩陣重新整理為(nbus-1)\*(nbus-1)**

```

For i = 1 To nbus - 1
  For j = 1 To nbus - 1
    ybus(i, j) = 0
    ybusag(i, j) = 0
  Next
Next
For i = 1 To nbus - 1
  For j = 1 To nbus - 1
    rp = gbus(i + 1, j + 1)
    ip = bbus(i + 1, j + 1)
    ybus(i, j) = (rp ^ 2 + ip ^ 2) ^ 0.5
    Call ybsang
    ybusag(i, j) = aple
    If Abs(ybusag(i, j)) > pi Then
      If ybusag(i, j) < 0 Then
        ybusag(i, j) = ybusag(i, j) + 2 * pi
      ElseIf ybusag(i, j) > 0 Then
        ybusag(i, j) = ybusag(i, j) - 2 * pi
      End If
    End If
  Next
Next
End Sub

```

**'計算相角**

```

Public Sub ybsang()
  If rp = 0 And ip = 0 Then
    aple = 0
    Exit Sub
  ElseIf rp = 0 And ip > 0 Then
    aple = pi / 2
    Exit Sub
  ElseIf rp = 0 And ip < 0 Then
    aple = -pi / 2
    Exit Sub
  End If
  ag = Atn(Abs(ip) / Abs(rp))
  If rp > 0 And ip >= 0 Then
    aple = ag
  ElseIf rp < 0 And ip > 0 Then
    aple = pi - ag
  ElseIf rp < 0 And ip < 0 Then
    aple = (pi + ag)
  ElseIf rp > 0 And ip <= 0 Then
    aple = -ag
  End If
End Sub

```

## 二、匯流排的導納矩陣 $Y_{bus}$ 之反矩陣運算

關於匯流排的導納矩陣  $Y_{bus}$ ，為一非奇異矩陣(Nonsingular Matrix)之反矩陣運算，有很多方法可解其反矩陣。本文採用高斯-喬登法(Gauss-Jordan Method)。為節省儲存位置，以一 3 階矩陣說明其反矩陣運算的過程。

(一)原矩陣

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & 1 \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & 0 \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

(二) 消去第一行  $Y_{11}$  以外的元素後

$$\begin{bmatrix} 1 & Y_{12}^1 & Y_{13}^1 & Y_{14}^1 \\ 0 & Y_{22}^1 & Y_{23}^1 & Y_{24}^1 \\ 0 & Y_{32}^1 & Y_{33}^1 & Y_{34}^1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

(三)令第一行的元素為第四行元素，且令第四行為  $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。即：

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^1 & Y_{12}^1 & Y_{13}^1 & 0 \\ Y_{21}^1 & Y_{22}^1 & Y_{23}^1 & 1 \\ Y_{31}^1 & Y_{32}^1 & Y_{33}^1 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

(四)消去第二行  $Y_{22}^1$  以外的元素後

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^2 & 0 & Y_{13}^2 & Y_{14}^2 \\ Y_{21}^2 & 1 & Y_{23}^2 & Y_{24}^2 \\ Y_{31}^2 & 0 & Y_{33}^2 & Y_{34}^2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

(五) 令第二行的元素為第四行元素，且令第四行為  $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。即：

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^2 & Y_{12}^2 & Y_{13}^2 & 0 \\ Y_{21}^2 & Y_{22}^2 & Y_{23}^2 & 0 \\ Y_{31}^2 & Y_{32}^2 & Y_{33}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

(六)消去第三行  $Y_{33}^2$  以外的元素，令第三行元素為第四行元素。

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^3 & Y_{12}^3 & Y_{13}^3 & Y_{14}^3 \\ Y_{21}^3 & Y_{22}^3 & Y_{23}^3 & Y_{24}^3 \\ Y_{31}^3 & Y_{32}^3 & Y_{33}^3 & Y_{34}^3 \end{bmatrix} \quad (32)$$

則  $Y_{bus}^{-1} = Z_{bus}$ ，即  $Z_{bus}^{-1}$  為：

$$Z_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{11}^3 & Y_{12}^3 & Y_{13}^3 \\ Y_{21}^3 & Y_{22}^3 & Y_{23}^3 \\ Y_{31}^3 & Y_{32}^3 & Y_{33}^3 \end{bmatrix} \quad (33)$$

**肆、組成解工業配電系統三相短路電流的結構以解故障電流**

將台電變電所的匯流排視為無限匯流排，並將其編為匯流排 1，其性質為參考節點(Reference Node)，以組成解工業配電系統三相短路故障電流的結構，來解故障電流。以圖 8 有 16 匯流排與 23 個元件的工業配電系統為例，說明解匯流排三相短路容量結構的組成方法與匯流排驅動點阻抗的計算。

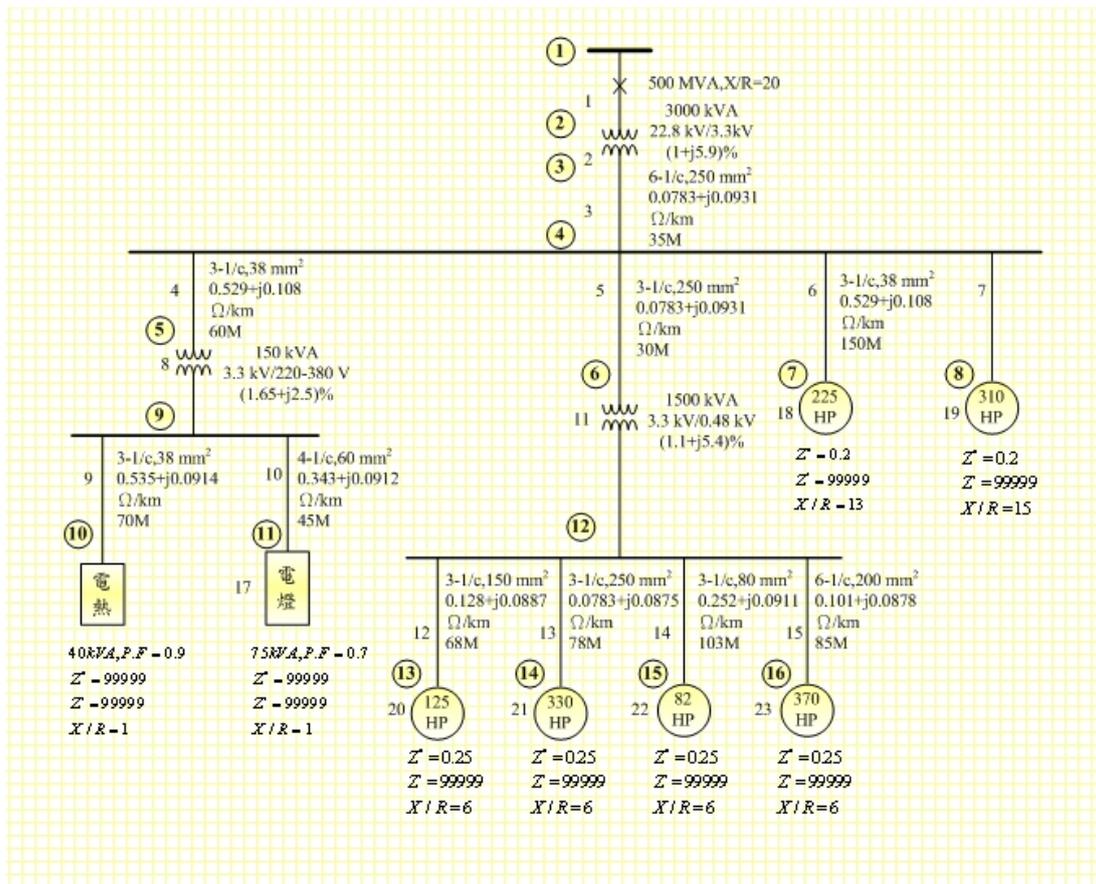


圖 8 有 16 匯流排與 23 個元件的工業配電系統

**一、解匯流排三相短路容量的結構**

組成解故障電流的結構可分為 3 個主要步驟：(1)選擇距參考節點 1 最遠的匯流排作為饋線節點(Feeder Node) 1 或根節點(Root Node)，並以根節點為起端，找出系統所有饋線節點及與其相聯之每條饋線的第 1 個分枝；(2)依饋線節點的

數目將系統分解成若干次系統；各個次系統分別由其饋線節點及所轄之饋線所組成；(3)將各饋線末端分枝與其相關聯之下層饋線節點相連接，則系統發生故障的結構便組成。

如圖 1 所示為一有 16 個匯流排的工業配電系統，選匯流排 4 為根節點，則步驟(1)完成之部分結構，如圖 9 所示；由步驟(2)與步驟(3)完成解系統發生三相故障的整個結構，如圖 10 所示。

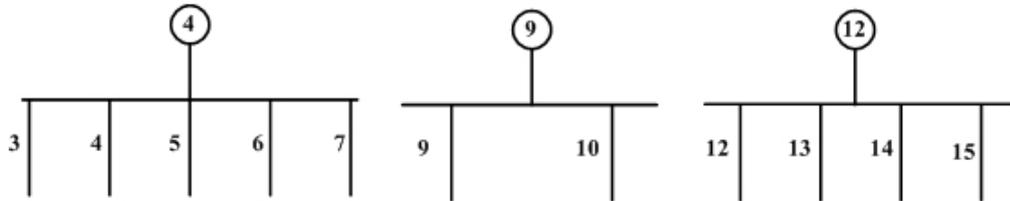


圖 9 饋線節點及與其相聯之每條饋線的第 1 個分枝

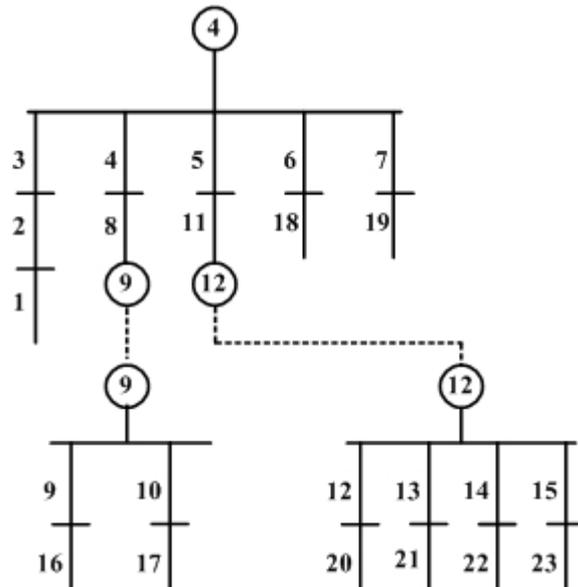


圖 10 由 3 個次系統互聯組成解故障電流的結構圖

## 二、匯流排驅動點阻抗的計算

設系統的饋線節點數目為  $m$ ，則匯流排驅動點阻抗的計算，可分為 2 個步驟：(一)依後向掃瞄，由編號為  $m$  的次系統，計算其由無限匯流排至各饋線與饋線節點的驅動點阻抗，並依序且逐次的加入其他次系統，以計算無限匯流排至其各饋線與饋線節點的驅動點阻抗，直至第 1 個次系統為止，當完成上述程序，則第 1 饋線節點所對應匯流排的驅動點阻抗被計算出來；

(二) 依前向掃瞄，由第 1 個次系統為起端計算其各饋線之匯流排的驅動點阻抗，然後依序且逐次的計算其他次系統各饋線之匯流排的驅動點阻抗，直至第  $m$  個次系統為止。對上述匯流排驅動點阻抗的計算情形說明如下：

(一) 第 1 饋線節點驅動點阻抗：

圖 11 所示，為編號  $F_i$  的饋線節點及其所轄的  $r$  條饋線，其中第 1 條至第  $n$  條饋線末端分枝聯接於參考節點 1、饋線中編號為 1 之元件或分枝的阻抗為各短路電源的內阻；第  $n+1$  條至第  $r$  條饋線末端分枝聯接其下層饋線節點，而下層饋線節點與參考節點間之阻抗為其加入系統運算時對參考節點所量測或計算的阻抗。

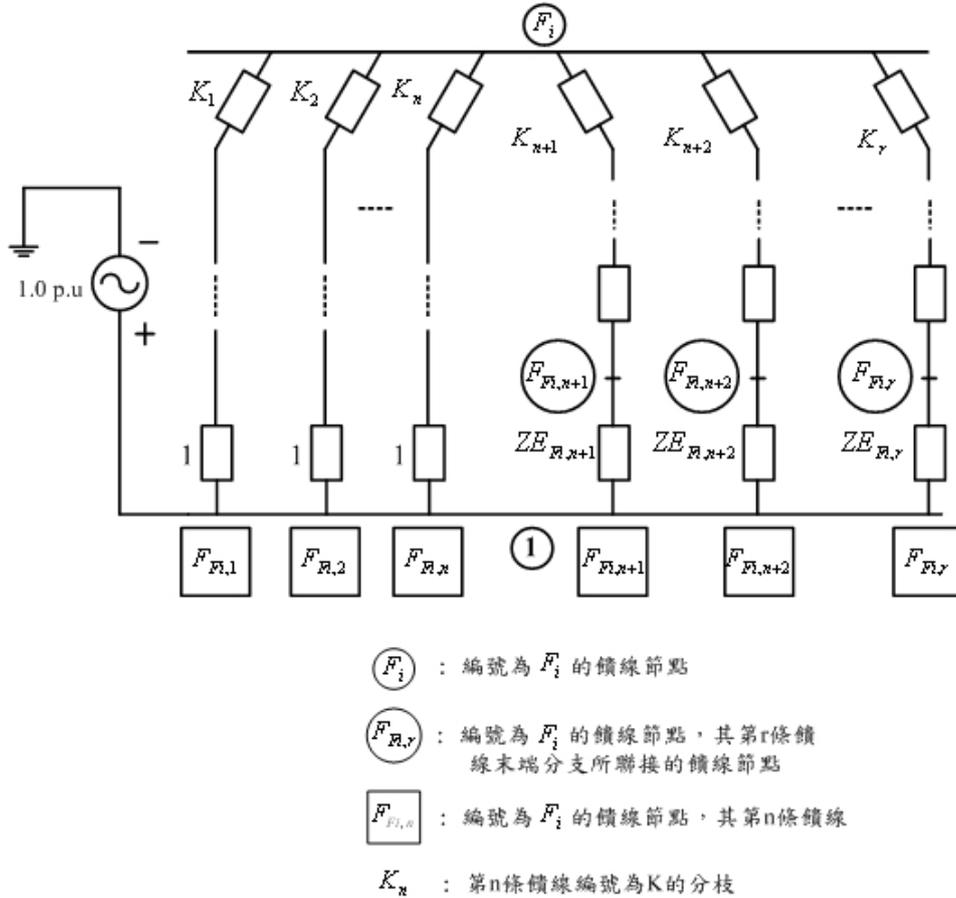


圖 11 編號為  $F_i$  的饋線節點及其所轄的  $r$  條饋線

當饋線節點  $F_i$  及其所轄的  $r$  條饋線加入系統運算時，各饋線及饋線節點  $F_i$  對參考節點的阻抗計算可分為下述的 3 種情形說明之：

情形 1：饋線末端分枝的終止匯流排為參考節點：

設饋線節點  $F_i$  其第  $x$  條饋線對參考節點的阻抗為  $ZFD_{F_i,x}$ ，則：

$$ZFD_{F_i,x} = \sum_{s=1}^{K_x} ZB_{F_i,x,s} \quad (34)$$

$$\left( \begin{array}{l} x = 1, 2, \dots, n \\ F_i = m, m-1, \dots, 2, 1 \end{array} \right)$$

其中

$ZB_{F_i,x,s}$  : 編號為  $F_i$  的饋線節點其第  $x$  條饋線編號為  $s$  分枝的

阻抗。

情形 2：饋線末端分枝聯接下層饋線節點：

設編號為  $F_i$  的饋線節點其第  $y$  條饋線末端分枝聯接於編號為

$F_{Fi,y}$  的下層饋線節點，則第  $y$  條饋線對參考節點的阻抗為  $ZFD_{Fi,y}$

為：

$$ZFD_{Fi,y} = ZE_{Fi,y} + \sum_{S=1}^{K_y} ZB_{Fi,x,S} \quad (35)$$

$$\left( \begin{array}{l} y = n+1, n+2, \dots, r \\ F_i = m, m-1, \dots, 2, 1 \end{array} \right)$$

其中

$ZE_{Fi,y}$ ：編號為  $F_i$  的饋線節點其第  $y$  條饋線所聯接之下層饋

線節點  $F_{Fi,y}$  對參考節點的阻抗。

情形 3：饋線節點  $F_i$  對參考節點的阻抗

設編號為  $F_i$  的饋線節點對參考節點的阻抗為  $ZE_{Fi}$ ，則依並聯電路原理其值可計算如下：

$$ZE_{Fi} = \frac{1}{\sum_{t=1}^r \frac{1}{ZFD_{Fi,t}}} \quad (36)$$

$$\left( \begin{array}{l} y = n+1, n+2, \dots, r \\ F_i = m, m-1, \dots, 2, 1 \end{array} \right)$$

第 1 饋線節點或其匯流排的驅動點阻抗  $ZBS_{F1}$  等於其對參考節點的阻抗  $ZE_{F1}$ ，即

$$ZBS_{F1} = ZE_{F1} \quad (37)$$

(二) 其他匯流排的驅動點阻抗：

圖 12 所示，為饋線節點  $F_i$  其第  $k$  條饋線的短路電流之電源由參考節點 1 析離出來的情形；圖 13 所示，為計算線節點  $F_i$  其第  $k$  條饋線之匯流排驅動點阻抗的電路圖。

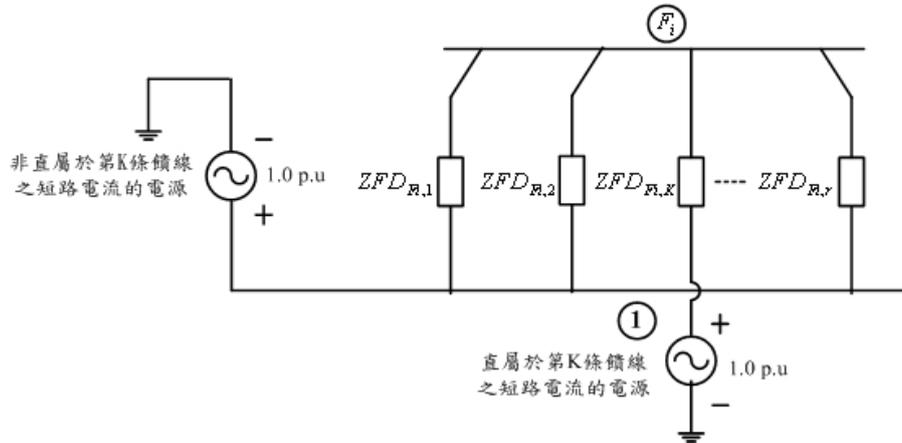


圖 12 第 k 條饋線的短路電流的電源由參考匯流排析離出來

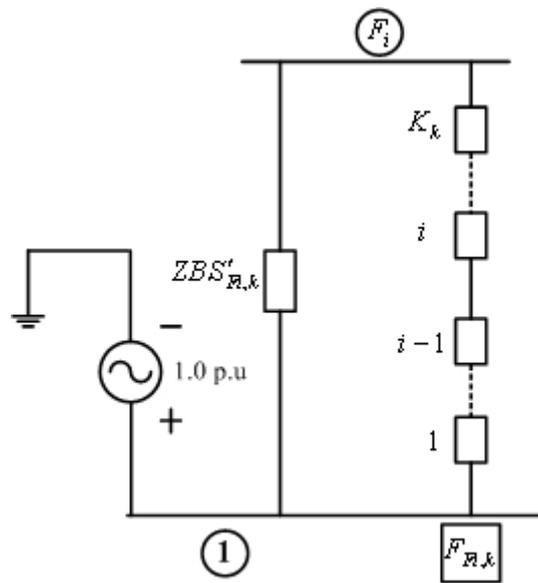


圖 13 計算饋線節點  $F_i$  其第 k 條饋線之匯流排驅動點阻抗的電路圖

圖 13 中之阻抗  $ZBS'_{F_i,k}$  為令  $ZFD_{F_i,k} = \infty$  大時，饋線節點  $F_i$  的驅動點阻抗；第 k 條饋線編號為 i 之分枝的終止匯流排驅動點阻抗

$ZBS_{F_i,k,To(i)}$ ，可由下述的兩個步驟計算之：(1)將編號為 i 與 i-1 分枝間的聯接線切斷，則可得兩個斷路點；(2)計算或量測每個斷路點至參考節點的阻抗，設其值分別為  $ZP_1$  與  $ZP_2$ ，則  $ZP_1$  與  $ZP_2$  的並聯阻抗即為  $ZBS_{F_i,k,To(i)}$ 。

依上述饋線上匯流排驅動點阻抗之計算原理，可分為下述的 2 種情形說明饋線節點  $F_i$  其所轄饋線之匯流排驅動點阻抗之計算。

情形 1：饋線末端分枝聯接參考節點

設饋線節點  $F_i$  其第  $x$  條饋線編號為  $i$  之分枝的終止匯流排驅

動點阻抗為  $ZBS_{Fi,x,To(i)}$ ，則

$$ZBS_{Fi,x,To(i)} = \left( \frac{1}{\frac{1}{ZBS_{Fi}} - \frac{1}{ZFD_{Fi,x}}} + \sum_{s=i}^{K_x} ZB_{Fi,x,s} \right) // \sum_{t=1}^{i-1} ZB_{Fi,x,t} \quad (38)$$

$$\begin{pmatrix} i = k_x, k_{x-1}, \dots, 3, 2 \\ x = 1, 2, \dots, n \\ F_i = 1, 2, \dots, m \end{pmatrix}$$

情形 2：饋線末端分枝聯接下層饋線節點

設饋線節點  $F_i$  其第  $y$  條饋線聯接下層饋線節點  $F_{i,y}$  則第  $y$  條饋

線編號為  $i$  之分枝的終止匯流排驅動點阻抗為  $ZBS_{Fi,k,To(i)}$ ，則

$$ZBS_{Fi,y,To(i)} = \left( \frac{1}{\frac{1}{ZBS_{Fi}} - \frac{1}{ZFD_{Fi,y}}} + \sum_{s=i}^{K_y} ZB_{Fi,y,s} \right) // \left( ZE_{Fi,y} + \sum_{\substack{t=1 \\ t \leq i-1}}^{i-1} ZB_{Fi,y,t} \right) \quad (39)$$

$$\begin{pmatrix} i = k_y, k_{y-1}, \dots, 2, 1 \\ y = n+1, n+2, \dots, r \\ F_i = 1, 2, \dots, m \end{pmatrix}$$

三、匯流排瞬時與啟斷容量的流程圖

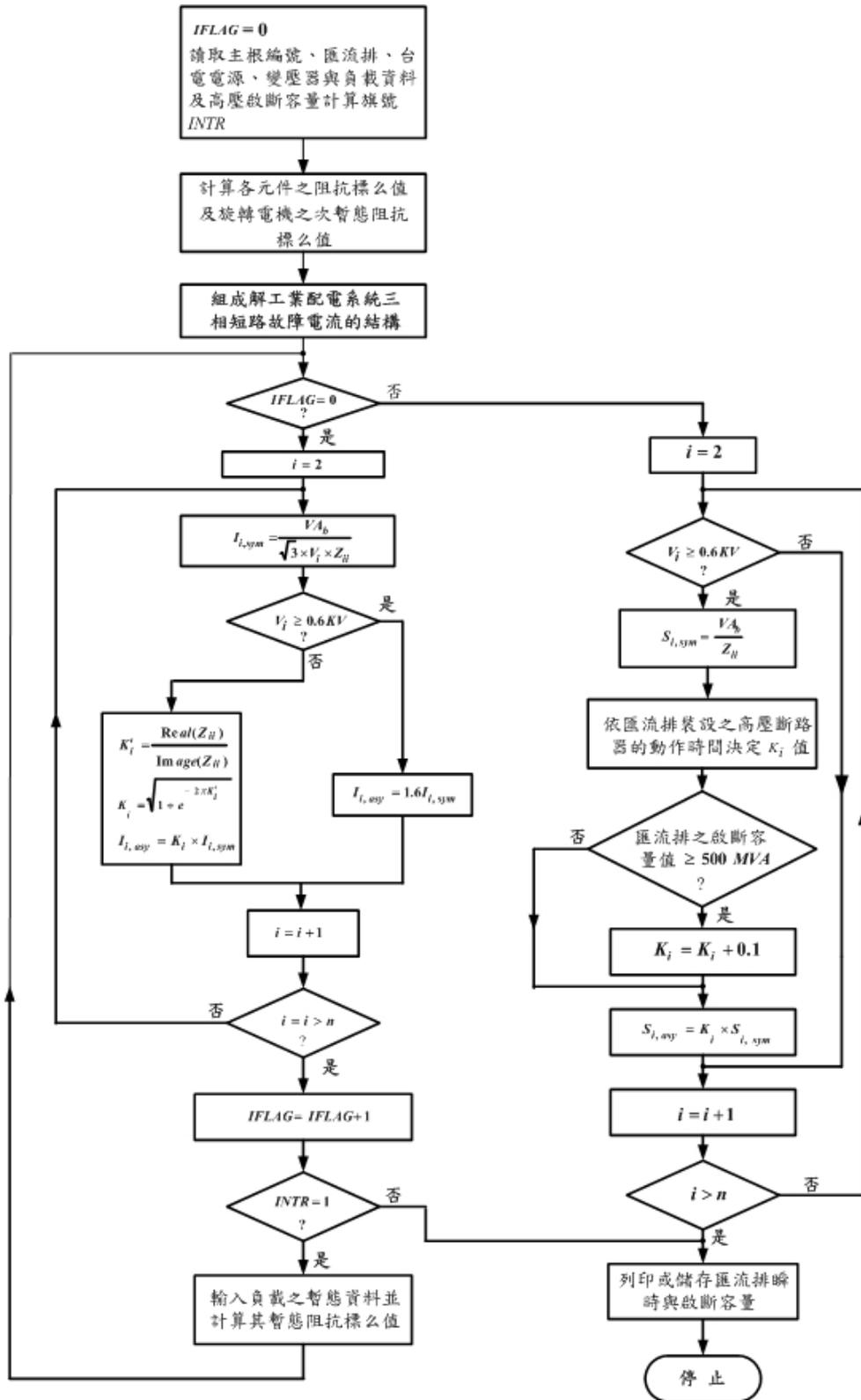


圖 14 計算匯流排瞬時與啟斷容量的流程圖

### 伍、資料庫設計

本節以圖 8 之有 16 個匯流排與 23 個元件的工業配電系統，說明以 Access 建立資料庫及其資料表的情形。

#### 一、Access 資料庫及其資料表之結構圖

圖 15 所示，為以 Access 所建立之資料庫及其資料表。



圖 15 以 Access 所建立之資料庫及其資料表

#### 二、資料表之建立

本節說明輸入與匯流排啟斷容量資料庫，其資料表的設計情形。

(一) 輸入資料庫的資料表：

##### 1. 台電電源資料集

欄位名稱	資料類型
編號	數字
起始匯流排	數字
終止匯流排	數字
責務容量	數字
電抗電阻比	數字
元件性質	數字

編號	起始匯流排	終止匯流排	責務容量	電抗電阻比	元件性質
1	2	1	500	20	1
0	0	0	0	0	0

##### 2. 匯流排電壓資料集

匯流排電壓：資料表	
欄位名稱	資料類型
匯流排編號	數字
電壓	數字

匯流排編號	電壓
1	22.8
2	22.8
3	3.3
4	3.3
5	3.3
6	3.3
7	3.3
8	3.3
9	0.38
10	0.38
11	0.38
12	0.48
13	0.48
14	0.48
15	0.48
16	0.48
0	0

### 3. 變壓器資料集

欄位名稱	資料類型
編號	數字
起始匯流排	數字
終止匯流排	數字
電阻百分比	數字
電抗百分比	數字
容量	數字
元件性質	數字

編號	起始匯流排	終止匯流排	電阻百分比	電抗百分比	容量	元件性質
2	2	3	1	5.9	3	2
8	5	9	1.65	2.5	0.15	2
11	6	12	1.1	5.4	1.5	2
0	0	0	0	0	0	0

### 4. 導線資料集

欄位名稱	資料類型
編號	數字
起始匯流排	數字
終止匯流排	數字
每公里電阻	數字
每公里電抗	數字
長度	數字
並聯導線數目	數字
元件性質	數字

導線：資料表							
編號	起始匯流排	終止匯流排	每公里電阻	每公里電抗	長度	並聯導線數目	元件性質
3	3	4	0.0783	0.0931	35	2	2
4	4	5	0.529	0.108	60	1	2
5	4	6	0.0783	0.0931	30	1	2
6	4	7	0.529	0.108	150	1	2
7	4	8	0.529	0.108	110	1	2
9	9	10	0.535	0.0914	70	1	2
10	9	11	0.343	0.0912	45	1	2
12	12	13	0.128	0.0887	68	1	2
13	12	14	0.0783	0.0875	78	1	2
14	12	15	0.252	0.0911	103	1	2
15	12	16	0.101	0.0878	85	2	2
0	0	0	0	0	0	0	0

5. 負載資料集

負載：資料表	
欄位名稱	資料類型
編號	數字
起始匯流排	數字
終止匯流排	數字
次暫態阻抗	數字
暫態阻抗	數字
電抗電阻比	數字
容量	數字
元件性質	數字

負載：資料表							
編號	起始匯流排	終止匯流排	次暫態阻抗	暫態阻抗	電抗電阻比	容量	元件性質
18	7	1	0.2	999999	13	0.225	3
19	8	1	0.2	999999	15	0.31	3
16	10	1	999999	999999	1	0.04	3
17	11	1	999999	999999	1	0.075	3
20	13	1	0.25	999999	6	0.125	3
21	14	1	0.25	999999	6	0.33	3
22	15	1	0.25	999999	6	0.082	3
23	16	1	0.25	999999	6	0.37	3
0	0	0	0	0	0	0	0

(二) 匯流排放斷容量資料庫：

1. 低壓匯流排瞬時容量資料集

低壓匯流排瞬時容量：資料表	
欄位名稱	資料類型
匯流排編號	數字
匯流排電壓	數字
對稱電流	數字
非對稱係數	數字
非對稱電流	數字

2. 高壓匯流排瞬時容量資料集

高壓匯流排瞬時容量：資料表	
欄位名稱	資料類型
匯流排編號	數字
匯流排電壓	數字
對稱電流	數字
非對稱係數	數字
非對稱電流	數字

3. 高壓匯流排啟斷容量資料集

高壓匯流排啟斷容量：資料表	
欄位名稱	資料類型
匯流排編號	數字
匯流排電壓	數字
對稱啟斷容量	數字
非對稱係數	數字
5週非對稱啟斷容量	數字

4. 故障匯流排電壓資料集

故障匯流排電壓：資料表	
欄位名稱	資料類型
匯流排編號	數字
電壓標么值	數字
電壓值(kV)	數字
相角(角度)	數字

三、資料庫與資料集的設定

利用 Visual Basic6.0 發展工業配電系統三相短路故障電流的分析軟體，有關資料庫與其資料表的設定，所撰寫的程式，如下：

```
Public inputdb As New ADODB.Connection, bsvltb As New ADODB.Recordset, tpsrtb As New
ADODB.Recordset
Public trtb As New ADODB.Recordset, contb As New ADODB.Recordset, loadtb As New
ADODB.Recordset
Public bsintcpdb As New ADODB.Connection, hvlinsectb As New ADODB.Recordset, lvinsectb As
New ADODB.Recordset
Public hvlintrcptb As New ADODB.Recordset, afaltbsvtb As New ADODB.Recordset
'設定各資料庫與資料集
Public Sub set_database_and_table()
```

**'設定輸入資料資料庫與資料集**

```
inputdb.ConnectionString = "Provider=Microsoft.Jet.OLEDB.4.0;Data Source=" & App.Path & "\輸入資料.mdb"  
inputdb.CursorLocation = adUseClient  
inputdb.Open  
bsvltb.Open "匯流排電壓", inputdb, adOpenStatic, adLockOptimistic  
tprtb.Open "台電電源", inputdb, adOpenStatic, adLockOptimistic  
trtb.Open "變壓器", inputdb, adOpenStatic, adLockOptimistic  
contb.Open "導線", inputdb, adOpenStatic, adLockOptimistic  
loadtb.Open "負載", inputdb, adOpenStatic, adLockOptimistic
```

**'設定匯流排啟斷容量資料庫與資料集**

```
bsintcpdb.ConnectionString = "Provider=Microsoft.Jet.OLEDB.4.0;Data Source=" & App.Path & "\匯流排啟斷容量.mdb"  
bsintcpdb.CursorLocation = adUseClient  
bsintcpdb.Open  
hvlinscptb.Open "高壓匯流排瞬時容量", bsintcpdb, adOpenStatic, adLockOptimistic  
lvlinscptb.Open "低壓匯流排瞬時容量", bsintcpdb, adOpenStatic, adLockOptimistic  
hvlintrcptb.Open "高壓匯流排啟斷容量", bsintcpdb, adOpenStatic, adLockOptimistic  
afaltbsvtb.Open "故障匯流排電壓", bsintcpdb, adOpenStatic, adLockOptimistic  
End Sub
```

陸、工業配電系統三相短路故障網頁

工業配電系統三相短路故障網頁，以圖 8 之 16 個匯流排及圖 16 之 22 個匯流排的工業配電系統做為測試，並以 Microsoft Visual Studio .NET 撰寫工業配電系統三相短路故障教學網頁。本節以匯流排阻抗矩陣法說明表單之設計如下：

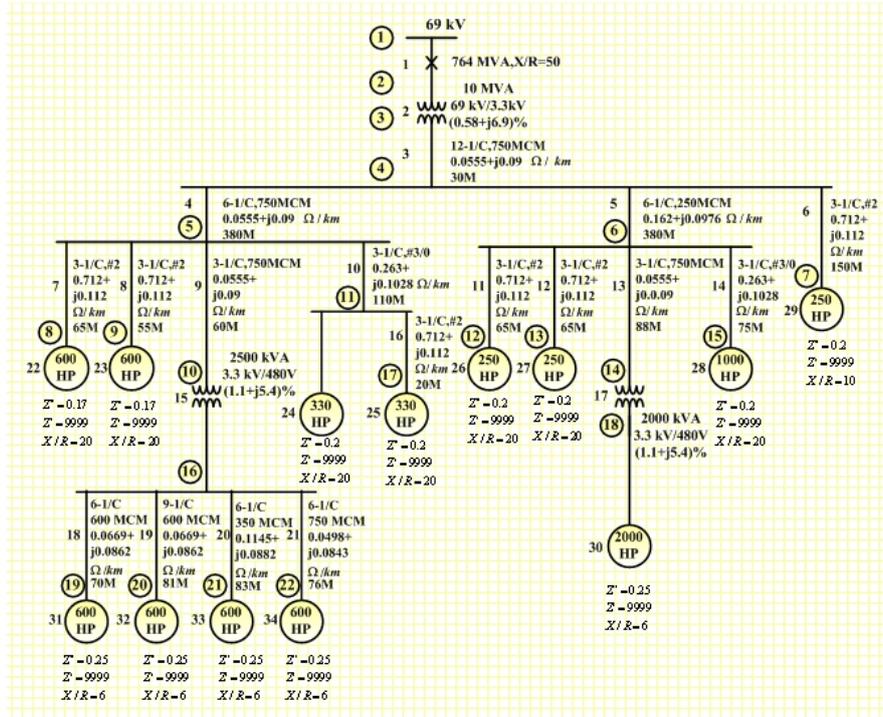


圖 16 22 個匯流排的工業配電系統

一、三相短路故障分析單線圖表單

本表單主要佈置 Image Web 物件 2 個用來顯示標題與單線系統圖； TextBox 物件 1 個用來輸入基值容量； DropDownList 物件 1 個，用來

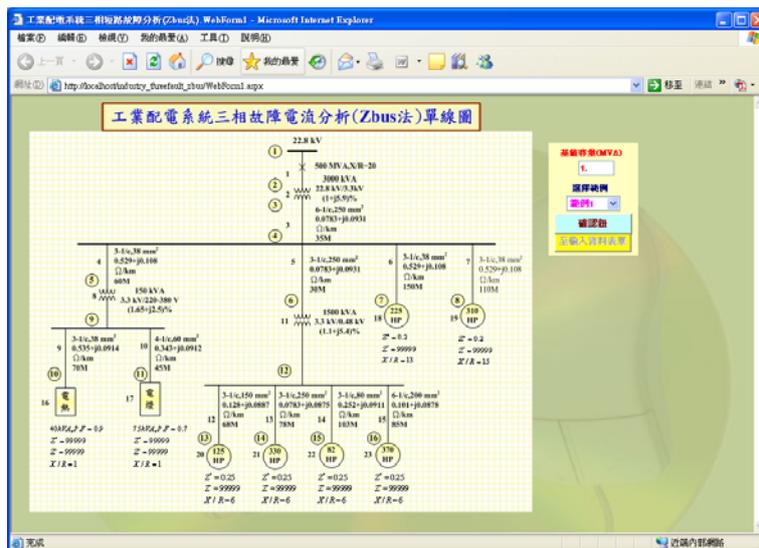


圖 17 負載潮流解析單線圖表單

選取所擬執行的範例。另佈置按鈕物件 2 個，系統資料確認鈕將依據選取範

例，透由網路以載入系統單線圖；另一按鈕用來前往輸入資料表單，上述情形如圖 17 所示。

## 二、輸入資料表單

圖 18 所示，為輸入資料表單，主要佈置有 DataGrid1 控制項 1 個用來顯示由資料庫所讀取的元件資料；另 7 個按鈕物件，其功能如下：

- (一) 匯流排電壓按鈕：用來顯示系統各匯流排電壓。
- (二) 台電電源按鈕：用來顯示台電電源的資料。
- (三) 變壓器按鈕：用來顯示系統各變壓器的資料。
- (四) 導線按鈕：用來顯示系統各導線的資料。
- (五) 負載按鈕：用來顯示系統各負載的資料。
- (六) 處理元件資料鈕：處理匯流排電壓資料集及計算匯流排總數、處理台電電源資料及計算其阻抗標么、處理變壓器資料及計算其阻抗標么、處理導線資料及計算其阻抗標么。
- (七) 至元件處理後表單鈕：至元件運算後資料表單。



圖 18 輸入資料表單

## 三、元件運算後資料表單

圖 19 所示，為元件運算後資料表單，主要佈置有 DataGrid1 控制項 1 個用來顯示處理後的元件資料；另有台電電源鈕、變壓器鈕、導線鈕及負載鈕，用來顯示台電電源、變壓器、導線及負載之資料外亦顯示經由計算的阻抗標么值；此外亦佈置有 5 個按鈕物件，其功能如下：

- (一) 瞬間容量計算鈕：用來組成解工業配電系統三相短路故障的架構，與計算各匯流排的瞬間容量。
- (二) 確認鈕：用來確認 TextBox 物件所輸入之故障匯流排編號。
- (三) 故障時匯流排電壓：用來解系統匯流排發生三相故障時，各匯流排的

電壓。



圖 19 元件運算後資料表單

- (四) 啟斷容量計算鈕：用來計算高壓匯流排的啟斷容量。
- (五) 至輸出資料表單鈕：至三相故障分析結果表單。

四、三相故障分析結果表單

圖 20 所示，為三相故障分析結果表單，主要佈置有 DataGrid1 控制項 1 個用來顯示算結果；另有 6 個按鈕，各按鈕之功能如下：

- (一) 低壓匯流排瞬間容量鈕：用來顯示各低壓匯流排的瞬間容量。
- (二) 高壓匯流排瞬間容量鈕：用來顯示各高壓匯流排的瞬間容量。
- (三) 高壓匯流排放斷容量鈕：用來顯示各高壓匯流排的啟斷容量。

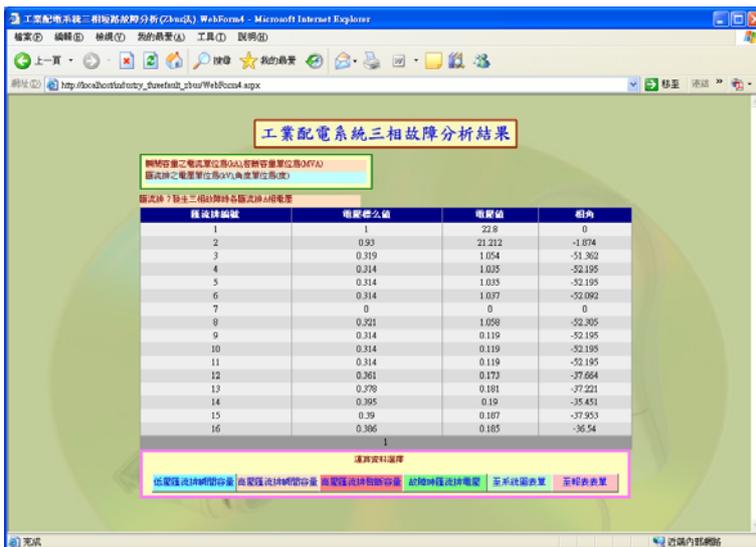


圖 20 三相故障分析結果表單

- (四) 故障時匯流排電壓鈕：用來顯示故障時各匯流排的電壓。

- (五) 至報表表單鈕：至報表製作表單。
- (六) 至系統圖表單鈕：至系統單線圖表單。

#### 四、報表製作表單

圖 21 所示，為報表製作表單，主要佈置有 CrystalReportViewer 1 個，用來結合各 CrystalReport；另有 5 個按鈕，各按鈕之功能如下：

- (一) 低壓匯流排瞬間容量鈕：製作低壓匯流排瞬間容量的報表。
- (二) 高壓匯流排瞬間容量鈕：製作高壓匯流排瞬間容量的報表。
- (三) 高壓匯流排啟斷容量鈕：製作高壓匯流排啟斷容量的報表。
- (四) 故障時匯流排電壓鈕：製作故障時匯流排電壓的報表。
- (五) 至系統單線圖鈕：制系統單線圖表單。

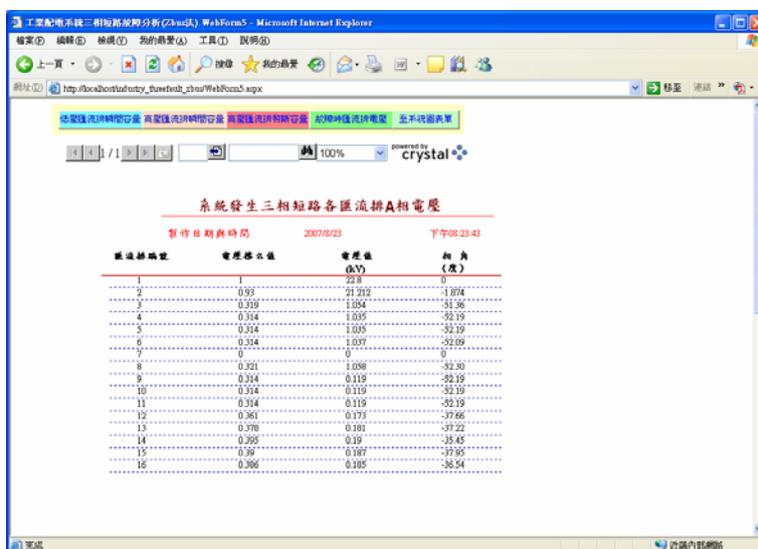


圖 21 報表製作表單

#### 柒、結論

本文利用匯流排阻抗矩陣法、將匯流排導納矩做反矩陣計算，以得到匯流排阻抗矩陣法及組成解故障電流結構等方法解析工業配電系統三相短路故障電流，並利用 Visual Basic 撰寫解析程式。以 16 及 22 個匯流排的工業配電系統做為測試，經比較各匯流排的瞬時與啟斷容量，三種方法的結果皆相同。

組成解故障電流結構的方法與其他兩種方法比較，其有所需記憶體容量少與運算時間快的特點，其缺點為無法解析匯流排間的互阻抗，致當某一匯流排發生故障時，無法分析其他匯流排的電壓。

另以 Microsoft Visual Studio .NET 為工具，對匯流排阻抗矩陣法與組成解故障結構方法，分別成功的發展出可在網路上執行工業配電系統三相短路故障電流運算的教學網頁。

## 捌、參考文獻

- 【1】 A.Gross：Power System Analysis, John Wiley & Sons Inc, 1992.
- 【2】 Hadi Saadat：Power System Analysis McGraw-Hill Inc, 1999.
- 【3】 劉德政：“電腦輔助工業配電設計分析”，國立台灣中山大學電機研究所碩士論文，1983年。
- 【4】 張正山：“Auto CAD 環境下電腦輔助工業配電分析與設計”，電力研討會，1995年
- 【5】 邱天基：“應用預估分枝電流法解輻射形工業配電系統的負載潮流”台電工程月刊，Feb. 1997年，PP.43-62。
- 【6】 劉祥輝，最新配電設計手冊，立三出版社，台北，1992年。
- 【7】 譚旦旭 曾國雄，工業配電，高立圖書，台北，1996年。
- 【8】 董大偉，2004, ASP.NET 程式設計徹底研究, 文魁。
- 【9】 曹祖聖 吳明哲 黃世陽 蔡文龍，2005, Visual Basic.NET 程式設計經典, 松崗。
- 【10】 董大偉，2003, Visual Basic.NET 程式設計-Crystal Report 報表製作, 文魁。