

## 電力系統故障分析互動式網頁

電力故障研究為電力系統分析的重要部分，例如對稱故障之資料可用來選擇或設定相電驛，線對地故障之資料可用來選擇或設定接地電驛。依據對稱分量法，可推導當系統發生各類故障時，匯流排電壓及元件電流之演算法。將常見之電力故障分為三相短路接地故障、線對地故障、相間之線對線故障與雙線對地故障作說明。

### 一、對稱故障之網路模型

系統於匯流排 $k$ 經由阻抗 $Z_f$ 發生三相短路，可由圖1所示電路所等效。圖中之 $Z_{kk}$ 為匯流排 $k$ 之驅動點阻抗(Driving Point Impedance)。

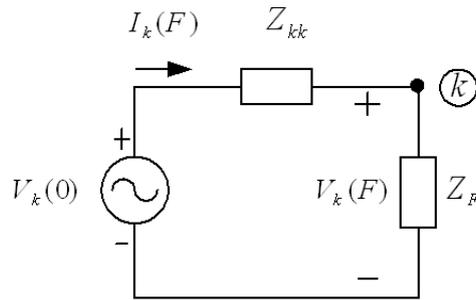


圖 1. 匯流排  $k$  經由阻抗  $Z_f$  發生三相短路接地故障

設  $k$  匯流排故障前的電壓為  $V_k(0)$ ，則故障點之故障電流為  $I_k(F)$ ，則：

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_f} \quad (1)$$

在故障發生時，匯流排  $i$  之電壓  $V_i$  為：

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} I_k(F) \quad (2)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

設連接於匯流排  $i$  與  $j$  間，阻抗為  $z_{ij}$  的線路，則由匯流排  $i$  往匯流排  $j$  的短路電流  $I_{ij}(F)$  為：

$$I_{ij}(F) = \frac{V_i(F) - V_j(F)}{z_{ij}} \quad (3)$$

### 二、線對地故障之網路模型

設電力系統之匯流排  $k$  的  $a$  相經由阻抗  $Z_f$  發生接地，則其網路模型如圖 2 所示。其故障電流之對稱成分為：

$$I_{k,a}^0 = I_{k,a}^1 = I_{k,a}^2 = \frac{V_{k,a}(0)}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + 3Z_f} \quad (4)$$

式中

- $Z_{kk}^0$  : 匯流排  $k$  之零序趨動點阻抗
- $Z_{kk}^1$  : 匯流排  $k$  之正序趨動點阻抗
- $Z_{kk}^2$  : 匯流排  $k$  之負序趨動點阻抗
- $I_{k,a}^0$  : 故障點之零序電流

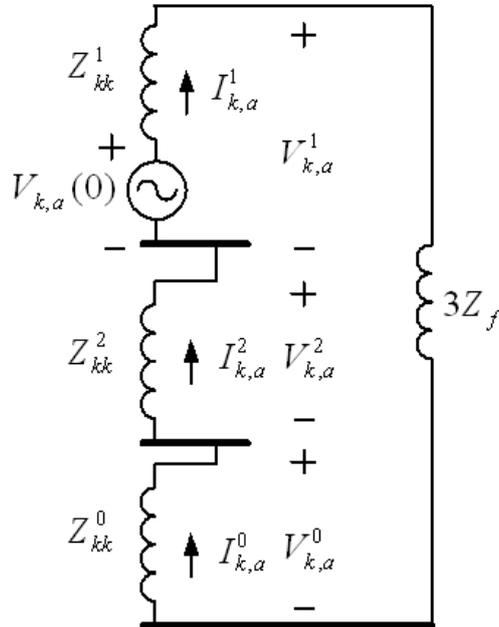


圖 2 匯流排  $k$  之  $a$  相經由阻抗  $Z_f$  發生  $a$  相接地之網路模型

### 三、相間之線對線故障之網路模型

設電力系統之匯流排  $k$  之  $b$  相與  $c$  相經由阻抗  $Z_f$  發生短路，則其網路模型如圖 3 所示。

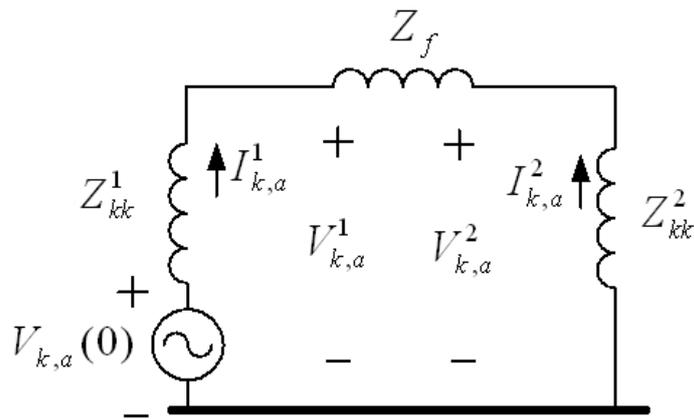


圖 3 匯流排  $k$  之  $b$  相與  $c$  相經由阻抗  $Z_f$  發生短路之網路模型

圖 3 網路模型之故障電流之對稱成分為：

$$I_{k,a}^1 = -I_{k,a}^2 = \frac{V_{k,a}(0)}{Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + Z_f} \quad (5)$$

$$I_{k,a}^0 = 0 \quad (6)$$

#### 四、雙線對地故障之網路模型

設電力系統之匯流排  $k$  之  $b$  相與  $c$  相發生短路且經由阻抗  $Z_f$  接地，則其網路模型如圖 3 所示。其故障電流之對稱成分為：

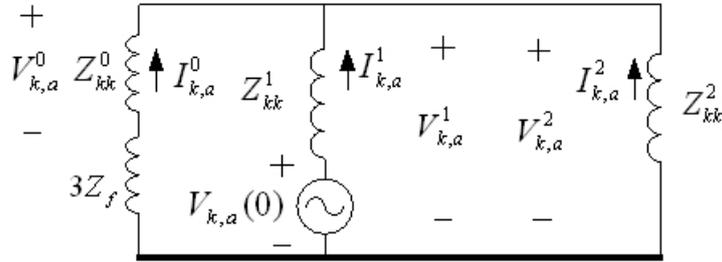


圖 4 匯流排  $k$  之  $b$  相與  $c$  相發生短路且經由阻抗  $Z_f$

圖 4 網路模型之故障電流之對稱成分為：

$$I_{k,a}^1 = \frac{V_{k,a}(0)}{Z_{kk}^1 + \frac{Z_{kk}^2 (Z_{kk}^0 + 3Z_f)}{Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_f}} \quad (7)$$

$$I_{k,a}^2 = -\frac{V_{k,a}(0) - Z_{kk}^1 I_{k,a}^1}{Z_{kk}^2} \quad (8)$$

$$I_{k,a}^0 = -\frac{V_{k,a}(0) - Z_{kk}^1 I_{k,a}^1}{Z_{kk}^0 + 3Z_f} \quad (9)$$

#### 五、非對稱故障之匯流排電壓與元件故障電流計算

##### (一) 匯流排電壓計算

當電力系統之匯流排  $k$  發生非對稱故障時，各匯流排之電壓成分可計算如下：

$$V_{i,a}^0 = -Z_{k,i}^0 I_{k,a}^0 \quad (10)$$

$$V_{i,a}^1 = V_{i,a}^1(0) - Z_{k,i}^1 I_{k,a}^1 \quad (11)$$

$$V_{i,a}^2 = -Z_{k,i}^2 I_{k,a}^2 \quad (12)$$

$$(i=1,2,\dots,n)$$

式中

$n$ ：匯流排總數

各匯流各相之電壓可由(13)式計算之。

$$\begin{bmatrix} V_{i,a} \\ V_{i,b} \\ V_{i,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{i,a}^0 \\ V_{i,a}^1 \\ V_{i,a}^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

## (二) 元件故障電流計算

設電力系統之元件總數為  $nbt$ ，則元件之故障對稱分量電流可由下列諸式計算之。

$$I_i^0 = \frac{V_{i,a}^0(FO) - V_{i,a}^0(TO)}{Z_i^0} \quad (15)$$

$$I_i^1 = \frac{V_{i,a}^1(FO) - V_{i,a}^1(TO)}{Z_i^1} \quad (16)$$

$$I_i^2 = \frac{V_{i,a}^2(FO) - V_{i,a}^2(TO)}{Z_i^2} \quad (17)$$

$(i=1,2,3,\dots,nbt)$

式中

$I_i^0$ 、 $I_i^1$ 、 $I_i^2$ ：分別為元件之正序、負序及零序電流。

$V_{i,a}^0(FO)$ ：元件  $i$  之零序起始匯流排電壓。

$V_{i,a}^0(TO)$ ：元件  $i$  之零序終止匯流排電壓。

$Z_i^0$ 、 $Z_i^1$ 、 $Z_i^2$ ：分別為元件之零序、正序與負序阻抗值。

各元件之電流可由(18)式計算之。

$$\begin{bmatrix} I_{i,a} \\ I_{i,b} \\ I_{i,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i^0 \\ I_i^1 \\ I_i^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

## 六、電力故障分析的例子

以“Power System Analysis”一書(東華圖書公司編譯)之第十章的 5 及 11 個匯流排電力系統，如圖 5 與圖 6 所示，以作為電力故障分析互動式網頁的例子。經由程式運算的結果與課文結果加以比較以印證程式的正確性。

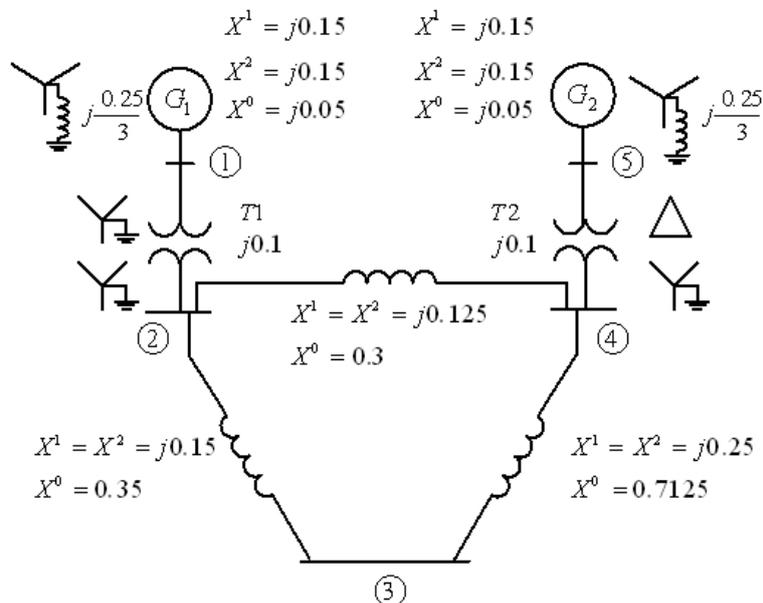


圖 5 有 5 個匯流排的電力系統

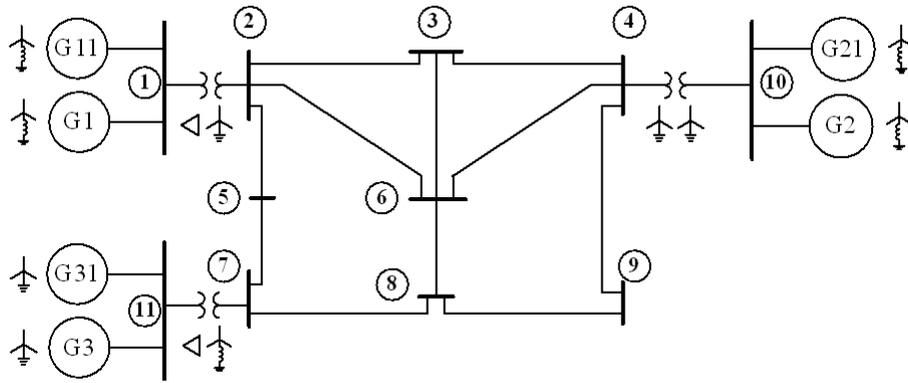


圖 6 有 11 個匯流排的電力系統

5 個匯流排之電力系統其各元件之參數如表 1 所示， 11 個匯流排的電力系統以 100MVA 為基值之各元件資料如表 1 與表 2 所示。

表 1 5 個匯流排之電力系統其各元件之參數

項目	基值(MVA)	電壓額定	$X^1$	$X^2$	$X^0$
$G_1$	100	20kV	0.15	0.15	0.05
$G_2$	100	20kV	0.15	0.15	0.05
$T_1$	100	20/220kV	0.1	0.10	0.10
$T_2$	100	20/220kV	0.1	0.10	0.10
$L_{12}$	100	220kV	0.125	0.125	0.30
$L_{13}$	100	220kV	0.15	0.15	0.35
$L_{23}$	100	220kV	0.25	0.25	0.7125

表 2-1 發電機暫態阻抗(p.u)

項目	發電機所連接匯流排	$X^1$	$X^0$	$X_n$
$G_1$	1	0.4	0.12	0.1
$G_{11}$	1	0.4	0.12	0.1
$G_2$	10	0.3	0.08	0.1
$G_{21}$	10	0.3	0.08	0.1
$G_3$	11	0.5	0.16	0
$G_{31}$	11	0.5	0.16	0

表 2-2 線路與變壓器資料

起始匯流排	終止匯流排	$X^1$ 或 $X^2$	$X^0$
1	2	0.06	0.06
2	3	0.30	0.60
2	5	0.15	0.30
2	6	0.45	0.90
3	4	0.40	0.80
3	6	0.40	0.80
4	6	0.6	1.00
4	9	0.7	1.10
4	10	0.08	0.08
5	7	0.43	0.80
6	8	0.48	0.95
7	8	0.35	0.70
7	11	0.10	0.10
8	9	0.48	0.90

## 七、電力元件性質之設定

設電力系統元件相互間無耦合情形下，做故障電流的分析，必須將故障網路的元件分為分枝(Branch)與鏈(Link)，且分枝或鏈依其加入系統組成匯流排阻抗矩陣(Bus Impedance Matrix)的情形，又可分為兩種狀況，因而電力系統發生故障時，可將元件的性質分為四種。元件的性質必須設定正確，否則計算的結果將發生錯誤。

### (一) 元件性質

解析電力系統故障電流，對於故障之網路，其元件可分為分枝及鏈，且分枝或鏈元件，亦各有兩種性質。將分枝或鏈的性質說明如下：

#### 1. 分枝的性質

- (1) 在新匯流排與參考匯流排間，加入一個元件，本文將此元件性質定為 1，如圖 7 所示。
- (2) 在新匯流排與既有匯流排間，加入一個元件，本文將此元件性質定為 2，如圖 8 所示。

#### 2. 鏈的性質

- (1) 在既有匯流排與參考匯流排間，加入一個元件，本文將此元件性質定為 3，如圖 9 所示。
- (2) 在兩既有匯流排間，加入一個元件，本文將此元件性質定為 4，如圖 10 所示。

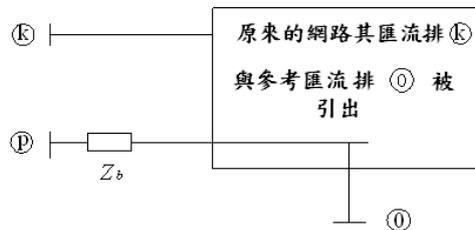


圖 7 性質為 1 的元件

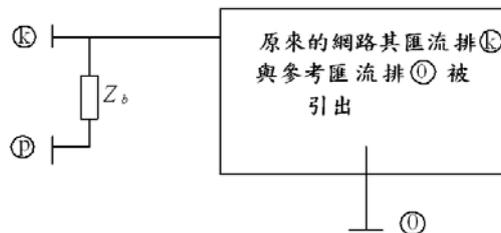


圖 8 性質為 2 的元件

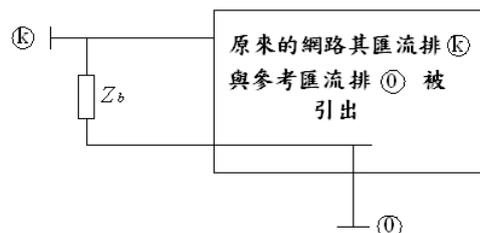


圖 9 性質為 3 的元件

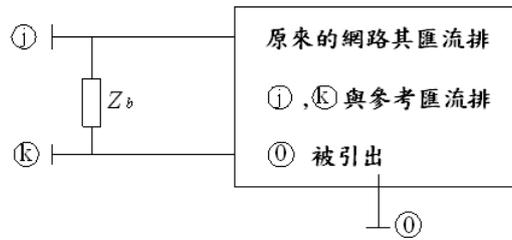


圖 10 性質為 4 的元件

## (二) 設定元件性質之演繹法

設  $nbus$  為電力系統匯流排數目、 $ngbs$  為連接發電機之匯流排數目，經由下述程序，可對各元件作性質設定。

1. 依序且逐次由第 1 元件至第  $nb$  元件，依下述條件對元件做檢視：

- (1) 元件終止匯流排編號=0；
- (2) 元件起始匯流排編號<>所有已加入系統之匯流排編號

若元件符合上列條件，則其性質設定為 1，加入系統旗號設定為 1，將元件起始匯流排編號加入系統。所有元件皆檢視完成，則至步驟 2，否則至步驟(1)。

2. 設  $jp$  與  $jk$  分別為加入系統之匯流排數目，由匯流排 1 至  $jk$ ，逐次做為標的匯流排，並依下述程序尋找編號為  $jp+1$  之匯流排：

(1) 依序且逐次由第 1 元件至第  $nb$  元件，檢視其加入系統旗號，若加入系統旗號不為 1，則做下述的檢測：

- 甲、元件起始匯流排編號=標的匯流排編號
- 乙、元件終止匯流排編號=  $jp+1$

丙、元件終止匯流排編號<>所有已加入系統之匯流排編號

若元件符合上列條件，則其性質設定為 2，加入系統旗號設為 1，將編號為  $jp+1$  之匯流排加入系統，並依(2)的程序，尋找編號為  $jp+2$  之匯流排。

(2) 設定  $p$ =已加入系統之匯流排總數，依序且逐次由第 1 元件至第  $nb$  元件，檢視其加入系統旗號，若加入系統旗號不為 1，則做下述的檢測：

- 甲、元件起始匯流排編號= $p$
- 乙、元件終止匯流排編號= $p+1$

丙、元件終止匯流排編號<>所有已加入系統之匯流排編號

若元件符合上列條件，則其性質設定為 2，加入系統旗號設為 1，將編號為  $p+1$  之匯流排加入系統，若元件未檢視完成，則至程序(2)，否則至程序(3)。

(3) 若於程序(1)之元件皆已檢視完成則至步驟 3，否則至程序(1)。

3. 若系統之匯流排數目= $nbus-ngbs+1$ ，則至步驟 4，否則至步驟 2

4. 依序由第一個元件至第  $nb$  個元件檢視其加入系統旗號，若加入系統旗號不為 1，則做下述的檢測：

- (1) 元件終止匯流排編號=0
- (2) 元件起始匯流排編號=已加入系統之匯流排編號

若元件符合上列條件，則其性質設定為 3，加入系統旗號設定為 1。若所有元

件皆已檢視完成，則至步驟(5)。

5 依序且逐次由第 1 元件至第 nb 元件，檢視其加入系統旗號，若加入系統旗號不為 1，則做下述的檢測：

- (1)、元件之起始匯流排編號=已加入系統之任一個匯流排編號
- (2)、元件之終止匯流排編號=已加入系統之任一個匯流排編號

元件符合上列條件，則將其性質設定為 4，加入系統旗號設定為 1。若所有元件未檢視完成，則至步驟 5，否則完成電力系統故障時之所有元件性質的設定。

### 八、電力故障解析流程圖之規劃

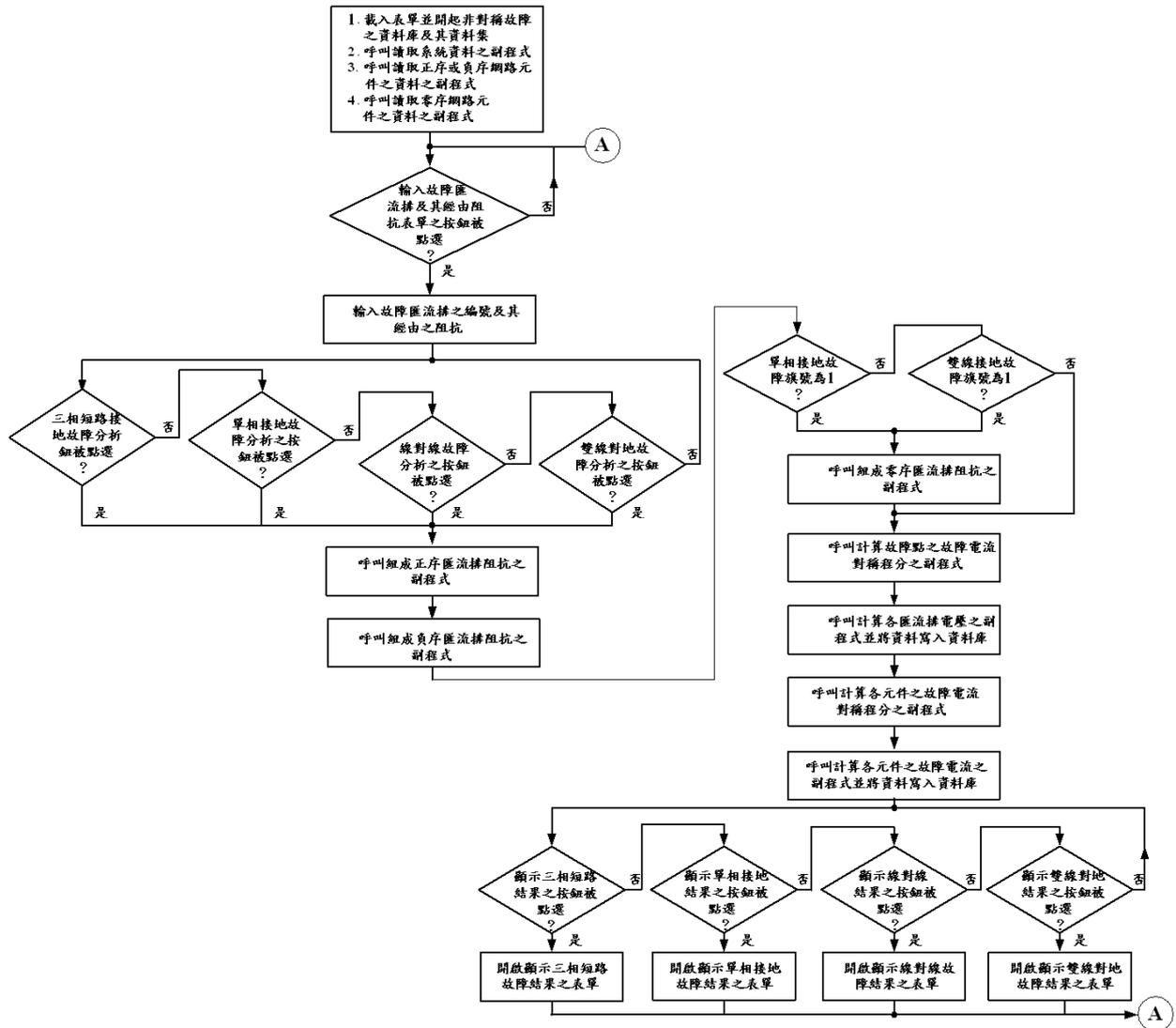


圖 11 解析電力系統故障的流程圖

### 九、電力故障分析網頁

電力故障分析的計算頗為煩瑣，為期增加本系學生對電力系統學習的興趣，以上列系統為基礎，並以 Asp.net 撰寫電力故障分析的網頁程式。互動式網頁的架構如圖 11 至 12 所示，由 IIS 伺服器將網頁提供給瀏覽者且與瀏覽者產生互動。

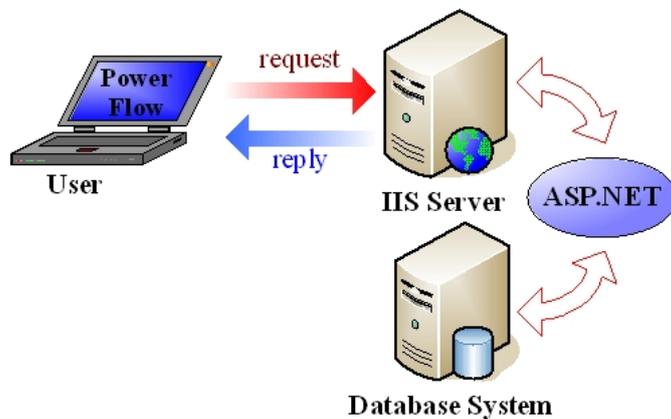


圖 12 ASP.NET架構圖

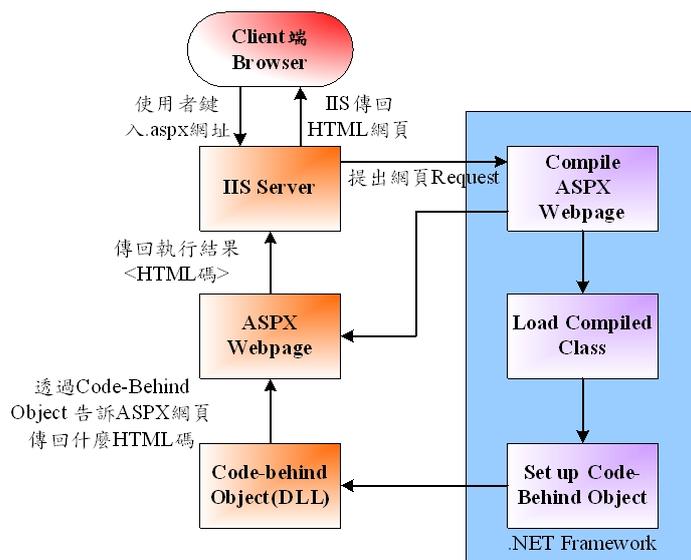


圖 13 ASP.NET中的Web工作流程圖

The screenshot shows a web browser displaying a '電力系統故障電流分析系統圖' (Power System Fault Current Analysis System Diagram). The interface includes a circuit diagram of a '5 Bus Power System' with various impedances and a 'Zero Network Graph'. There are two data tables for inputting fault parameters.

起始匯流排 (Start Bus)	終止匯流排 (End Bus)	電阻 (Resistance)	電抗 (Reactance)
1	0	0	0.15
5	0	0	0.15

起始匯流排 (Start Bus)	終止匯流排 (End Bus)	電阻 (Resistance)	電抗 (Reactance)	接地電抗 (Grounding Reactance)
1	0	0	0.05	0.0833333
5	0	0	0.05	0.0833333

Additional interface elements include a sidebar with buttons for '讀取資料' (Load Data), '讀取正或負序網路資料' (Load Positive or Negative Sequence Network Data), '讀取零序網路資料' (Load Zero Sequence Network Data), and '至運算網頁' (Go to Calculation Page). A legend at the bottom explains the input fields for fault types and sequence data.

圖 14 5 個匯流排電力系統的系統圖與輸入資料



圖 15 5 個匯流排電力系統的電力故障分析結果

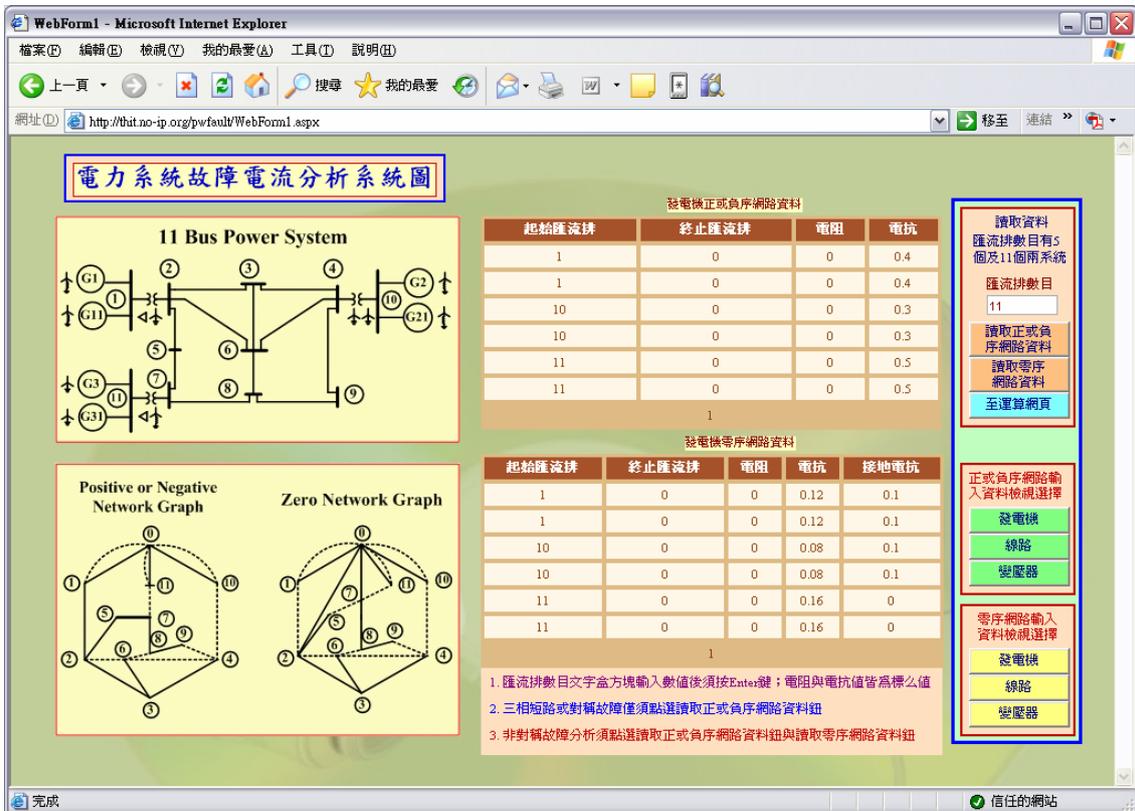


圖 16 11 個匯流排電力系統的系統圖與輸入資料



圖 17 11 個匯流排電力系統的電力故障分析結果

圖 14 與 15 所示，為 5 個匯流排電力系統於匯流排 3 發生單線接地故障，由互動式網頁執行的結果；圖 16 與 17 所示則為 11 個匯流排電力系統於匯流排 8 發生線對線接地故障的結果。

望能藉此電力故障分析的互動式網頁來引發學生對電力系統學習興趣、培養其程式撰寫能力與創造潛能及增添本系的教學特色。

## 十、參考文獻

1. 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。
2. 陳在相：計算機輔助工業配電設計，國立台灣工業技術學院碩士論文，1982 年。
3. 邱天基：“以母線倒複數功率矩陣為基礎解工業配電系統母線瞬時即啟斷容量的方法”，台電工程月刊，第 580 期，1996 年 12 月，pp.60-74.
4. 邱天基：“視窗化工業配電系三相短路故障電流分析”，2003 年光電半導體技術應用研討會暨論文發表會，pp.10-17.
5. WD. Stevenson, Jr： Elements of Power System Analysis, Mcgraw-Hill Inc, N.Y. 1983.
6. CA. Gross： Power System Analysis, John Wiley & Sons Inc, 1992.
7. Hadi Saadat： Power System Analysis Mcgraw-Hill Inc, N.Y. 1999.
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。
11. 張靜怡，2005 年，Dreamweaver MX2004 中文版白皮書，文魁。