

水力發電系統壽命分佈及故障診斷分析

Hydro-Power Generator System Failure Processes Analysis and Fault Diagnosis

鍾朝恭 *

Chaur-Gong Jong

國立台灣科技大學營建工程研究所

博士候選人

呂守陞 **

Sou-Sen Leu

國立台灣科技大學營建工程研究所

教授

摘要

目前水庫各項設施故障診斷多以時間為基礎考量，並配合檢核表進行評估，亦即依系統設備可使用壽命，直接以週、月、季或年作為週期進行檢查維修，由於該等維修方式未考慮到系統故障型態及構件在不同環境及操作下之脆弱度，因此其經濟成本與安全性受到工程人員質疑，無法達到客觀性判斷、降低故障機率、經濟快速修復及預知維修之目標。有鑑於此，本研究首先利用韋伯分佈（Weibull distribution）求其壽命及相關可靠性函數，同時藉由具有實際經驗之專家學者建構區分為正常、故障小於8小時及大於8小時等多狀態失誤樹（multi-state Fault Tree）架構，接著利用多狀態失誤樹分析（Fault Tree Analysis, FTA）進行系統各事件故障診斷與評估，並以石門水庫供應民生及農業用水之三部水力發電系統作為分析對象，經比對多狀態失誤樹分析計算頂事件故障率與歷史統計相符，且與韋伯分析結果故障率趨勢相同，顯示本研究所建構完成多狀態失誤樹具有可用性與合理性，適合日後作為水力發電系統脆弱環節分析模型，以作到預防維護及減少故障發生機率之需求。

關鍵詞：檢核表、韋伯分佈、多狀態失誤樹、失誤樹分析

* 台中市霧峰區吉峰里中正路 1340-6 號 Tel:04-23320231 ; 0912-255603

Abstract

In a general way, fault diagnosis of hydro-power generator systems relies mostly on check-list evaluation and based on time period. The results and qualities of evaluation are limited by experience and ability of the evaluators, which may not achieve the goal of systematic assessment in a consistent manner. In order to overcome the limitation of the traditional approach, this research develops a fault diagnosis and evaluation for hydro-power generator system by utilizing multi-state Fault-Tree Analysis (FTA) technique, in conjunction with Weibull-distribution which is used to model both increasing and decreasing failure rates. The proposed system has been used to analyze and verify against three hydro-power generator systems at Shihmen reservoir currently in operation. It was found that the failure pattern of three systems all follows Weibull-distribution. Furthermore, the fault trend of the proposed FTA analysis is consistent to that from historical data analysis and Weibull Distribution. This indicates that multi-state Fault-Tree (FT) is reasonable and practical to the fault diagnosis of the hydro-power generator systems. Based upon the analysis of FTA by inputting prior information of the hydro-power systems, the probabilities of fault occurrences and significant factors are effectively computed and analyzed. Based upon the output of FTA, more effective preventive maintenance strategies can be established.

Key words: check-list, Weibull Distribution , multi-state Fault-Tree, Fault-Tree Analysis

一、前言

各項公共工程設施隨著時間產生老劣化現象，整體服務功能因而下降，考量營運安全與既有服務功能維持，同時避免或減少故障發生機率進而延長使用壽命，成為目前各項公共工程永續經營之主要方向〔1〕。水庫各項主要設施也不例外面臨前述相同問題，其中水力發電系統涉及防洪運轉、排砂、發電、民生及農業用水，因此為水庫安全營運、重點檢查維修與延壽主要設施之一。水力發電是一種結合土木、機械與電機領域的複雜系統，由於台灣降雨量豐沛，所蘊藏水利發電資源約為 390 萬 KW，亦即每平方公里達 105KW，在世界上僅次於瑞士，為台灣重要天然資源；水力發電係利用水的動能及位能來推動水利發電機轉換成電力輸出，依其水源運用方式可分為川流式、調整池式、水庫式及抽蓄式發電廠等四種發電形式。

台灣第一部水力發電機為龜山電廠建於 1904 年，其它重要水利發電廠均於 1904-1945 年陸續完成，如新店溪、花蓮溪、高屏溪與大甲溪系統等水力發電廠，當時發電量為 22 萬 KW 約佔總發電量 93% 以上。光復初期（1946-1950）則以修復盟軍轟炸之水力發電廠為主要任務，包括日月潭水力發電廠由 3 萬 KW 恢復至 21.3 萬 KW，並將部分攔河堰提高由川流式改為調整池式水力發電，如烏來、立霧溪與天輪電廠等，同時繼續開發或延續日治時代之計畫，如花蓮木瓜溪瀧澗、大甲溪德基、青山、新天輪、馬鞍及明湖明潭抽蓄水力發電廠等，此時水力發電開發達到尖峰時期。目前台灣年平均水力發電量約為 77 億度佔總發電量 4 % 左右，雖所佔比例不大，惟水力發電為無污染的天然資源（為綠能之一），且停機後啟動發電所需時間較短，因此具有災害無電力時全黑啟動功能，如 921 大地震北部地區在無電力情況下，即是以本研究對象石門 1、2 水力發電系統啟動其他形式發電系統（如火力或核能發電）來供應北部地區災後用電，因此水力發電為綠能兼具緊急救援功能，實為水庫重要設施。

經統計水力發電系統每年平均維修費用占水庫全年營管經費百分之五十以上，由於政府年度預算有限無法全面換新或拆除重作，同時又必須維持現有各項功能，為現今水庫安全營運管理所需面對重要課題。目前國內各水力發電系統係以所訂操作、運轉維護、檢監測手冊與作業標準（Operation and Maintenance Standard, OMS）作為安全評估、維修與檢查標準之依據。其大部分均以時間、經濟及設備等三種狀況作為維修策略，一般以時間為基礎考量，亦即依系統設備、組件特性、材料可使用壽命及操作環境等，直接以週、月、季或年作為週期進行檢查維修〔2,3〕，諸如水輪機內部為一年，外部則為六個月，冷卻設備則至少一年一次等，接著依據這些週期性檢查所發現缺失項目進行維修或更換。由於該等維修方式未考慮到系統故障型態及構件在不同環境及操作下之脆弱度，致無法達到事前預防維修及事後減少損失之需求，且所作維修模式亦可能造成人力及各項資源浪費，是為目前系統檢查維修的盲點。

考量環境、操作與材料等不同條件下，水力發電系統有其壽命分佈、故障週期與最佳維修策略，因此在未發現設施有任何異狀前，可利用過去歷史所記錄之故障、維修及運轉等資料進行統計分析，同時配合目前實施之監測系統、安全評估與維修機制，並以韋伯分佈（Weibull-distribution）分析其壽命、故障模式、可靠度及安全性，進而以多狀態失誤樹分析(FTA)來診斷系統或組件脆弱環節，接著針對該等脆弱環節加強檢查與維修，並研擬最經濟有效及最短時間之維修補強策略，以提高系統安全性及確保正常運作，是為本研究之主要方式與動機。

二、文獻回顧

各種系統或產品由於所處環境、條件、材質及操作模式不同，其故障性質與分佈亦有所不同，水利發電系統亦不例外。因此若能利用過去歷史維修資料加以統計分析或通過產品壽命試驗，即可訂定系統或產品的壽命分佈、故障機率函數及可靠度。可靠性常用的分佈函數有二項分佈、波松分佈、指數分佈、常態分佈、常態對數分佈及韋伯分佈。前兩項

為離散型分佈，其餘為連續型分佈；其中韋伯分佈在可靠性工程被廣泛運用於故障率遞增或遞減之系統分析，適用於各種電子零件及設備之可靠性分析[6, 7, 8, 9]，同時可用於處理大部分機械零件，尤其是機電類產品疲勞磨損壽命問題，另外韋伯分佈可以利用機率值推斷分佈參數，也廣泛應用於壽命試驗的數據處理[15, 16, 18, 20, 21]。

世界各國於 1990 年起開始將故障診斷評估納入水庫安全管理項目，其中當然包含水力發電系統，各項診斷評估方法分為定性、半定量及定量分析等三種，在定性分析方面，美國聯邦能源管理委員會(FERC)推動潛勢失效模式分析(Potential Failure Mode Analysis)，其採核心團隊座談法進行評估[12]；其次為工程界廣泛採用的失效模式影響與關鍵性分析(FMECA)。在半定量分析方面，則係針對可能發生後果之嚴重性確立分類等級並給予同一標準數值，接著再進行量化分析。至於定量分析可分為專家判斷、統計推論、可靠度分析及模式求解，其中可靠度分析則以機率密度函數推估系統在安全邊界之需求與容量的機率分佈；本研究針對台灣水力發電系統，運用機率分析方法結合失誤樹分析(FTA)進行可靠度分析。

失誤樹分析(FTA)可作為定性與定量分析[15, 16, 17, 18, 19, 20]，是一種圖形演繹法，係將事件假設成正常「0」及故障「1」兩種狀態，且事件間主要利用「或門(OR gate)」、「與門(AND gate)」二種邏輯門連結其關係，並以系統不期望發生之事件為頂事件，逐層向下找出各中間及底事件，接著再利用「或門」、「與門」將各事件連接成倒立樹狀圖，透過邏輯推演以定性或定量來解析系統脆弱環節，提供現在或未來設計、更新改善及維修參考。

失誤樹分析(FTA)為系統或機械可靠性和故障診斷決策模型重要分析工具，隨著計算機技術及分析軟體成熟發展，目前已廣泛應用於各種大型系統故障分析與風險評估[15, 17, 18, 20]；1962 年成功應用於導彈發射控制系統的可靠性分析，1965 美國波音公司應用於電腦方面分析，1972 年日本應用於製紙工廠抄紙機系統分析，1974 年美國原子能

委員會應用於核電站安全評估，李文瑞(1984)發表失誤樹分析技術在系統可靠度之應用，方鈞(1989)應用於核三廠主飼水系統設備故障分析，美國 Hadipriono(1992)利用失誤樹分析探討建築墜落事件原因，Krasich et al.(2000)針對產品設計階段進行系統軟硬體功能評估分析，林正宗(2003)分析世界各地發生油槽與管線意外事故及危害原因，江旺宗(2006)分析墜落意外傷亡事件，林俊甫等(2007)三人探討飛彈彈頭失效爆炸發生原因。由於傳統失誤樹分析(FTA)係假設事件狀態為兩態，此點與現實事件具有多態性有所差距，因此 Graves et al.(2007)提出多狀態故障樹計算方法(multi-state fault tree quantification)，以克服傳統失誤樹分析只有兩態的侷限性[22]。

三、研究方法與流程

本研究首先利用韋伯分佈求其壽命分佈、可靠度函數 $R(t)$ 、累積故障分佈函數 $F(t)$ 、機率密度函數 $f(t)$ 、平均故障前時間(平均壽命, Mean Time To Failure, MTTF)及故障率函數 $\lambda(t)$ 等函數，接著配合專家經驗建立多狀態失誤樹(multi-state Fault Tree)來分析診斷故障或脆弱組件，其研究流程如圖一。最後再以現有石門水庫三部水力發電系統為例，將多狀態失誤樹分析計算結果與歷史統計資料及韋伯分佈等加以比對驗證，藉以說明多狀態失誤樹作為系統故障分析之合理性，以下僅就韋伯分佈及多狀態失誤樹分析演算過程加以說明。

3.1 韋伯分佈及卡方檢定

3.1.1 韋伯分佈

韋伯分佈含有二個或三個分佈參數，其中二個分佈參數為形狀參數 β (Shape Parameter) 及尺度參數 θ (Scale Parameter or Characteristic Life)，再加上位置參數 γ (Location Parameter) 則為三參數，如產品或系統開始使用時就有故障發生機率，則 γ 為零不予考慮，此時即為二參數韋伯分佈。 $\beta=1$ 時機率密度函數為指數分佈，故障率為常

數，屬浴缸曲線偶發故障期。 $\beta > 1$ 為故障率增加型的失效模式，屬浴缸曲線磨耗故障期。 $\beta < 1$ 為故障率減少型之失效模式，屬浴缸曲線初期故障期。 $\beta = 3.2 \sim 3.7$ 時機率密度函數為對稱常態分佈， $\beta = 2$ 時機率密度函數是一種特殊的韋伯分佈，稱為瑞利分佈。由於韋伯分佈適用範圍廣泛，能用於故障型式增加或減少之失效時間分佈，常作為機械及電子產品的通用壽命分佈。由於水力發電系統開始運轉時即有故障發生之機率，因此本研究採用二參數韋伯分佈。

韋伯分佈故障率函數 $\lambda(t) = at^b$ ， $\lambda(t)$ 可表示為：

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad \theta > 0, \beta > 0, t \geq 0 \quad (1)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad f(t) = \frac{-dR(t)}{dt} = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (2)$$

$$MTTF = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3)$$

$\Gamma(x)$ 為 Gamma function；設計壽命 $t_R = \theta(-\ln R)^{1/\beta}$ 。

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (4)$$

雙邊取自然對數 $-\ln(1 - F(t)) = \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$

雙邊再取自然對數 $\ln \ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] = \beta \ln t - \beta \ln \theta \quad (5)$

其中 $F(t_i) = (i - 0.3)/(N + 0.4)$ 為第 i 次產品故障之位序(media rank at i -th failure)。

若設 $y = bx + a$ $y_i = \ln \ln \left[\frac{1}{1 - F(t_i)} \right]$ $x_i = \ln t_i$ $a = -\beta \ln \theta \quad (6)$

利用最小二乘法計算迴歸直線 $y_i = bx_i + a$ ， $\beta = b$ ， a 、 b 已知可求 θ 值及相關函數。

3.1.2 卡方檢定

本研究利用卡方檢定(Chi-Square test)觀察次數與虛無假設期望次數的接近程度，以檢定水力發電系統是否符合原假設之壽命分佈為韋伯分佈，計算方式說明如下：

配合度檢定統計量表示如下：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \sim \chi_{k-1-m}^2 \quad (7)$$

其中 O_i 為第 i 組的樣本觀察次數； E_i 為期望次數（或理論次數）， k 為組數，自由度為 $k-1-m$ ， m 為估計的參數個數。

當 O_i 與 E_i 相差很大時，卡方值變大，表示樣本資料不足以支持虛無假設 H_0 （某特定分配的假設），應拒絕 H_0 ，在選定顯著水準 α 下，採右尾檢定（配合度的卡方檢定為右尾檢定），決策法則為：

$$(1) \text{ 若 } \chi^2 > \chi_{k-1-m, \alpha}^2, \text{ 則拒絕 } H_0. \quad (2) \text{ 若 } \chi^2 \leq \chi_{k-1-m, \alpha}^2, \text{ 則接受 } H_0.$$

檢定統計量的 χ^2 值大於臨界值 $\chi_{k-1-m, \alpha}^2$ 時，拒絕 H_0 ，表示（驗證）母體不為某一特定分配，當 χ^2 值小於臨界值 $\chi_{k-1-m, \alpha}^2$ 時，接受 H_0 ，則驗證母體為某一分配。

3.2 失誤樹分析 (FTA)

首先選定頂事件、中間事件、底事件及基本事件，其中頂事件為系統不希望發生的事件，該事件位於失誤樹頂端為邏輯門的最終輸出事件；中間事件為除了頂事件外的其他結果事件，它位於頂事件與底事件之間，為某個邏輯門的輸出事件，亦為另一個邏輯門的輸入事件；而底事件則為失誤樹底部的事件，為某個邏輯門的輸入事件而非輸出事件；至基本事件則為已經查明或尚未查明但必須進一步查明其發生原因的底事件，如原件故障或人為失誤等。選定各事件後接著將各事件區分成正常「0」、故障小於8小時「1」與故障大於8小時「2」等三種狀態，進而建立多狀態失誤樹(FT)架構，接著將各基本事件歷年

累計故障時間除以總發電時間，其商數即為該基本事件故障機率，亦即所謂的事前機率。如邏輯閘為「與門(AND gate)」時，表示下一層事件皆故障時，上一層事件才會故障，其輸出狀態取最小值，亦即 $P(C_2) = P(A_2 \cap B_2) = P(A_2) \times P(B_2)$ 。如為「或門(OR gate)」時，則表示下一層事件任何一個事件故障時，上一層事件就會故障，因此輸出狀態取最大值，

其公式如下：

$$P(C_2) = P(A_2 \cup B_2) = P(A_2) + P(B_2) - P(A_2 \cap B_2)$$

$$= 1 - [(1 - P(A_2)) \cdot (1 - P(B_2))] = 1 - P(A_1) \cdot P(B_1)$$

首先將每個狀態機率值相乘，並依前述原則於相同狀態下將機率相乘值分別相加，接著由下而上逐層往上推求頂事件及各中間事件於不同狀態下故障發生機率，此即為系統可靠度或故障率。

本研究經現場與專家研商討論，水力發電系統各層間採用「或門(OR gate)」作為邏輯關係可符合實際需求，因此系統各事件輸出狀態取最大值，其故障樹的結構函數為

$$\Phi(x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i)$$

其中 x_i 為底層基本事件發生的機率，則頂層事件不可靠度為

$$F_s(t) = E[\Phi(x)]。$$

四、個案研究

4.1 背景說明

石門水庫位於台灣北部地區，1963年5月蓄水營運迄今已達47年，具有灌溉、發電、給水、防洪及觀光等五大效益。其中石門1、2水力發電系統位於水庫右岸下游，各裝置45,000 kw水輪機1部，每年平均發電量分別為1.1億度。義興水力發電系統則位於水庫上游12 km，裝置45,000 kw水輪機1部，每年平均發電量為1.8億度。上述三座發電系統所使用水輪機均為軸流型反擊水輪機，又稱為法蘭西斯輪機(Francis turbine)，為現代最常見的水輪機，本研究係以該三部水力發電系統作為壽命分佈及故障診斷分析對象。

4.2 系統壽命分布

首先蒐集石門一、二號(1965~2008)及義興(1990~2008)等三部發電系統歷史故障及運轉時間，並以二參數韋伯分佈探討壽命，同時利用卡方加以檢定適合度，以下分別針對計算結果加以說明。

4.2.1 石門一號系統

依前述方法求得最佳直線 $y = bx + a = 1.6373x - 14.24$ ，相關係數 $R^2 = 0.9367$ ，顯示相關性良好，代入求得形狀參數 $\beta = 1.6373$ ，尺度參數 $\theta = 5986$ 小時， $\beta = 1.6373 < 2$ 為故障率遞增磨耗故障期，各函數計算如下：

$$(1) \text{ 累積故障分佈函數 } F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{5986}\right)^{1.6373}}。 \quad (2) \text{ 可靠度函數 } R(t) = e^{-\left(\frac{t}{5986}\right)^{1.6373}}。$$

$$(3) \text{ 機率密度函數 } f(t) = \frac{1.6373}{5986} \left(\frac{t}{5986}\right)^{0.6373} e^{-\left(\frac{t}{5986}\right)^{1.6373}}。$$

$$(4) \text{ 故障機率函數 } \lambda(t) = \frac{1.6373}{5986} \left(\frac{t}{5986}\right)^{0.6373}。$$

$$(5) \text{ 平均故障前時間 } MTF = 5986 \Gamma\left(1 + \frac{1}{1.6373}\right) = 5358 \text{ 小時}。$$

$$(6) \text{ 設計壽命 } t_R = 5986(-\ln R)^{\frac{1}{1.6373}} = 5986(-\ln R)^{0.61}，\text{可靠度 } 0.99 \text{ 為 B1 壽命，} t_R = 360 \text{ 小時；可靠度 } 0.5 \text{ 為中值壽命，} t_R = 4,787 \text{ 小時}。$$

利用卡方檢定配合度，由經驗法則(rule of thumb)求其區間 $K = 1 + 3.3 \log 60 \doteq 7$ ，運轉時間以小時為單位，區分為 0~1,700、1,700~3,400、3,400~5,100、5,100~6,800、6,800~8,500、8,500~10,200、大於 10,200 小時等 7 個區間；自由度 $F = 7 - 1 - 2 = 4$ ，信賴區間 95%，查表得臨界值為 9.5，求出配合度檢定統計量 $\chi^2 = 9.083 < 9.5$ ，亦即接受服從韋伯分佈之假設。

4.2.2 石門二號系統

同前求得 $y = 2.3732x - 20.535$ ， $R^2 = 0.9455$ ， $\beta = 2.3732$ ， $\theta = 5727$ 小時， $\beta > 2$ 為故

障率遞增磨耗故障期，各函數計算如下：

$$(1) F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{5727}\right)^{2.3732}} \circ (2) R(t) = e^{-\left(\frac{t}{5727}\right)^{2.3732}} \circ (3) f(t) = \frac{2.3732}{5727} \left(\frac{t}{5727}\right)^{1.3732} e^{-\left(\frac{t}{5727}\right)^{2.3732}} \circ$$

$$(4) \lambda(t) = \frac{2.3732}{5727} \left(\frac{t}{5727}\right)^{1.3732} \circ (5) MTTF = 5727 \Gamma\left(1 + \frac{1}{2.3732}\right) = 5248 \text{ 小時} \circ$$

$$(6) t_R = 5727(-\ln R)^{0.421}，B1 \text{ 壽命 } t_R = 825 \text{ 小時}；\text{中值壽命 } t_R = 4,908 \text{ 小時} \circ$$

利用卡方檢定配合度， $K = 1 + 3.3 \log 64 \doteq 7$ ，區分為 0~2,300、2,300~4,600、4,600~6,900、6,900~9,200、9,200~11,500、11,500~13,800、大於 13,800 小時等 7 個區間； $F = 7 - 1 - 2 = 4$ ，信賴區間 95%，臨界值 9.5，配合度檢定統計量 $\chi^2 = 7.256 < 9.5$ ，亦即接受服從韋伯分佈之假設。

4.2.3 義興系統

同前求得 $y = bx + a = 4.8848x - 41.716$ ， $\beta = 4.8848$ ， $\theta = 5115$ 小時， $\beta > 3$ 機率密度

函數為對稱常態分佈，各函數計算如下：

$$(1) F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{5115}\right)^{4.8848}} \circ (2) R(t) = e^{-\left(\frac{t}{5115}\right)^{4.8848}} \circ (3) f(t) = \frac{4.8848}{5115} \left(\frac{t}{5115}\right)^{3.8848} e^{-\left(\frac{t}{5115}\right)^{4.8848}} \circ$$

$$(4) \lambda(t) = \frac{4.8848}{5115} \left(\frac{t}{5115}\right)^{3.8848} \circ (5) MTTF = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 4692 \text{ 小時} \circ$$

$$(6) t_R = 5115(-\ln R)^{0.205}，B1 \text{ 壽命 } t_R = 1995 \text{ 小時}；\text{中值壽命 } t_R = 4,745 \text{ 小時} \circ$$

利用卡方檢定配合度， $K = 1 + 3.3 \log 33 \doteq 7$ ，區分為 0~1,200、1,200~2,400、2,400~3,600、3,600~4,800、4,800~6,000、6,000~7,200、大於 7,200 小時等 7 個區間；

$F = 7 - 1 - 2 = 4$ ，信賴區間 95%，臨界值 9.5，配合度檢定統計量 $\chi^2 = 9.317 < 9.5$ ，亦即接受服從韋伯分佈之假設。

前述所求得三部系統分佈參數、相關函數及曲線分別如表 1~ 2 及圖 2~5，其中圖 2 為歷史發電維修資料縱橫座標取自然對數後所迴歸之三條直線圖，由圖中可知其相關性良好；圖 3 為系統在某個時間之故障率曲線，顯示隨著時間增加系統故障率亦相對增加，且發電近 4, 000 小時後其故障率明顯上升，圖 4 為系統隨著發電時間增加所對應之累計故障率曲線，由圖中可知發電約 5, 000 小時後其累計故障率趨近於 50%，相對的其可靠度也下降到 50%，圖 5 則為系統機率密度函數曲線，由圖中顯示義興系統為對稱常態分布，而石門一、二號系統則有偏移不對稱情形。綜上，由前述圖表得知三部系統形狀參數 β 均大於 1，屬故障率遞增之失效模式，為浴缸曲線磨耗故障期，必須加強檢查、監測與維修；本研究接著利用失誤樹 (FTA) 找出系統脆弱環節，以為未來檢修的參考。

4.3 系統失誤樹分析 (FTA)

本研究首先選定系統無法發電為頂事件，接著透過專家腦力激盪與系統評估找出 35 個中間事件及 84 個底事件；經現場實際與專家討論及檢視過去故障及運轉紀錄，發現任何一個事件故障時，均會造成系統無法發電，因此均以「或門(OR gate)」作為各事件間邏輯關聯；經審慎討論後所建立之多狀態失誤樹 (FT) 架構如圖 6~9，此失誤樹將作為機率分析計算之基本模型。

多狀態失誤樹 (FT) 建構完成後，再將石門 1、2 號 (1991-2008) 及義興 (1991-2008) 等三部系統故障及發電時間加以整理統計，其中 2004 年至 2007 年 9 月間因艾莉颱風造成嚴重災損時間不予列入，則總分析時間分別為 126, 312 及 131, 400 小時。本研究係以小時為分析單位，並以三種狀態演算，其狀態分類係參考失效模式與效應分析 (FMEA) 的故

障發生率評點標準（如表 3），採總分析時間之 1/15,000（約 8 小時）作為三種狀態分類時間點。經與現場專家討論符合每日工作 8 小時作業需求，接著將基本事件歷年故障時間加以累計後除以總分析時間，所得商數即為失誤樹各基本事件事前故障機率。由於各事件均以「或門(OR gate)」作為邏輯關聯，依前述輸出狀態取最大值，依此原則由下往上推求計算，即可求得頂事件及各中間事件在前述三種狀態下機率值（如表 4）；其中狀態「1」與「2」機率值相加即為系統故障機率，由表可知石門 1 號故障率為 7.55%，石門 2 號為 6.69%，義興則為 4.30%。

依據求得三部水利發電系統各事件故障機率分別由高至低加以排序，故障率最高排序第一，接著將各事件排序值累加，累加值愈高代表故障機率越高（如表 4），由表中得知故障事件前五名為引水路無法進水（A）、控制系統故障（G）、水輪機無法運轉（B）、發電機無法發電（C）及輸變電系統無法送電（D）。由於各系統操作時間、次數與環境有所差異，因此主要脆弱處相對亦略有不同，經逐層再向下分析得知石門 1 號脆弱構件為發電機無法發電（C）之定子失效（C4）及鐵心失效（C13）；石門 2 號為引水路無法進水（A）之引水口閘門無法啟閉（A1）及框門變形（A3）；義興為水輪機無法運轉（B）之導翼失效（B2）及導翼弱剪銷斷裂（B8）。本文利用多狀態失誤樹分析（FTA）所發現的結論與現場實地發生故障狀況相符，因此有必要針對這些脆弱構件加強檢查與維護管理，並預置一定數量備品，以降低系統故障機率及縮短維修時間。

五、模式驗證

本章節將針對多狀態失誤樹分析（FTA）的演算結果與歷史統計及韋伯分析加以比對，以相互驗證計算結果之準確性與合理性。依據歷史紀錄，三部水利發電系統均於 93 年艾

莉風災故障大修，並於 96 年起恢復穩定發電運轉及供水功能，經再蒐集與整理分析 96 年 1 月至 100 年 9 月底止維修及運轉紀錄，得知石門 1、2 號及義興於每次故障修護後平均故障間隔時間（Mean Time Between Fail，MTBF）分別為 2,463 小時、3,214 小時及 3,873 小時，其頂事件故障機率及 MTBF 如表 5。由表 5 中得知多狀態失誤樹分析（FTA）與歷史資料統計結果相近，誤差在 4% 以下，且與韋伯分析採用可靠度為 0.99 時可使用之安全時數（B1 life）及前述 MTBF 由低而高趨勢相同，顯示本研究所建構多狀態失誤樹可作為水力發電系統故障分析模型，亦可作為日後水力發電系統故障診斷分析工具。依據本研究分析，整體而言，石門 1 號故障率較高，相對其 B1 life 及 MTBF 則較低；相對的義興系統故障率較低，其 B1 life 及 MTBF 則較高，未來宜針對故障率高的水力發電系統進行更完整與縝密的評估與探討，以建立更有效的操作與維護模式。

六、結論與建議

依據本研究的分析與評估，顯示水庫式石門 1、2 及調整池式義興發電系統均服從韋伯分佈；接著再藉由專家經驗、維修記錄統計與多狀態失誤樹分析整體評估水力發電系統可靠度，發現多狀態失誤樹分析所計算結果與歷史統計資料、韋伯分佈及平均故障間隔時間（MTBF）分析趨勢相同，顯示以多狀態失誤樹分析作為水力發電系統故障診斷具有其準確性與合理性。

本研究的多狀態失誤樹（FT）主要係依據專家經驗建立不同層級相對關係，不同專家所提供資料將影響多狀態失誤樹結構及計算結果，因此在未來研究時如何利用更可靠的專家經驗擷取技術（expert elicitation）將是發展的重點之一。另外水庫尚有溢洪道、取出水工、進水口、攔河堰及機電等重要設施，有必要導入可靠度分析及故障診斷，藉以評估

系統脆弱處，進而降低災害發生機率。研究期間發現國內現行水庫設施維護機制雖已行之多年，惟其累積龐大維修資料多以紙本紀錄保存未加系統性整理，因此維修資料全面格式化及電子化處理亦是未來發展的方向之一。另外建置完整維護管理資訊與決策支援系統，並進行相關資料探勘與統計分析，同時透過可靠度分析與故障診斷，以研訂維修及更新改善策略，乃是日後水庫維護管理的重點工作。

參考文獻

1. 財團法人台灣營建研究院：「公共工程延壽政策及相關技術之探討」，行政院公共工程委員會專案研究計劃 PCC-91-研-02，2002。
2. 國立台灣大學水工試驗所：「水壩安全檢查最佳次序及周期之建立 (2/2)」，經濟部水利署委辦研究計畫，2004。
3. 台灣電力股份有限公司：「水力發電機操作及維護手冊與石門水力發電機操作標準作業」，2008 修正。
4. 林惠玲、陳正倉：應用統計學，雙葉書廊有限公司，2003 二版修訂。
5. 王少萍：工程可靠性，北京航空航天大學出版社，pp.1-43，2000。
6. 曾聲奎、趙廷弟、張建國、康銳、石君：系統可靠性設計分析教程，北京航空航天大學出版社，pp. 1-157，(2001)。
7. 曹晉華、程侃：可靠性數學引論，北京高等教育出版社，pp. 1-33，pp. 122-179，2006。
8. 徐久軍、嚴志軍、朱新河、嚴立：機械可靠性與維修性，大連海事大學出版社。2000。
9. 茆詩松、湯銀才、王玲玲：可靠性統計，北京高等教育出版社，pp.1-230，(2008)。
10. 陳甄婷：「失誤樹分析轉換成貝氏網路之研究—以水利發電系統引水路失效為例」，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，2010。

11. 林俊甫、徐懷祖、邱龍興：「飛彈彈頭之故障樹分析」，proc. of the 7th R.O.C symp. on R&M，2007。
12. FERC, “Dam Safety Performance Monitoring Program,” Chapter 14, Federal Energy Regulatory Commission, Washington, DC, 2005.
13. Hillson, D. A, “Describing Probability the Limitations of Natural Language,” Proceedings of PMI Global Congress 2005-EMEA, No. PMB02, Edinburgh, UK, May 23～25, 2005.
14. Hartford, D. N. D. and G. B. Baecher, “Risk and Uncertainty in Dam Safety,” Thomas Telford, Ltd, London, 2004.
15. Charles E. Ebeling, Reliability and Maintainability Engineering, McGraw-Hill International Editions, 1997.
16. Paul A. Tobias, and David C. Trindade, Applied Reliability, International Thomson Publishing Inc, Second Edition, 1995.
17. Singiresu S. Rao, Reliability-Based Design, McGraw-Hill International Editions pp.115-182, pp.431-460, 2002.
18. Patrick D.T. Oconnor, Practical Reliability Engineering, John Wiley & Sons, LTD pp.1-109, pp.157-223, Fourth Edition. 2005.
19. Lawrence M. Leemis, Reliability Probabilistic Models and Statistical Methods, Prentice-Hall International Inc, pp.1-187, 1995.
20. Paul Kales, Reliability for Technology, Engineering, and Management, Pearson Education

Taiwan Ltd , 2006.

21. William Q. Meeker, and Luis A. Escobar, Statistical Methods for Reliability Data ,A

Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc , 1998.

22. T.L.Graves, M.S. Hamada, R. Klamann, A. Koehler , and H.F. Martz, “A fully Bayesian approach for combining multi-level information in multi-state fault tree quantification,”

Journal of Reliability Engineering & System Safety.Vol.92, No.10, p p.1476-1483 , 2007.

23. William Marsh, and George Bearfield, “Representing parameterised fault trees using

Bayesian Networks,” In proceedings of the 26th international conference on Computer

Safety, Reliability and Security,SAFECOMP, Springer-Verlag, 2007 .

24. U.Franke,W.R. Flores,and P. Johnson, “Enterprise architecture dependency analysis using fault trees and Bayesian Networks,” Proc. 42nd Annual Simulation Symposium (ANSS),

March, San Diego, USA, pp.209-216 , 2009.

表目錄

表 1. 韋伯分佈參數計算與卡方配合度檢定

表 2. 三部發電系統可靠度函數

表 3. FMEA 故障發生率評點標準

表 4. 頂事件與中間事件故障機率及排序

表 5. 頂事件故障機率計算結果比較

表 1. 韋伯分佈參數計算與卡方配合度檢定

項 目 \ 系 統	石門 1 號	石門 2 號	義興
樣 本	60	64	33
區間劃分 K	7	7	7
區間時數(hrs)	1,700	2,300	1,200
自由度	4	4	4
臨界值 (信賴區間 95%)	9.5	9.5	9.5
檢定統計值	9.08	7.26	9.31
虛無假設 H ₀ : 韋伯分佈	接受	接受	接受
迴歸直線	$1.637x - 14.24$	$2.373x - 20.535$	$4.885x - 41.716$
形狀參數 β	1.637	2.373	4.885
尺度參數 θ	5,986 hrs	5,727 hrs	5,115 hrs
相關係數 R ²	0.937	0.946	0.943

表 2. 三部發電系統可靠度函數

系統 項目	石門 1 號	石門 2 號	義興
累計故障分佈函數 $F(t)$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{5986}\right)^{1.637}}$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{5727}\right)^{2.373}}$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{5115}\right)^{4.885}}$
故障機率函數 $\lambda(t)$	$\frac{1.637}{5986} \left(\frac{t}{5986}\right)^{0.637}$	$\frac{2.373}{5727} \left(\frac{t}{5727}\right)^{1.373}$	$\frac{4.885}{5115} \left(\frac{t}{5115}\right)^{3.885}$
機率密度函數 $f(t)$	$\lambda(t) \cdot e^{-\left(\frac{t}{5986}\right)^{1.637}}$	$\lambda(t) \cdot e^{-\left(\frac{t}{5727}\right)^{2.373}}$	$\lambda(t) \cdot e^{-\left(\frac{t}{5115}\right)^{4.885}}$
平均故障前時間 (MTTF)	5,358 hrs	5,248 hrs	4,692 hrs
尺度參數 θ (特徵壽命)	5,986 hrs	5,727hrs	5,115 hrs
中值壽命 ($R=0.5$)	4,787 hrs	4,908 hrs	4,745 hrs

表 3. FMEA 故障發生率評點標準

失 效 時 間	失效機率	等級
非常長：失效時間極長，幾乎天天都在發生。	>1/2	10
	1/3	9
很長：失效時間很長，根據以往的經驗或資料顯示，事件發生失效時間長。	1/8	8
	1/20	7
長的：發生時間中等，根據以往的經驗或資料顯示，事件不會發生很長的時間。	1/80	6
	1/400	5
	1/2,000	4
短的：發生時間短。	1/15,000	3
	1/150,000	2
極短：發生時間極短，幾乎不會發生失效。	1/1,500,000	1

表 4. 頂事件與中間事件故障機率及排序

系統 事件	石門 1 號		石門 2 號		義興		排序累 計	累計後 排序
	機率%	排序	機率%	排序	機率%	排序		
頂事件	7.550		6.690		4.300		-	
引水路無法進水(A)	1.642	2	1.702	1	1.068	3	6	1
水輪機無法運轉(B)	0.990	4	1.321	2	1.095	2	8	3
發電機無法發電(C)	2.904	1	1.193	4	0.655	4	9	4
輸變電系統無法送電(D)	0.705	5	0.772	5	0.462	5	15	5
尾水路無法出水(E)	0.080	7	0.081	7	0.114	7	21	7
冷卻系統無法降溫(F)	0.272	6	0.576	6	0.234	6	18	6
控制系統故障(G)	1.196	3	1.237	3	1.237	1	7	2
人為操作失誤(H)	0	8	0	8	0.023	8	24	8

表 5. 頂事件故障機率計算結果比較

分析 方法 系統	歷史統計	FTA	FTA 可 靠度	韋伯分析 FTA 可靠度 下壽命	韋伯分析 B1 life R=0.99	平均故障 間隔時間 MTBF
石門 1 號	7.82 %	7.55%	92.45%	1,268 hrs	360 hrs	2,463 hrs
石門 2 號	6.91 %	6.69%	93.31%	1,860 hrs	825 hrs	3,214 hrs
義興	4.37 %	4.30%	95.70%	2,696 hrs	1,995 hrs	3,873 hrs

圖目錄

圖 1. 研究流程圖

圖 2. 歷史資料統計迴歸直線

圖 3. 故障率函數曲線

圖 4. 累積故障分佈曲線

圖 5. 機率密度函數曲線

圖 6. 系統無法發電失誤樹

圖 7. 水輪機無法運轉失誤樹

圖 8. 發電機無法發電失誤樹

圖 9. 輸變電無法送電失誤樹

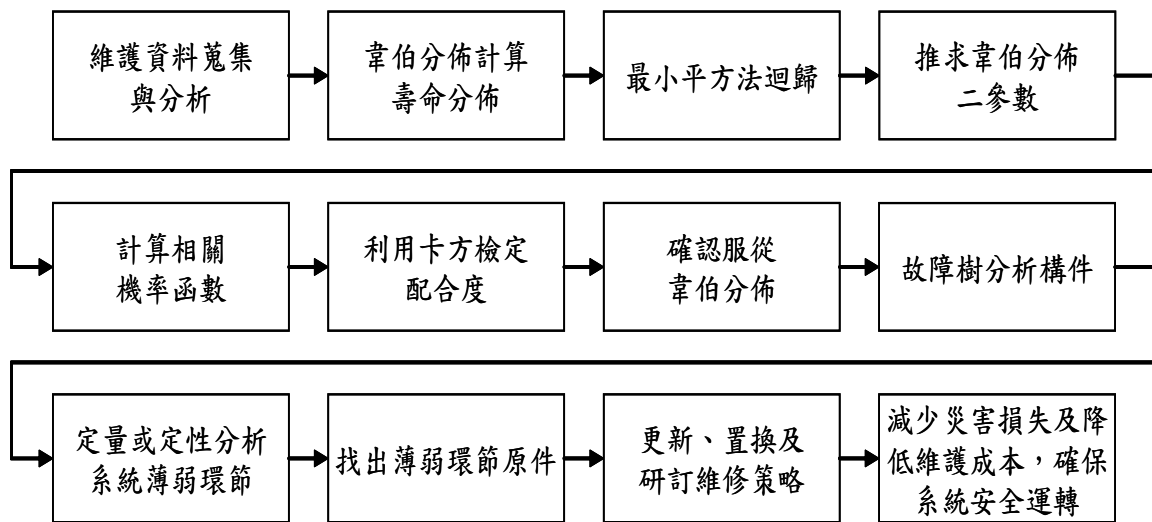


圖 1 研究流程圖

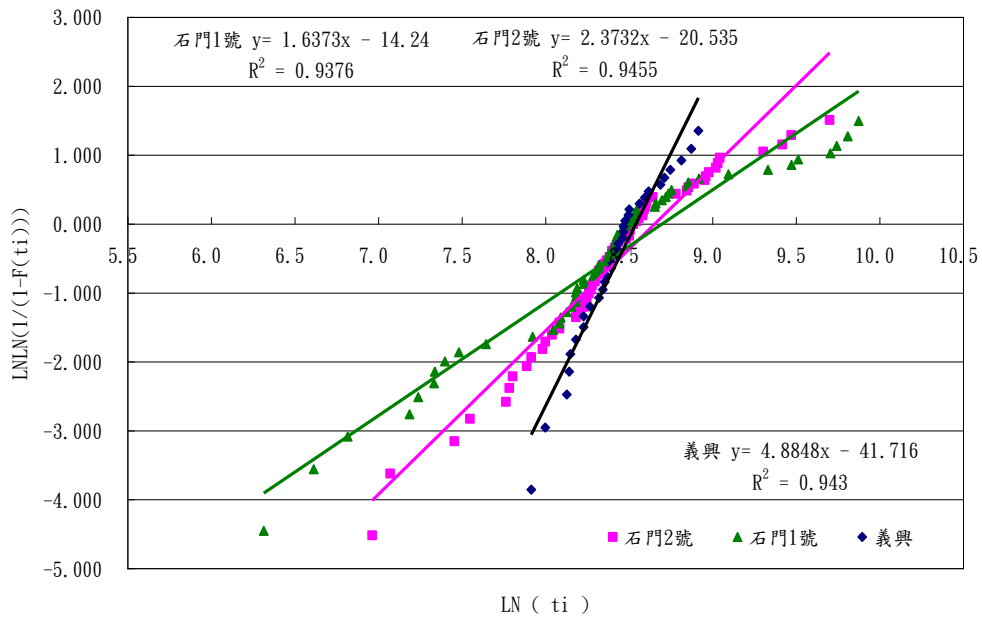


圖 2. 歷史資料統計回歸直線

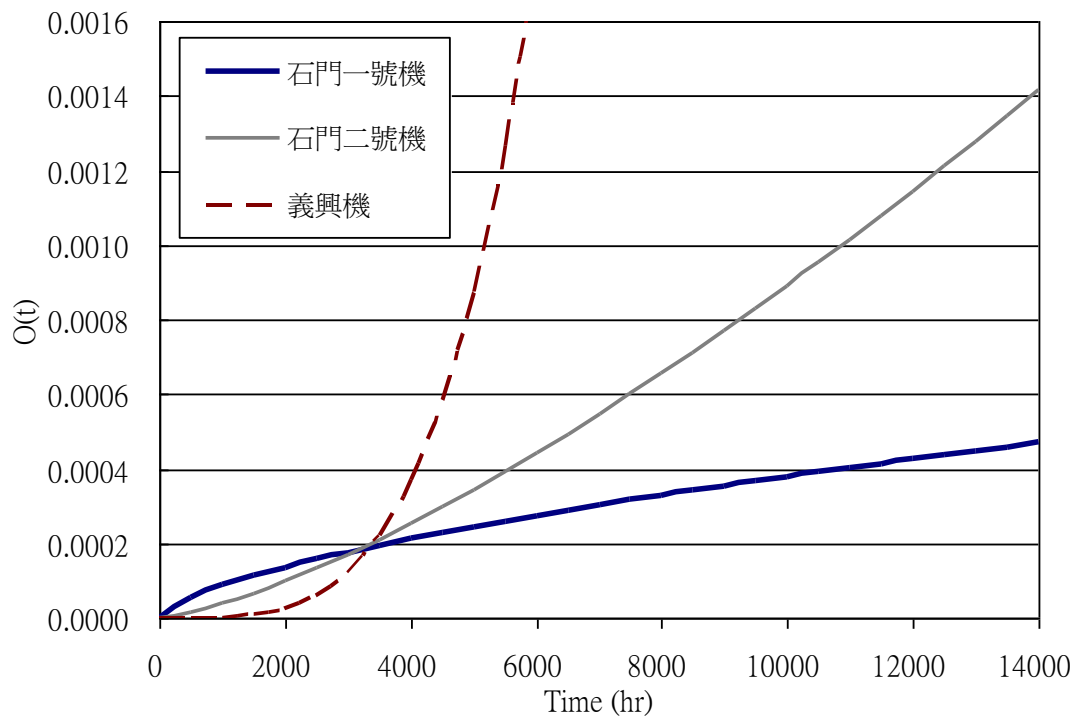


圖 3. 故障率函數曲線

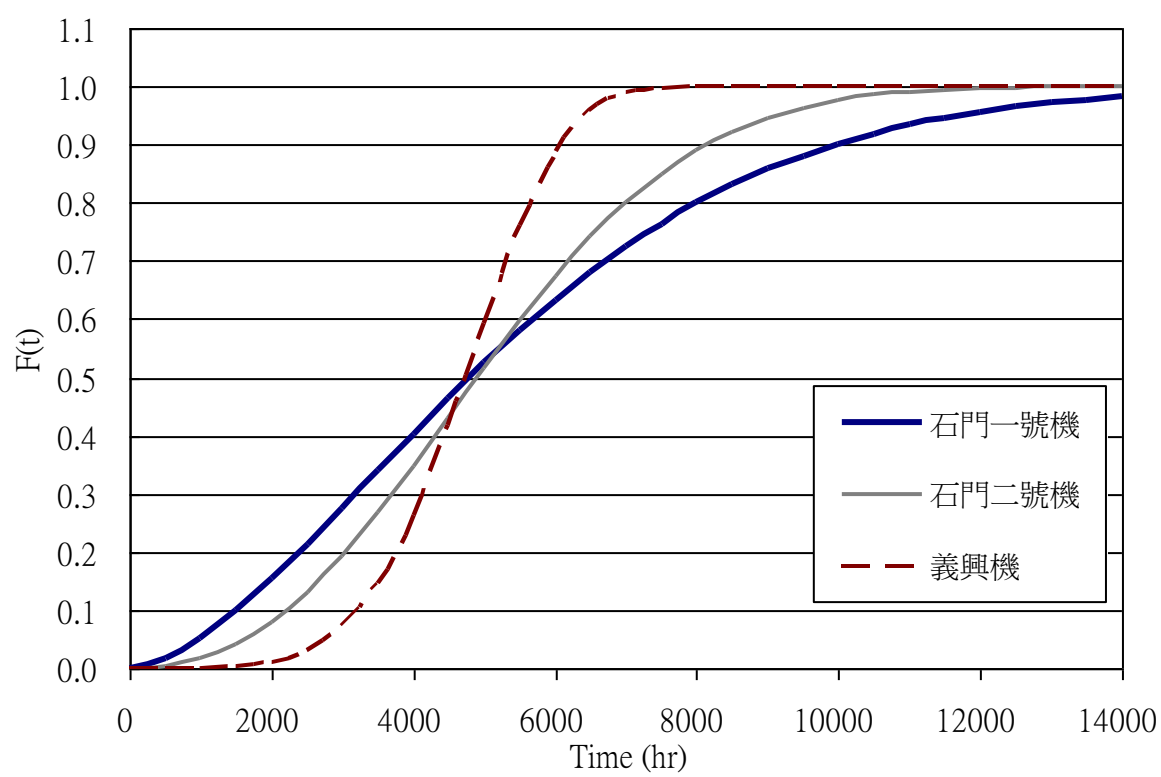


圖 4. 累積故障分佈曲線

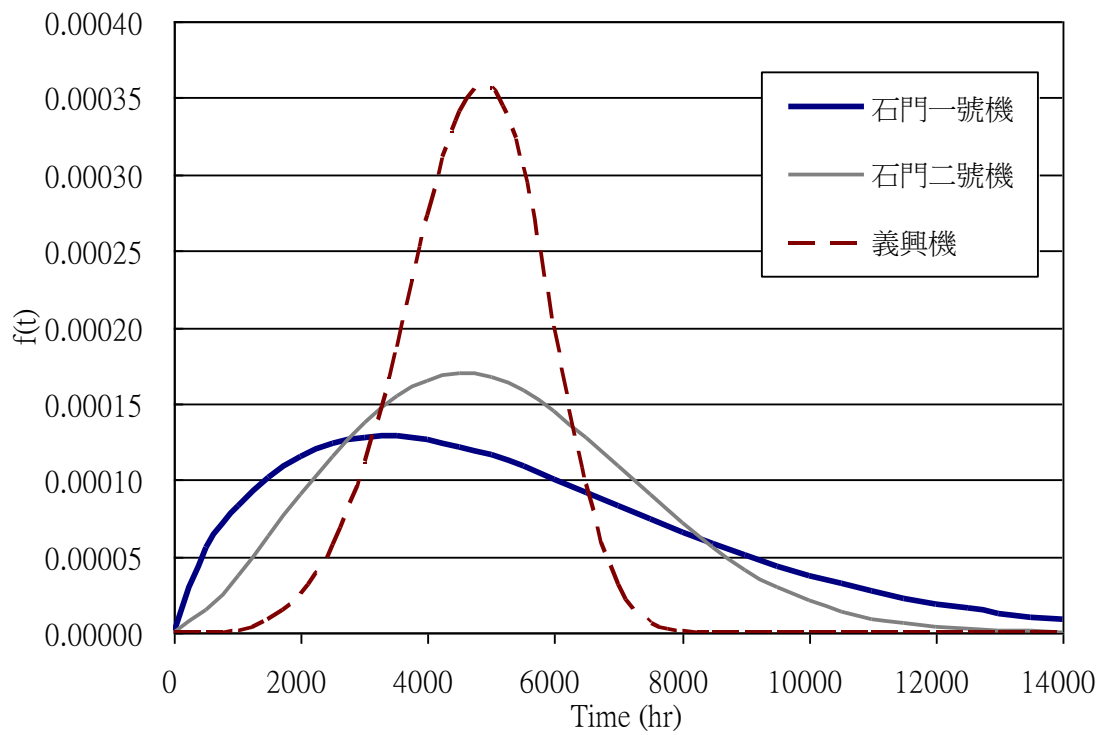


圖 5. 機率密度函數曲線

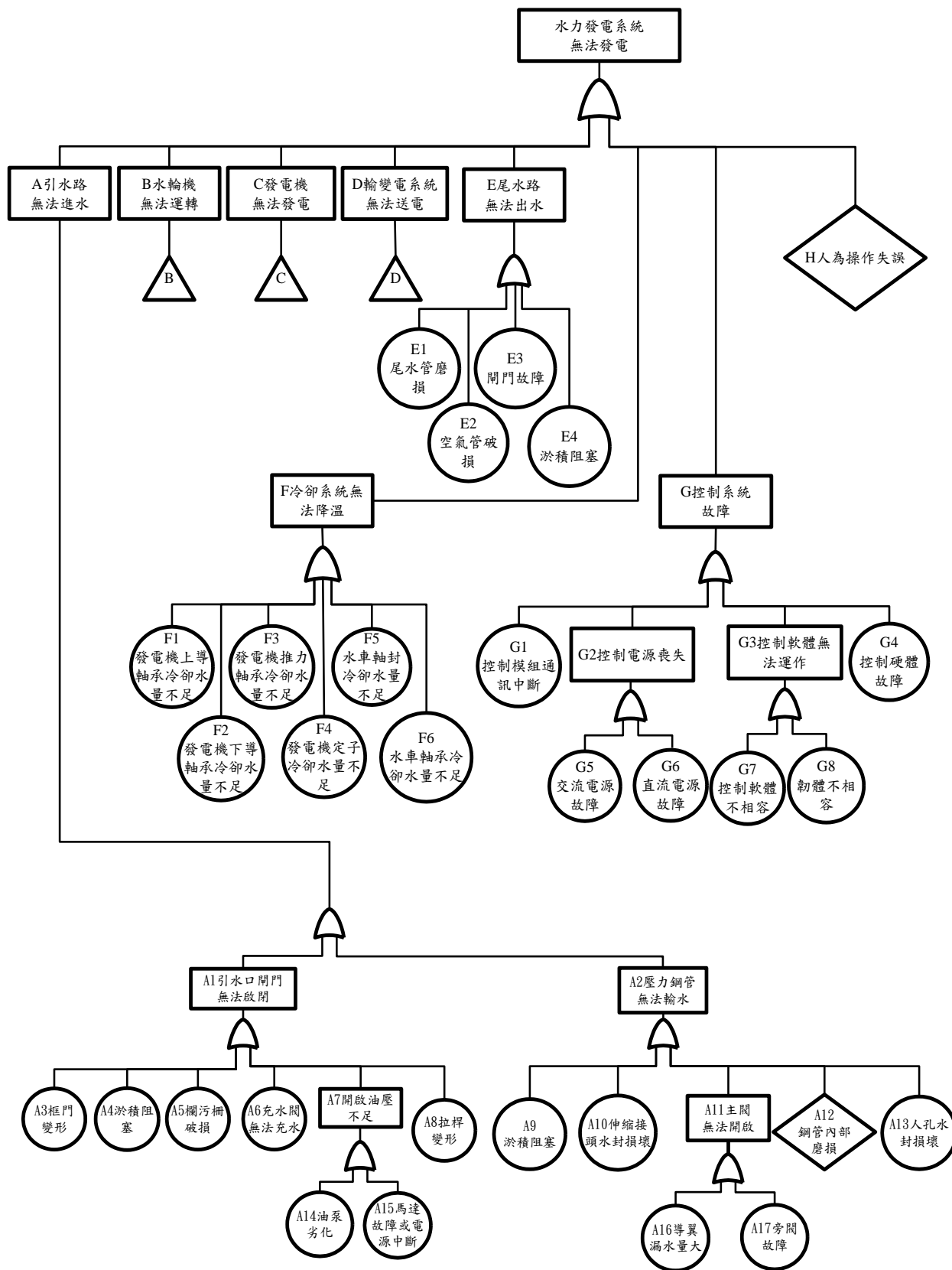


圖 6. 系統無法發電失誤樹

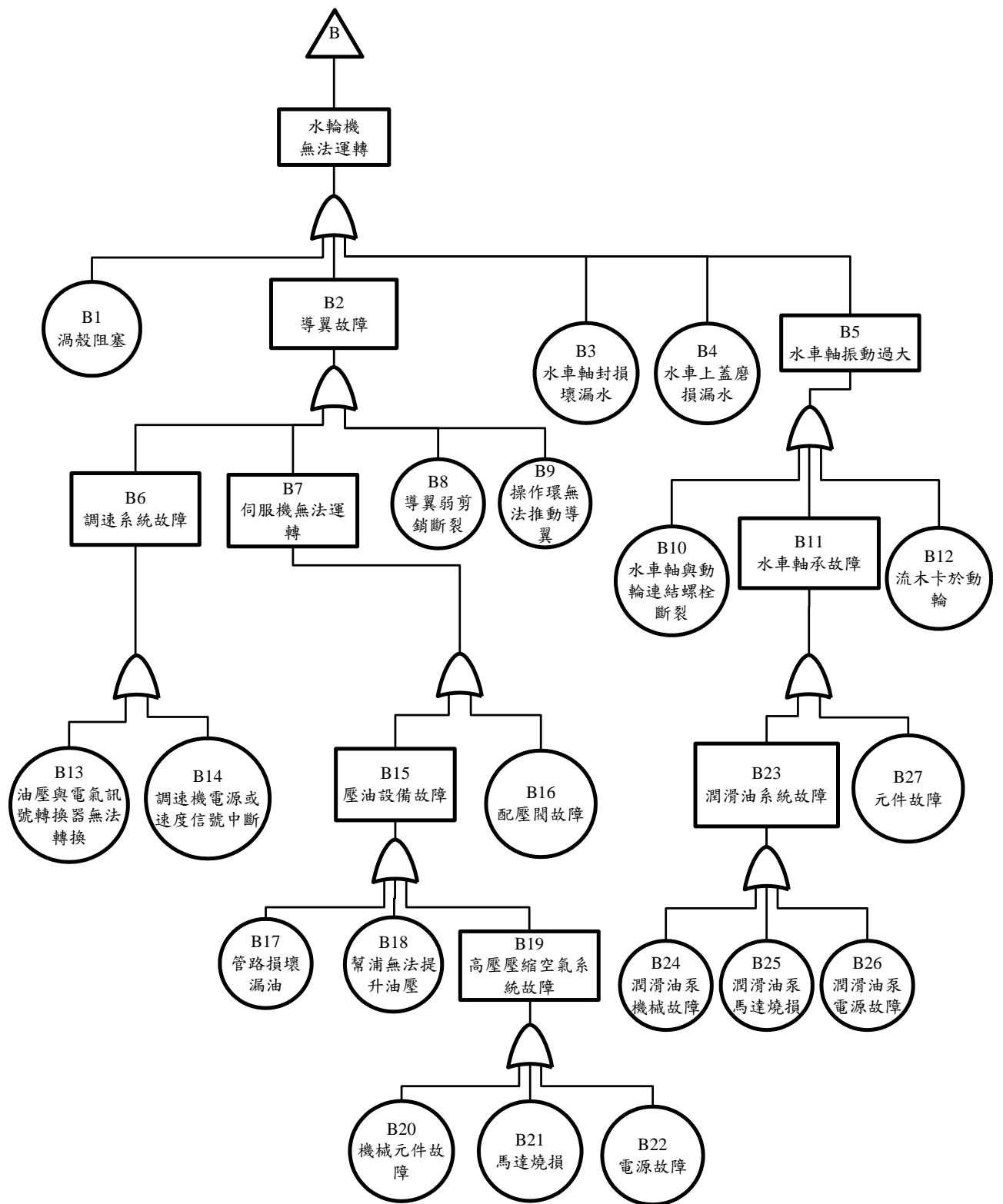


圖 7. 水輪機無法運轉失誤樹

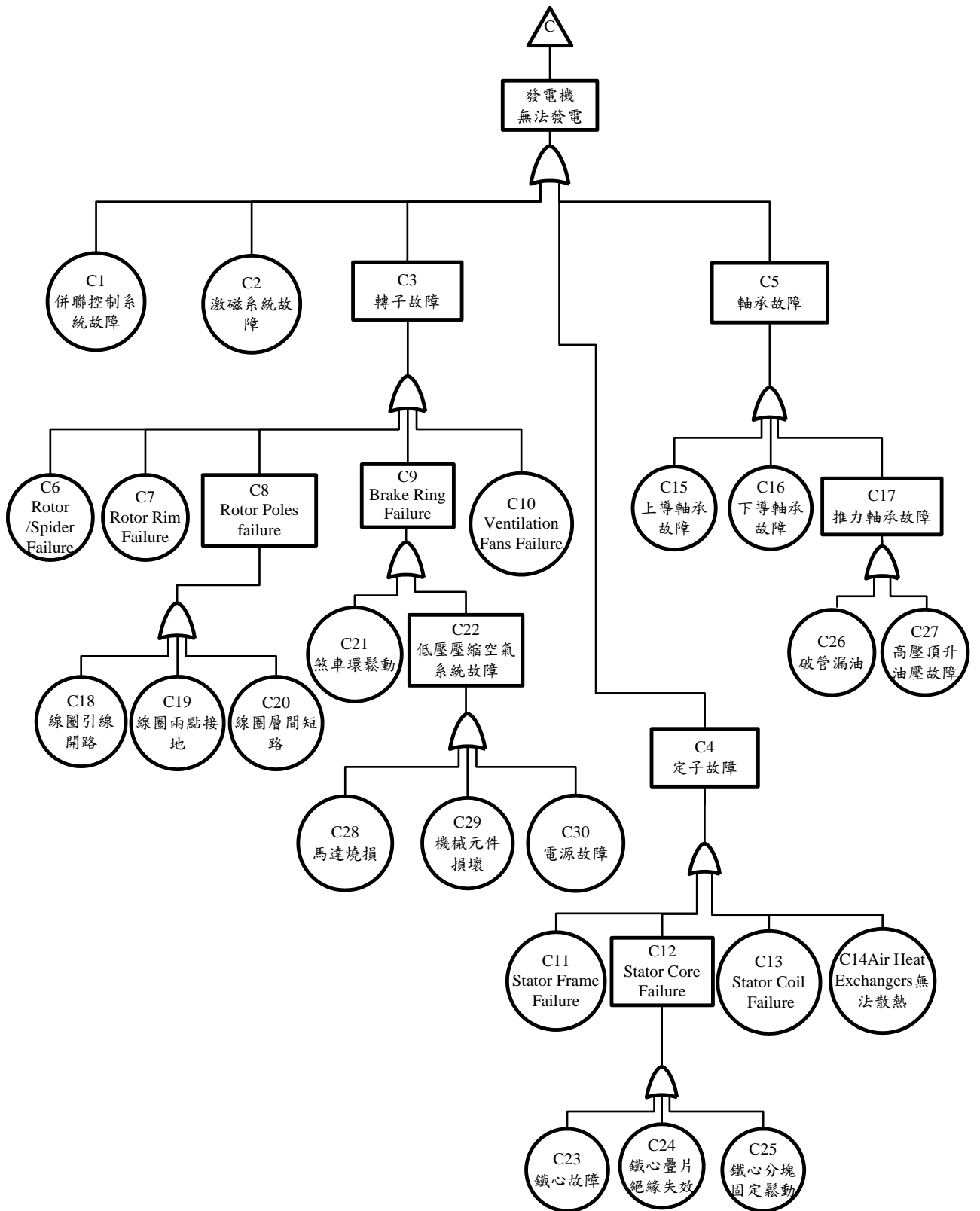


圖 8. 發電機無法發電失誤樹

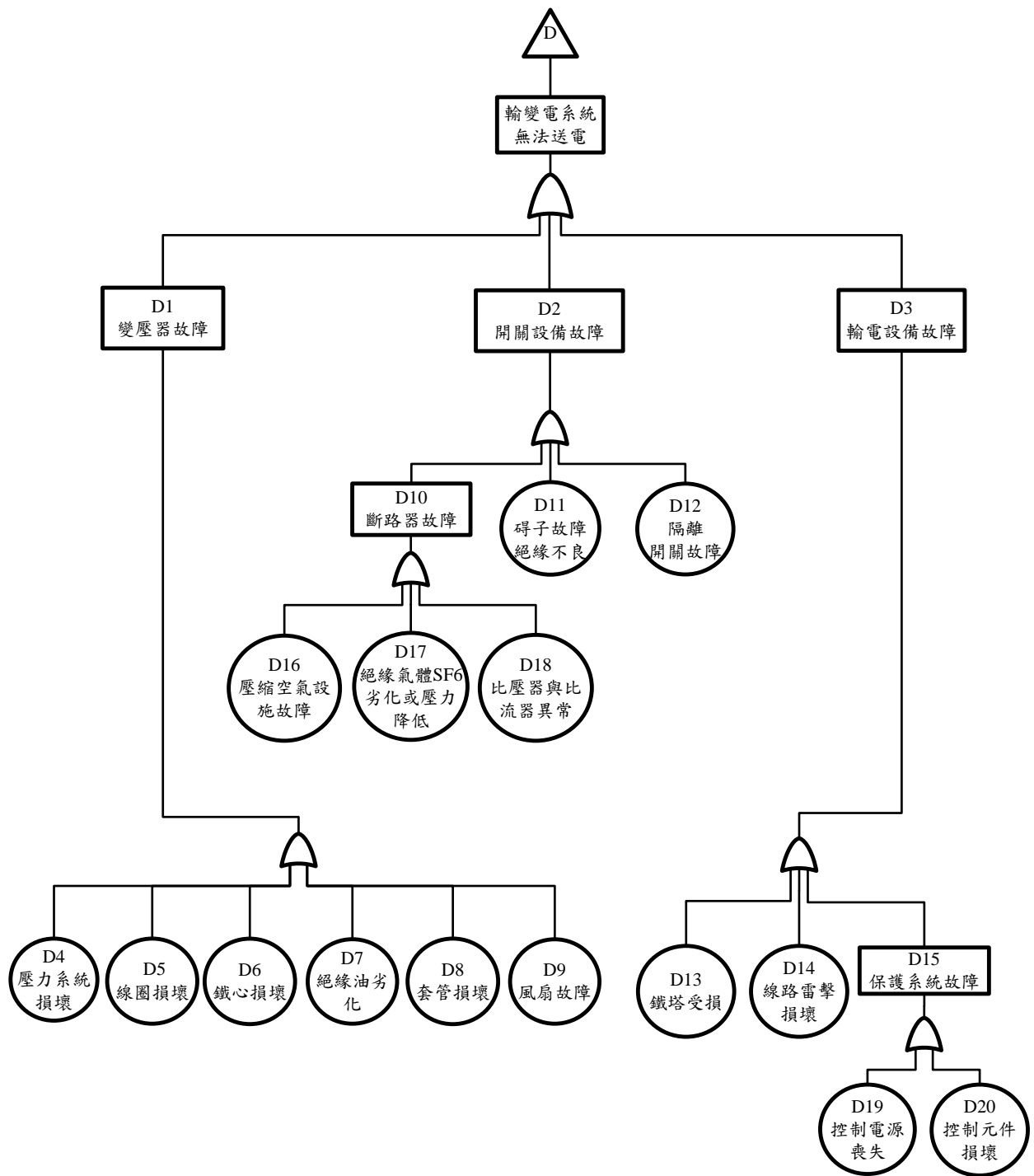


圖 9. 輸變電無法送電失誤樹