



談保護電驛維護週期

李河樟

台電電力調度處

一、前言

保護電驛裝設的主要目的在於被保護設備發生無法容忍的異常狀況時，能快速的將其從電力系統中隔離，使該設備之損害程度減低至最小，縮短故障設備修復的時間，降低因無電可用所造成的損失。保護電驛無法預期被保護設備於何時在何處會發生何種事故，因此保護電驛必須隨時保持於良好狀態，要像一位盡職的哨兵，眼觀四面、耳聽八方，不能有絲毫的疏忽。但是保護電驛是否能達成預期的目標，則必須經過不斷的測試與驗證，這些測試包括：製造廠家在研發電驛時所進行的研究性試驗、使用者在採購電驛時所需的鑑定性試驗（驗收試驗）、電驛於現場裝設完成後的安裝試驗、每隔一段時間之後所執

行的定期維護試驗，以及在保護電驛不正確動作後所進行的事故調查試驗。而不管是驗收試驗、安裝試驗或是事故後的調查試驗，都有其明確的試驗時機；但是對於維護試驗的間隔到底要多久較為適當，目前則尚無一標準化的定論。保護電驛定期維護週期要如何訂定？是依照製造廠家使用手冊建議的維護週期呢（有些電驛製造廠的使用手冊上並未述明）？或是依照相關安全法規之規定（是否有合理可行之規定）？或視電驛動作實績彈性調整？或是參考其他電力公司的維護週期？答案可謂莫衷一是。事實上要訂定保護電驛的維護週期，必須考慮的因素很多，例如電驛的故障率、被保護設備的故障率、電驛的故障週期、電驛是否具有自我診斷功能等等。本文將介紹一種針對這些必須考慮的因

素，以機率模式來探討適當的保護電驛維護週期。

二、保護電驛定期維護的重要性

電驛裝設於電力設備上做為保護之用，可能在其整個故障週期之內都沒有動作的機會；但是我們不可因為它不常動作（也不希望它動作），就認為保護電驛不重要，而忽略了電驛應有的維護工作。萬一被保護設備發生事故而電驛無法適時正確動作，其後果可能導致電力供應的全面中斷，也可能造成設備嚴重損壞，其負面影響可能極為深遠。所謂『養兵千日，用在一時』，隨時維持保護電驛於良好狀態，是所有電力系統相關人員必須謹記在心的要務。

傳統的保護電驛（Electromechanical Relay）並未具有自我檢測或狀態監視功能，所以傳統的保護電驛如果有問題存在，只有在兩種情況下可以被發現：第一種情況就是在定期維護測試時發現，第二種情況是等到事故時電驛誤動作才會被發現。電驛誤動作的情形有兩種：電驛該動作而不動作及電驛不該動作而動作，而這兩種情形所造成的後果都極為嚴重，不是擴大事務範圍就是使得設備損壞程度加深。故避免電驛誤動作，是所有電驛工程師所兢兢業業努力的最終目標。對於傳統式的保護電驛而言，電驛的可靠性及安全性極度倚

賴於電驛維護的頻繁度。所謂「預防勝於治療」，凡事不要等到事情發生之後才去檢討肇因，而是應該知道『種什麼因就會得到什麼果』，尤其是保護電驛這一高科技產品，更不能存有絲毫僥倖之念。為了確保電驛能正確發揮其應有功能，確實執行電驛定期維護試驗是極為必要的。

保護電驛故障可能導致：1.在事故發生時電驛不動作，2.電驛不該動作而動作，3.電驛動作特性改變（如動作時間遲延）。保護電驛定期維護試驗的目的是提高保護電驛的可用率，並使電驛誤動作的風險降至最低。就此觀點而言，對於各種不同類型的電驛設備，我們必須經常不斷的進行電驛定期維護工作。但是保護電驛在維護、試驗時，是否還具有保護的功能？如果沒有，則要考慮電力系統是否容許電驛維護時，恰巧被保護設備不幸故障的機率。另外，維護人力投資的問題，維護人員技術純熟度等諸問題都需詳加評估。因此，如何訂定適當的維護週期是很值得探討的問題。

三、選擇適當的維護週期

為確認保護電驛能正常發揮其應有功能，依常理判斷維護間隔越短，電驛的可靠性與安全性越高。事實是否就是如此？那倒也未必。一般而言，保護電驛在使用中故障的比例遠小於試驗不當所造成的損

壞，這當然與試驗人員是否訓練有素、是否有一套正確的試驗程序有關。畢竟保護電驛是結合相關科技的產物，其維護工作必須有理論基礎，並配合試驗技術的不斷精進，才能達到徹底診斷的目的。對於新型數位式電驛的測試，更不能以「土法煉鋼」的方式，否則適得其反，真的是多做多錯那就太不值得了。因此對於維護週期的訂定必須多方考慮，求出最佳平衡點，不見得是越密集就越好，『做對的事情』比『把事情做對』更重要。

對於如何決定適當的維護週期，已有很多專家學者探討過，大部分的重點不外乎是以計算方式求出一些機率數字，包括不正常時的「失效」率及保護上的「失效」率。所謂不正常時的失效率是指被保護設備故障時電驛也故障的機率，保護上的失效率是指被保護設備正常時電驛故障的機率。

基於保護電驛僅在於設備故障時才需發揮其保護功能，因此我們所著重的是電驛在設備不正常時的失效率，以此為重點來探討保護電驛的維護週期，當更契合實際。為了要使得計算模式能夠有效進行，以下假設是必要的：

1. 電驛測試是為檢查電驛是否有故障。
2. 電驛進行測試時必須停止使用。
3. 電驛測試所需要的時間等於該電驛修理或是換新品所需時間（此一假設可

以簡化計算過程，雖不盡合乎實際，但無損於計算結果的可用性）。

4. 電驛測試時不會造成電驛故障。（這一點實有賴於電驛測試人員技術的純熟度）
5. 電驛經修復後其功能與新品無異。（電驛維修品質應特別注意）

保護電驛狀態與被保護設備狀態可歸納表示如圖一，將保護電驛與被保護設備的情況及其相對關係分成九個狀態，並分別加以定義：狀態 1 是為正常運轉狀態，設備（如變壓器、輸配電線路等）正常送電中，保護電驛亦處於良好狀況。此時如果設備發生事故，則轉換到狀態 2。狀態 2 代表設備異常，但保護電驛處於良好狀況。此時保護電驛應該動作將設備自電力系統中切離，而進入狀態 6。狀態 6 代表設備停用中，而保護電驛正常使用中。

故障設備經修復後重新加入運轉，所以從狀態 6 又回到狀態 1；但是此時如果設備尚未修復而保護電驛故障，則進入狀態 7。

平常保護電驛與設備均正常使用中，如果電驛突然故障而失去作用卻未被自我診斷出（或無自我診斷功能），此時系統從狀態 1 轉換為狀態 3。此一電驛故障情形直到定期維護時才被發現，發現電驛故障後即刻將電驛送修，而進入到狀態 9。如果是具有自我診斷功能的數位式電驛，則在電驛故障時即可自我診斷出並發出警報，

提醒有關人員前往修護或將電驛送修。即具有自我診斷功能的數位式電驛，可由狀態 1 轉換到狀態 9。

此外，保護電驛在測試時必須停止使用，因此測試時是從狀態 1 轉換到狀態 5。電驛經過測試結果良好時，則再次回到正常狀態 1；如果電驛在測試中（狀態 5）或是故障中（狀態 3）、修理中（狀態 9），被保護設備不幸突然發生事故，或是電驛及設備均於正常情況（狀態 1）卻突然同時故障，即進入狀態 4。狀態 4 是我們最不願意見到的結果，此種狀況被保護設備的故障，必須由後衛保護電驛動作來隔離，這將使得停電範圍擴大，且故障清除時間拖長，設備損壞較為嚴重。事故隔離後即進入狀態 8，然後經運轉人員手動隔離事故點，其他正常設備恢復送電，此為狀態 7。當然如果設備能夠修復即可再回到狀態 9；但也可能是設備未能很快修復而電驛已先修復，則從狀態 7 回到狀態 6。

以上是整個保護電驛與被保護設備實際可能發生的各種相對情況，我們比較在意的是如何從此一模式中獲得保護電驛的失效率，及不正常狀態下的失效率。如前所述，電驛的失效率是指在被保護設備正常使用時，電驛的失效機率，即圖一中左下部分的狀態 3、狀態 5 及狀態 9 的機率和。不正常狀態下的失效率是指保護電驛故障中被保護設備故障的機率，即圖一中右下部分的狀態 8 及狀態 4 的機率和。

圖中所使用的符號有四大類：故障率、修復率、操作速率及定期維護率，其代表意義分述如下：

故障率：

F_p ：電驛故障率（故障週期 MTBF 的倒數）

$$\frac{1}{MTBF} \quad (\text{MTBF: Mean Time Between Failure})$$

F_c ：每年被保護設備（如發電機、輸電線路等）故障的次數（次／年）

F_{cc} ：每年被保護設備與電驛同時故障的次數（次／年）

ST：電驛自我檢測功能指數（自我檢測範圍佔電驛元件的百分比）

F_{st} ：每年電驛自我診斷出故障的次數（次／年） $F_p \cdot ST$

F_{pp} ：每年電驛故障未能自我診斷出之次數（次／年） $F_p (1-ST)$

修復率：

R_c ：每小時可以修復的設備數

R_t ：每小時可以維護的電驛數

R_r ：每小時可以修復的電驛數

操作速率：

S_n ：每小時正常跳脫次數（正常時事故清除時間的倒數）

S_b ：每小時後衛保護跳脫次數（由後衛

保護電驛動作時，事故清除時間的倒數)

S_m ：每小時手動操作隔離事故的次數

定期維護率：

I_{pm} ：電驛定期維護間隔

θ_{pm} ：電驛定期維護率 ($1/I_{pm}$)

以上這些數據均須由歷史運轉紀錄取得，因此要找出電驛最佳維護週期，各項維護紀錄必須做到極為週詳。因此，要擬定最適當的維護週期，平時應該建立相關運轉紀錄：每年設備的故障次數、故障修復的時間、所發現保護電驛故障的情形、故障電驛修復的時間……等等，參考詳實的數據才能作出正確的選擇。假設以下是某一電力系統的運轉紀錄值：

$F_{cc}=1.0$ 每年被保護設備與電驛同時故障的次數

$R_c=0.5$ 每小時可以修復的設備數

$R_t=1.0$ 每小時可以維護的電驛數

$R_r=0.5$ 每小時可以修復的電驛數

$S_n=43200$ 每小時正常跳脫次數 (正常時事故清除時間 5 週波的倒數)

$S_b=10800$ 每小時後衛保護跳脫次數 (由後衛保護電驛動作時，事故清除時間 20 週波的倒數)

$S_m=0.5$ 每小時手動操作隔離事故的次數 (後衛保護電驛動作後，手動操作隔離事故需要兩小時)

電力系統存在於圖一中每一狀態的可能率，可以由 Markov 轉換矩陣求出，其矩陣為：

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & F_c & F_{pp} & F_{cc} & \theta_{pm} & 0 & 0 & 0 & F_{st} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 & S_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & F_c & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{pm} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 & 0 & S_b & 0 \\ R_t & 0 & 0 & F_c & a_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_c & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} & F_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & a_{77} & 0 & R_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_m & a_{88} & 0 \\ R_r & 0 & 0 & F_c & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{99} \end{bmatrix}$$

$$a_{11}=1-(F_c+F_{cc}+F_{st}+F_{pp}+\theta_{pm})$$

$$a_{22}=1-S_n$$

$$a_{33}=1-(\theta_{pm}+F_c)$$

$$a_{44}=1-S_b$$

$$a_{55}=1-(R_t+F_c)$$

$$a_{66}=1-(R_c+F_p)$$

$$a_{77}=1-(R_r+R_c)$$

$$a_{88}=1-S_m$$

$$a_{99}=1-(R_r+F_c)$$

設 P 為一 Markov 模式九種狀態的機率向量， $P^T = [P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6 P_7 P_8 P_9]$

則

$$P^T \cdot T = P^T \quad \text{或} \quad P^T \cdot [T-I] = 0$$

I 為一個九乘九的單位矩陣，另外還需要以下方程式以解決 $[T-I]$ 奇異值 (singularity) 的問題：

$$\sum_i P_i = 1$$

依此可定義我們最感興趣的兩種機率：不正常時的失效機率 $AbUn = P_4 + P_8$ 以及電驛失效機率 $RyUn = P_3 + P_4 + P_9$ 。根據這兩種機率與維護時間間隔的關係曲線，可以很清楚的找出電驛最佳維護週期。

四、模式計算結果探討

為提高保護電驛的可靠度，密集的進行定期測試似乎是唯一的方法，最好是在電驛失效之前能及時發現並修復，也就是電驛的維護週期最好小於電驛的故障週期。但是如果在電驛測試時不能執行保護的任務，則所冒【設備故障卻無保護】的風險極大。這之間如何取捨，我們可以從 Markov 模式的計算結果，依據系統的特性，評估系統對設備不正常時電驛失效的容許能力，訂定出適當的電驛維護週期。

沒有自我診斷功能的傳統式保護電驛系統，其不正常時失效率與電驛定期維護週期長短的相對關係如圖 2 所示。此一曲線圖是假設電驛的故障週期為 50 年，所保護的設備為一輸電線路，此線路每年故障兩次。因電驛為沒有自我診斷功能，所以 $ST=0$, $F_{st}=0$ 。從圖 2 可以得知最佳維護週期約 1000 小時，也許不盡合理，但這與當初所假設的運轉紀錄值 F_{cc} 、 R_c 、 R_l 、 R_r 、 S_n 等有關。如果維護間隔太短，將會因電驛維

護中而無法正常保護的次數（時間）增多，也就是過度維護，可能錯失任何發生的事故；但是如果維護間隔太長，則電驛因為故障未被發現而失效的可能性就越高，萬一被保護設備有故障，將無法獲得足夠的保護，此一情況即為電驛維護不足。

從圖 3 的兩條曲線可以看出，如果電驛的維護週期很短的話，被保護設備每年的故障次數，對於不正常時的失效機率影響極為顯著，但最佳維護週期受此因素影響有限。如果電驛的維護週期很短的話，則保護電驛的故障週期，對於不正常時的失效機率可說毫無影響；但是維護週期很長時，則保護電驛的故障週期就顯得極為重要。對於故障週期很短的電驛而其維護週期卻很長，則此電驛在設備發生事故時剛好故障而無法保護的機會就較高，這是很容易理解的。

一般對於新型的數位式保護電驛，均強調具有自我診斷功能而不需維護測試。事實是否如此？其實並不完全正確，這要看該電驛自我診斷所涵蓋的比例到底有多少（有效診斷率），如果自我診斷程度可達到百分之百的話，則不需做維護測試是可以接受的；但是如果自我診斷程度僅達百分之五十甚至更低，則不需做維護測試就太過於冒險了。這可以從圖 5 及圖 6 很明顯的看出， $ST=0$ 就相當於傳統的無自我診斷之電驛，相對於自我診斷有效診斷率百分之九十的數位式電驛，如果維護週期

為 30000 小時（約三年半），則對電驛失效率而言，傳統式約為數位式電驛的 10 倍。而如果有有效偵測率為百分之九十九時，則電驛失效率傳統式約為數位式電驛的 100 倍。另外值得一提的是，當電驛的自我診斷率達到百分之九十九時，延長電驛維護週期反而可降低電驛的失效率，亦即對於此類電驛定期維護不要太頻繁。

從模式計算結果也發現一個現象，具有自我診斷功能的數位式電驛，其故障週期對於電驛的失效率並未有多大影響，即不影響電驛維護週期的選定。故障週期較長的電驛，可以節省電驛修理或更新的時間，但對於電驛的可用率並無重大貢獻。

圖 7 對於一電力系統以傳統式電驛保護或以數位式電驛保護其異常時失效率做一比較。圖下方兩曲線分別代表故障週期 10 年及 100 年的數位式電驛，其自我診斷率為 95%，電驛測試時間為 4 小時；圖上方曲線代表故障週期為 50 年的傳統式電驛，不具有自我診斷功能，電驛測試時間約需 8 小時。此一結果顯示傳統式電驛每四個月執行一次定期維護，其可靠度還不如數位式電驛每四十年維護一次。

五、結論

科技是實現理想的工具，將科技融合於保護電驛，使得保護電驛的可靠性、選擇性與快速性之理想均獲得滿意的實現，

結合微處理器的數位技術更使得保護電驛的功能更多樣化、人性化，自我診斷功能的特質，也讓電力系統運用人員不必再時時擔心保護電驛是否能正常發揮應有功能。未來數位式電驛的自我診斷能力（成功率與診斷範圍）提升到某一程度之後，定期測試的範圍將可縮小到僅做輸出/輸入及表計功能等測試，至於一般電驛特性、計時元件等的測試就不必了。根據前述的機率分析可得到如下的結論：具有自我診斷功能的電驛，其維護的週期遠大於未具有自我診斷功能者。

因為自我診斷功能可以很快的指出電驛極大部分主要的故障，所以數位式電驛的故障週期（MTBF），對於電力系統不正常時的失效率而言，並沒有很重要的影響。對於具有自我診斷功能的電驛，MTBF 較長的好處，僅在於減少電驛的汰舊換新及修理。也就是說，較長的 MTBF 可以節省修理時間及更新的經費；而自我診斷功能卻可以節省定期維護的時間。

傳統的電驛並未具有自我診斷功能，為了降低系統不正常時的失效率，採用較長的 MTBF 電驛並縮短定期維護週期是必要的。

傳統式保護電驛定期維護週期到底多長才是合理，從模式分析的結果可以得知，不管被保護設備的故障率或是電驛的 MTBF，一般皆在一萬小時左右，這是一個理想維護週期，也印證於某些廠牌的傳統

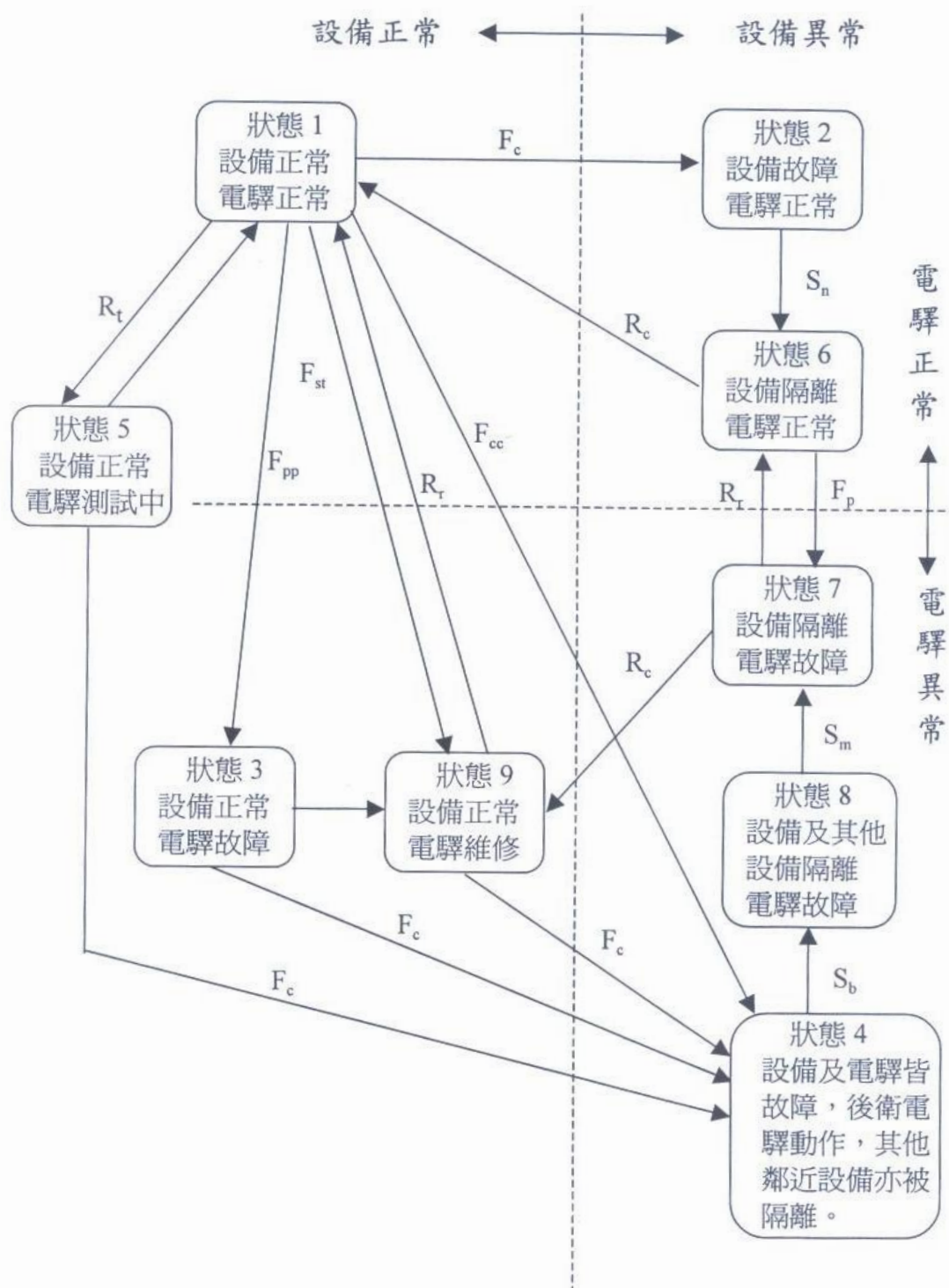
式電驛使用手冊所建議的測試週期。其次我們也在曲線圖上發現一個現象，就是在超過了最佳維護週期之後，則不管是十萬小時或百萬小時維護一次，對於電力系統的不正常時失效率差別不大。但是我們也不能小看那微乎其微的機率，因為保護電驛最主要的功用就在於保護那極小的事故機率。至於是否拉長電驛維護週期，則要看該電驛所在電力系統有沒有承擔電驛誤動作風險的能力。也許甲系統能，但乙系統可能就沒有那個能力。所以根據電驛所在電力系統的特性、電驛測試人員的素質、後勤電驛維修的能力等，訂定最適當的維護週期並確實據以執行，是確保電力系統安全運轉的必要工作。

綜合上述分析，對於重要設備的保護電驛，如為傳統式者其維護週期以一年較為恰當，其他若電驛之故障率紀錄上不是特別差的，則三至五年的維護週期均無不可；數位式保護電驛雖因具有自我診斷功能，維護週期可以定長一點，但因自我診斷的範圍並非百分之百，距離真正免維護的理想目標尚有一段距離，尤其是電驛的輸入端訊號（電壓、電流）及輸出端訊號（跳脫、警報等），最好乃需每年執行一次檢驗。另外對於已到故障高峰期的電驛，定期維護的週期要更為密集，以其能及時發現不良電驛，防範事故於未然，這才是電驛定期維護的最高原則。

定期維護的目的
及早發現問題
解決問題

絕不是製造問題！

提昇技術講求方法



圖一、保護電驛及被保護設備關係模式

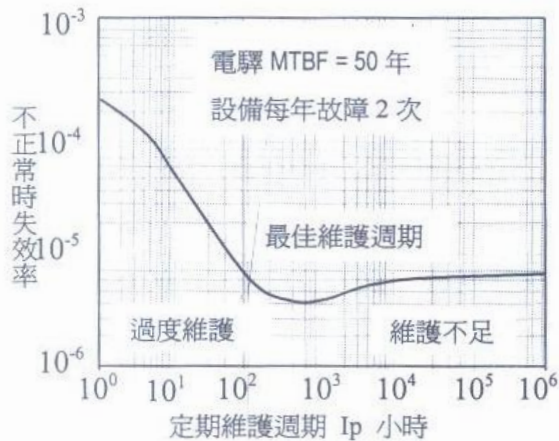


圖 2. 電驛最佳維護週期

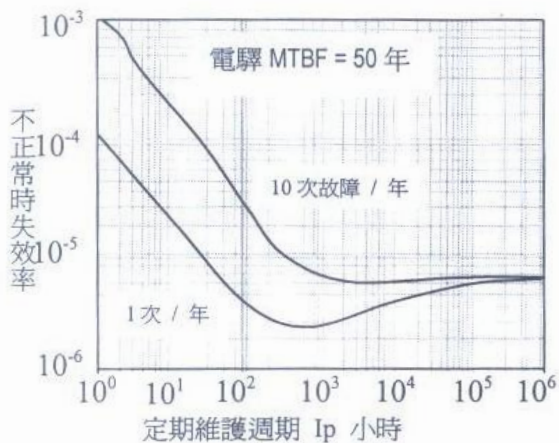


圖 3. 被保護設備每年故障次數對傳統電驛選擇最佳維護週期之影響

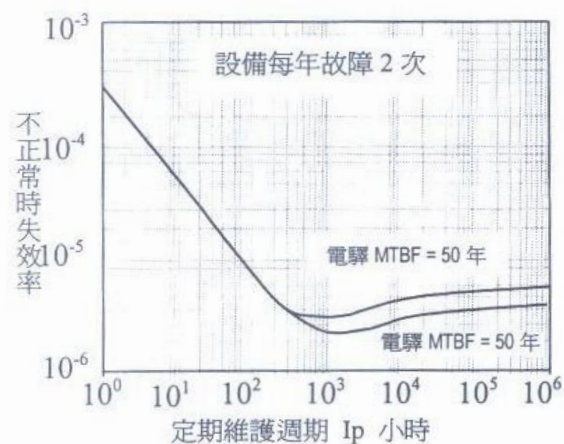


圖 4. 電驛的故障週期對於選擇最佳維護週期的影響

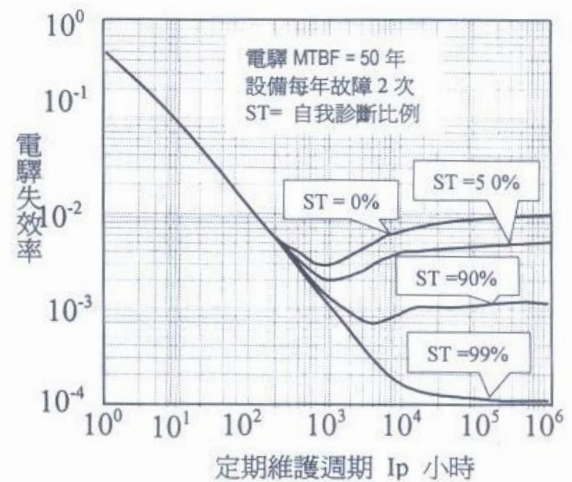


圖 5. 電驛自我診斷比例對於電驛可用率的影響

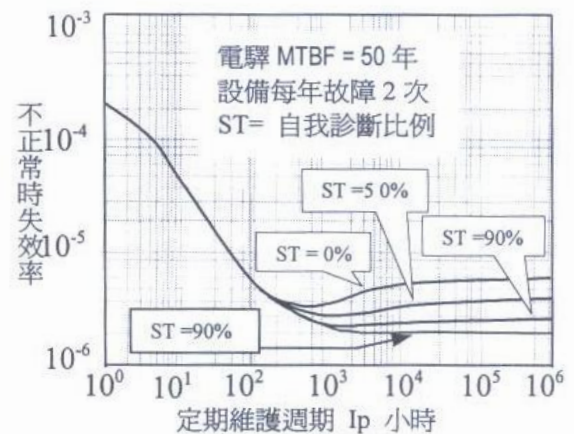


圖 6. 電驛自我診斷比例對於選擇最佳維護週期的影響

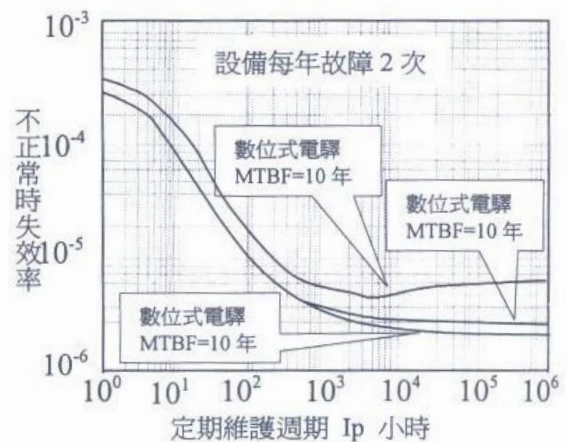


圖 7. 傳統式電驛與數位式電驛之比較