

風險值在機組維修排程上之應用

The VaR Applications for Unit Maintenance Scheduling

張振松 Chen-Sung Chang
南開技術學院資訊管理系

Department of Information Management, Nan-Kai College

(Received June 18, 2003; Final Version November 4, 2004)

摘要：風險管理 (Risk Management, RM) 是專案管理九大知識領域中最受到學界和業界之青睞，並成功應用於不同產業的方法。風險值 (Value at Risk, VaR) 是風險管理之重要量化基礎，為商業界和工業界風險管理之新標竿；透過風險值使得決策和管理都能清楚掌握風險。電力供應事業是攸關國計民生的產業，須加強風險管理；尤其會影響電力供應之機組維修排程 (unit maintenance scheduling, UMS) 決策，更須做全方位的風險分析。所以，本文特經由數理推演，發展出應用於機組維修排程之風險值 (VaR) 評估模式，並將其應用到機組維修排程決策上以確保電力供應之安全性。最後，本文將提出的方法，透過IEEE-RTS之實際測試，以證實其發展潛力與實用價值。

關鍵詞：風險管理、風險值、等風險模式、機組維修排程

Abstract : The risk management (RM) is the most favorite topic of nine project management domains in the academic and business societies. It has been successfully applied in various topics of business and industry management. Value at Risk (VaR) is the most important quantifiable base for risk management. Namely, it becomes a new benchmark on risk management in business and industry societies. We can use VaR to master risk for decision and management domains. The Power Provider Enterprise (PPE) is a special enterprise that is relationship to the national economy and livelihood of the masses, it is must be to reinforce the risk management. Specially, the unit maintenance scheduling (UMS) of Power Provider Enterprise could be influence on the power supply, must be used the overall

risk analysis in it. In this paper, the VaR application for unit maintenance scheduling is presented, by mathematical deduce that risk analysis of UMS, and a risk assessment model be developed to keep the security of power systems. Finally, the method of the paper has been tested on IEEE Reliability Test System (RTS), to indicate its high potential and practical values.

Keywords : risk management, value at risk, leveled risk model, unit maintenance scheduling

1. 導論

對企業而言，專案管理（Project Management, PM）可以說是一門通用的學問，用於不同領域與產業，是控制進度與成本的重要方式（The PMI Standards Committee, 1995）；而專案管理九大知識領域中之風險管理（Risk Management, RM）更是受到學界和業界之青睞，將其理論應用於不同領域且加於實踐。

近年來在商業界最重要的革命性議題即是風險值（Value at Risk, VaR）方法論的誕生，它大幅修正過去僅以獲利數字評量績效的觀念，透過風險值使得投資人和管理者對於那部位的風險都能清楚掌握（Duffie and Pan, 1997）。風險值有學者將其稱為風險值革命（VaR Revolution）（Holton, 1998），也有人形容為風險管理新標竿（Jorion, 1997），是風險管理最重要量化的基礎，其迅速發展的趨勢和影響力可見一斑。同樣地，工業界對風險管理也愈加重視；其中和商業界的風險值（VaR）同可量化來評估風險之有關風險分析在工業界更是受到重視。尤其對於一個關係著國計民生之電力事業來講，一個量化之風險評估更是重要。

「電」是目前人類生活上最重要之能源，若是電力供應出問題，不僅影響人民生活更影響到國家的生產力（Wood and Wollenberg, 1996）。所以，電力供應事業必須對任何會影響電力供應之情況做全方位的風險分析。以往有關電力系統之風險管理著眼於機率性之解析風險度問題，疏忽了額度性的風險評估，尤其是全年度之額度風險評估。

電力事業之風險分析除了與需求面有密切的關係之外，與本身事業的營運狀況也有密切的關係；特別是電力系統的全年度維修排程（Wang and McDonald, 1994）。因為維運管理人員在處理維修問題時，若同時有機組故障停機，將會使得機組調度流程失調，增加操作成本及維修成本，影響供電的安全性（Lin *et. al.*, 1992）。可見不佳的風險評估將導致系統停電的機會增加；系統停電所增加的社會成本損失不但巨大且難以精確評估。因此，電力系統政策決策與規劃人員，不仅需要系統之機率性風險度大小，更需要全年度之額度性的風險值，來進行規劃與設計所需營運方針，以做為最佳化的機組維修排程衡量指標。

從以往的文獻 (Zura et al., 1975; Satoh and Nara, 1991; Lin et al., 1992) 可以發現，有關電力系統之機組維修排程 (unit maintenance scheduling, UMS) 之文章，並無加入風險管理之觀點。因此，本文特採用商業界最重要的革命性議題—風險值 (VaR) 之論點，將其應用到機組維修排程上，以讓電力系統之管理與決策不再是只考量較不實際之機率評論方式，而是實地將風險量化的風險值評估型態，來降低系統運轉風險，增強系統之安全性。

本文共分爲五節，其內容綱要如下：第二節介紹機組維修之風險分析；第三節則推導並定義出風險值評估模式；接著，第四節將所提出風險值評估模式應用到機組維修排程決策上。而第五節是以IEEE可靠度測試系統來實際測試所提出方法。最後，針對本文之特點於第六節作一結論；並說明本研究之著眼點。

2. 機組維修排程之風險分析

在採用風險值來衡量機組維修之排程對電力供應之影響之前；本節將先行介紹一般專家學者如何利用機率評估模式來分析機組維修之風險度。

從事電力系統機組維修風險評估時，最重要的事情是評估機組故障率的正確性，若機組維修故障率不正確，則求得之風險評估皆失去其意義。計算電力系統機組維修之風險度需要各個機組之有關常數，通常這些數據的來源須由長期使用之經驗記錄求得，以便電力系統機組維修之排程規劃時應用。加上，對於電力系統機組維修排程風險之評估，其中有許多不確定因素需要考慮，方能尋求合理的改善，所以必須仰賴機率的方式才能做較妥當評估。假若有量化之依據，便可使設計工作易於施行。所以，在定義機組維修之風險值之前，先以機率分析方式先來評估以風險值量化之前的電力供應系統機組維修之風險度。

以機率作為電力供應系統機組維修之風險度分析，可以將機組的運轉情形以圖1來表示 (Zura et al., 1975; Satoh and Nara, 1991; Wang and McDonald, 1994)。而進行機組維修之風險度分析時，為簡化問題，機組的故障率 ($\lambda(t)$) 和修護率 ($\mu(t)$) 皆設為固定常數。因此，機組的隨機故障和修理可被定義成兩種狀態的“隨機過程”(Stochastic Process) 之馬可夫程序 (Markov Process) (Wang and McDonald, 1994)，其隨機過程的狀態空間圖如圖2所示。

由發電機組之狀態空間圖，說明了機組的可能狀態 U (有效狀態，或對應於最大可用容量之狀態)，會隨機轉移至狀態 D (失效狀態，或對應於最大不可用容量之狀態)，反之亦然。

接著，學者專家依上述機組運轉情形，定義出機組之風險度的相關數學模式 (Wang and McDonald, 1994)：

(1) 假設正在運作中的電力系統之某一個機組是否能夠繼續工作之能力，也就是該機組之風險度，可用兩種機率分配函數來表示：

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (1)$$

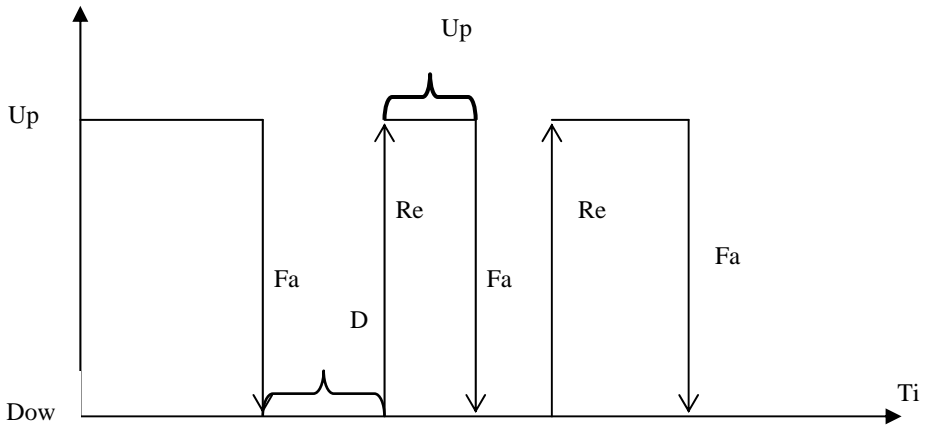


圖1 電力系統機組運轉情形

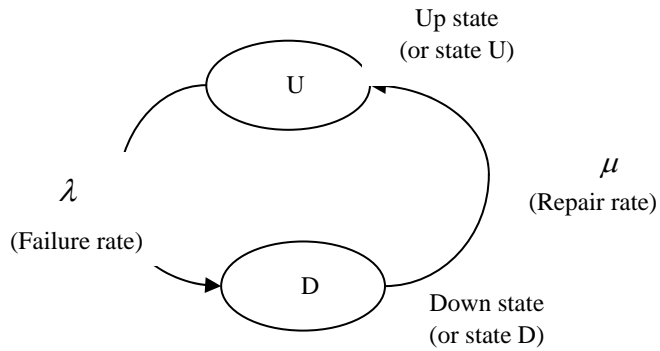


圖2 發電機組狀態空間圖

(設 $\lambda(t) = \lambda = \text{常數}$; $\mu(t) = \mu = \text{常數}$)

其中: $F(t) = P(T \leq t) \quad t \geq 0$

$R(t) = P(T > t) \quad t \geq 0$

$F(t)$ = 故障機率分配函數

$R(t)$ = 運轉機率分配函數

T = 隨機變數 (T_u : Up-time; T_D : Down-time)

因此，故障機率密度函數

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2)$$

(2) 定義電力系統機組的故障率如下:

$$\begin{aligned} \text{故障率 } \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} [P(t < T_U \leq t + \Delta t | T_U > t)] \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \left[\frac{P(t < T_U \leq t + \Delta t)}{P(T_U > t)} = \frac{f_U(t)}{R_U(t)} = -\frac{1}{R_U(t)} * \frac{dR_U(t)}{dt} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

將公式(3)兩邊積分:

$$R_U = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

設 $\lambda(t) = \lambda = \text{常數}$ ，則:

$$R_U = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

將式(4)代入式(3)得:

$$f_U(t) = \frac{dF_U(t)}{dt} = -\frac{dR_U(t)}{dt} = \lambda * e^{-\lambda t} \quad (5)$$

(3) 定義電力系統機組的平均故障時間 (Mean Time to Failure, MTTF) 為:

$$MTTF = E(T_U) = \int_0^{\infty} t f_U(t) dt = \int_0^{\infty} (t * \lambda e^{-\lambda t}) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (6)$$

(4) 同理定義機組的修護率為 $\mu(t)$ ，則電力系統機組的平均修護時間 (Mean Time to Repair, MTTR) 為:

$$MTTR = E(T_D) = \int_0^{\infty} t f_D(t) dt = \int_0^{\infty} (t * \mu e^{-\mu t}) dt = \frac{1}{\mu} \quad (7)$$

其中:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} [P(t < T_D \leq t + \Delta t | T_D > t)]$$

$$R_D = e^{-\mu t}$$

$$f_D(t) = \frac{dF_D(t)}{dt} = -\frac{dR_D(t)}{dt} = \mu * e^{-\mu t}$$

3. 風險值與等風險模式

風險值 (VaR) 為風險管理新標竿，是風險管理最重要量化的基礎。如今工業界對風險管理也愈加重視；尤其對於一個關係著國計民生之電力事業來講，有關機組維修排程之風險值更要注重。所以，本節特依據機組的物理特性，來定義一個新的機組維修之風險值。

3.1 機組維修之風險值

將風險值應用至機組維修上時，可解釋為：發電機之機組維修時電力供應系統維持連續供電的能力；因此，風險值可以看成與電力系統的備轉容量有關。若風險值越高，則系統的備轉容量越不足，停電的機率增加；反之，風險值越低，則系統備轉容越充足，停電機率減少。故上節機組之風險度之機率分析模式可以每一時間帶（一週為單位）之風險值大小（風險值走勢圖）來衡量機組維修之風險度。

電力系統的備轉容量為系統預備容量。且備轉容量一定要大於系統之所有設備之裝置容量減去全年中之最大負載(尖峰負載)。故任一發電機組之故障與維修，都造成電力系統停電之風險。故機組維修時之風險度和系統預備容量成反比情況。且因人力資源和系統供電安全考量，原則上一個維修群無法在一個時間帶內，進行同時二部機組維修；且同一電廠中，應避免二部機組同時進行維修。

因此，衡量機組維修之風險度之必需考量之衡量構面有電力系統本身之預備容量和機組維修時間帶。其中，系統的預備容量為系統的裝置容量減去最大負載，而最大負載為一年當中之尖峰負載之最大值。但是，機組維修風險評估之時間衡量構面之時間帶為一週，故在一週中之尖峰負載必需加以考慮。

在此本文依據電力系統的特性，定義機組維修之風險值， $R(X)$ ，如下式所示：

$$R(X) = R(X > C - L) \quad (8)$$

其中， X = 系統的預備容量

C = 系統的裝置容量

L = 最大負載(尖峰負載)

R_i = 第*i*個時間帶的風險值 $i \in T_p, T_p = 1, 2, \dots, T$

R_j = 第*j*個時間帶的風險值 $j \in T_p, T_p = 1, 2, \dots, T$

T_p = 時間帶的總天數；本文之機組維修排程之風險評估程序是以一週為其時間架構

在機組維修時，隨機性之停機事件對系統的風險度的影響和每日負載變化是要考慮的。故吾人可以再定義一個風險特性係數 (risk characteristic coefficient)， m ，為系統風險度改變量比為 e 時之機組停機容量之變化量。則風險值和風險特性係數之近似關係可用下式表示(參見附錄A)：

$$R(X) = \alpha * e^{-\frac{X}{m}} \quad (9)$$

其中， α = 常數， m = 風險特性係數。接著，請參見附錄A中仿照早期美國GE的研究員 Garver (1966) 介紹方式，利用指數函數來近似風險值，求得風險特性係數(m)之方式。

在風險特性係數(m)求得之後，就可以計算機組的有效負載容量(C_e)及系統的等效負載(L_e)，如下節中式(11)和式(12)所示，而推導過程請參見附錄B。在機組維修排程之風險值定義完成後，即可依據美國GE的研究員 Garver 所提出之方法 (Garver, 1972)，來建構一個適合全年度風險評估與決策的風險模式—等風險模式。

3.2 機組維修之等風險模式

通常，機組維修排程之風險評估程序是以一週為其時間架構；而一般機器之維護排程管理也是以週為單位，故風險管理觀念適用於電力系統之機組排程。事實上，由於每週都能統計風險值，故在做出全年度之最佳機組維修排程決策時，其風險值是可以暫定相等的，也就是利用等風險模式 (Levelized Risk Model) 來進行機組排程之風險度分析。所以說，等風險模式的精神就是每一時間帶的最初風險值皆令其相等，再以系統之實際情形求其風險值。所以，修正式(8)再定義等風險模式之機組維修之風險值， $R_i(X)$ ，如下式所示：

$$R_i(X) = P(X) = P(C_i - L_e) * T_p = R(C_i - L_e) \quad (10)$$

其中， T_p = 時間帶的總天數(本文為七天)； C_i ：系統的裝置容量； $C_i = \sum_{i=1}^N C_{ei}$ ， N = 機組數目(本文為32)， C_e ：機組的有效負載容量； L_e ：系統的等效負載。且 $R_i = R_j$ ，其中 R_i = 第*i*個時間帶的風險值； R_j = 第*j*個時間帶的風險值。

在定義完成等風險模式之風險值後，則等風險法擁有兩特點：(1)在處理機組的維修時，隨機性的停機風險值被考慮了；(2)每日的負載情形能被考慮。若將等風險模式應用到機組維修排程管理決策上，必需先了解機組的有效負載容量(C_e)和系統的等效負載(L_e)之觀念。

本節最後只列出機組的有效負載容量(C_e)和系統的等效負載(L_e)之計算式如下所示。

(1) 機組的有效負載容量(C_e):

$$C_e = C - m \ln\{p + q * e^{-\frac{C}{m}}\} \quad (11)$$

其中： $p = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$ = 發電機組的可用率； $q = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR}$ = 發電機組強迫停機率； X

= 系統的預備容量； C = 系統的裝置容量； m = 風險特性係數； T_p = 時間帶的總天數。

(2) 系統的等效負載(L_e):

$$L_e = m \ln \left\{ \sum_{j=1}^{T_p} e^{m \frac{L_j}{T_p}} \right\} \quad (12)$$

其中: m =風險特性係數; T_p =時間帶的總天數; L_j =一時間帶中第 j 天的最大負載(尖峰負載)。

本文中,有關機組的有效負載容量 C_e 及系統的等效負載 L_e 推導過程如附錄B所示。而詳細描述可參閱文獻(Garver, 1966, 1972)。

4. 等風險模式之機組維修排程決策

一般而言,維修排程處理問題的原則為:週期性地安排維護工作及當隨機性故障發生後,系統能快速有效地恢復工作(Sheble, 1990)。但是,電力系統之機組維修排程問題攸關國計民生,必需和系統的風險問題擺在一起共同來研究的。

所以,在電力系統機組維修排程的問題中,以經濟與安全為最主要考量因素(Wood and Wollenberg, 1996; Ma and Shahidehpour, 1999)。因此,本文設定系統之風險值在能維持在我們所希望之合理範圍內,並以「發電成本加維修成本為最小」,為機組維修排程管理決策之目標。所以,將等風險模式應用到機組維修排程問題上時,則其數學式表示如下:

(1) 目標函數

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \{ [U_{ij} * FC_i(P_{ij})] + m_i(1 - U_{ij}) \} \quad (13)$$

其中: N = 機組數目(本文為32)

M = 維修時間帶(本文為52)

i = 第 i 部機組

j = 第 j 個時帶

U_{ij} = 第 i 部機組、第 j 個時帶的狀態變數;

$U_{ij} = 0$ 表示機組維修狀態

$U_{ij} = 1$ 表示機組發電狀態

$FC_i(\bullet)$ = 第 i 部機組的燃料成本函數

P_{ij} = 第 i 部機組、第 j 個時帶的輸出功率

m_i = 第 i 部機組的維修成本

(2) 風險限制 (risk constraint)

$$X_{\min} \leq (CT_j - L_{ej} - \sum_{i=1}^N C_{eij}) \leq X_{\max} \quad (14)$$

其中： X_{\max} = 系統需維持的最大預備容量(等風險模式)

X_{\min} = 系統需維持的最小預備容量(等風險模式)

L_{avj} = 第 j 個時帶的年平均尖峰負載

等風險模式之限制條件共有兩個邊界， X_{\max} 和 X_{\min} 。其中 X_{\max} 設定目的，乃在於求得系統的風險特性係數(m)，進而可以獲得系統全年的平均風險值。而 X_{\min} 設定之目的在於使系統全年的風險值能維持在一定的水平之上。

5. 測試與結果

在本節中，將把所提出的機組維修之風險值評估模式，透過一個實際電力系統之測試，來證實其發展潛力與實用價值。由於所提出的是一嶄新的風險值評估模式，對於目前台灣地區使用之結構複雜且龐大之台電系統，較難衡量出其可靠度。故本文是以一般學術界所使用之模組化系統-IEEE之可靠度測試系統 (Reliability Test System, RTS) 來測試所提出之方法。測試程式是使用 C++及MATLAB兩種語言寫成且適用於個人電腦與工作站 (Mathews and Fink, 2002; Press and Teuko, 2002)。

5.1 IEEE 可靠度測試系統 (RTS) 模型

本節只介紹本文測試模型所需之基本資料、機組資料和負載資料，其他更詳細資料請參閱文獻 (IEEE, 1979)。

- (1) RTS之基本資料如表1所示。
- (2) RTS之機組資料如表2所示。
- (3) 負載資料: 針對本文機組維修風險評估之時間衡量構面中時間帶為一週，故在一週中之最大負載必需加以考慮。所以，負載資料應包括 1)一週中，每日尖峰負載 (最大負載)，如表3所示；和 2)一年中，每週尖峰負載 (最大負載)，如表4所示。

表1 RTS之基本資料

裝置容量	3405 MW
年尖峰負載 (最大負載)	2850 MW
年需求電能	15300GWH/YR
系統機組數	32

表2 RTS機組資料 (以MW表示)

機組型式	燃料型式	機組容量 (MW)	機組數數目	總裝置容量 (MW)	百分比(%)
火力機組	燃油	12	5	60	28
		100	3	300	
		197	3	591	
	燃煤	76	4	304	37
		155	4	620	
		350	1	350	
	汽渦輪機	20	4	80	2
核能機組	核能	400	2	800	24
水力機組	水力	50	6	300	9

表3 RTS每週的日平均尖峰負載 (百分比)

星期	尖峰負載
星期一	93
星期二	100
星期三	98
星期四	96
星期五	74
星期六	77
星期日	75

表4 RTS之每週尖峰負載 (百分比)

週次	尖峰負載	週次	尖峰負載	週次	尖峰負載	週次	尖峰負載
1	80.2	14	75.0	27	75.5	40	72.4
2	90.0	15	72.1	28	81.6	41	74.3
3	87.8	16	80.0	29	80.1	42	74.4
4	83.4	17	75.4	30	88.0	43	80.0
5	88.0	18	83.7	31	72.2	44	88.1
6	84.1	18	87.0	32	77.6	45	88.5
7	83.2	20	88.0	33	80.0	46	90.9
8	80.6	21	85.6	34	72.9	47	94.0
9	74.0	22	81.1	35	72.6	48	89.0
10	73.7	23	90.0	36	70.5	49	94.2
11	71.5	24	88.7	37	78.0	50	97.0
12	72.7	25	89.6	38	69.5	51	100.0
13	70.4	26	86.1	39	72.4	52	95.2

5.2 測試結果

首先可利用附錄A所介紹方式，來求得等風險模式中之風險特性係數 m ，求得之 m 值為 116.8；並設定其 X_{\max} 和 X_{\min} 兩個邊界大小，分別選定為 1500MW 和 680MW。所以，在進行機組維修排程之決策時有關風險評估之所有相關參數則如表5所示。

在表5中之機組維修排程之風險評估程序之每一時間帶 T_p 是以一週為其時間單位；也就是機組維護排程管理也是以週為單位。但因為事實上，在決定機組維修排程決策時，是由每週統計之風險值，再做出全年度之最佳機組維修排程決策，所以本文採用等風險模式下之風險值評估，將系統總時間帶 M T 設定為 52 週（全年度）。而由表一得知：本測試系統之總機組數為 32 組；總裝置容量 C_T 為 3405MW，最大負載（年尖峰負載）為 2805MW。

接著再利用式(11)和式(12)分別求得有效負載容量 C_e 和等效負載 L_e 之大小，如表6和表7所示。

接著，利用本文所提出等風險模式下之求解機組維修風險值的方法(3.2節)，可得到各時間帶之風險值 ($R(X)$) 之大小，如表8所示。

在表8中可以看出風險值 ($R(X)$) 愈高，則預備容量 (X) 愈低；也就是說當一個系統之風險值愈高則其預備容量將愈低，機組停電或跳機的機會將愈大，系統愈不安全。其每一時間帶之相對應的風險值和預備容量走勢圖，則如圖3所示。

表5 等風險模式相關參數

參數名稱	符號	設定值
系統總時間帶	M, T	52 (week)
每一時間帶	T_p	7 (day)
機組數	N	32
RTS總裝置容量	C_T	3405
RTS年尖峰負載	P_{peak}	2850
最大預備容量	X_{\max}	1500
最小預備容量	X_{\min}	680
風險特性係數	m	116.8

表6 RTS之有效負載容量(C_e)

機組大小 (MW)	12	20	50	76	100	155	197	350	400
C_e	11.74	17.83	49.37	73.87	93.84	142.72	173.76	241.98	222.64

表7 RTS之等效負載(L_e)

週次	L_e (MW)	週次	L_e (MW)	週次	L_e (MW)	週次	L_e (MW)
1	2341.62	14	2030.93	27	2044.78	40	1958.92
2	2447.20	15	1950.62	28	2213.92	41	2011.54
3	2386.06	16	2169.53	29	2172.31	42	2014.31
4	2263.87	17	2042.01	30	2391.62	43	2169.53
5	2391.62	18	2272.20	31	1953.39	44	2394.40
6	2238.31	18	2363.84	32	2102.98	45	2405.51
7	2258.32	20	2391.62	33	2169.53	46	2472.22
8	2186.17	21	2324.95	34	1972.77	47	2558.42
9	2003.23	22	2200.05	35	1964.46	48	2419.41
10	1994.92	23	2447.20	36	1906.34	49	2563.99
11	1934.01	24	2411.07	37	2114.07	50	2641.90
12	1967.23	25	2436.08	38	1878.67	51	2725.00
13	1903.57	26	2338.84	39	1958.92	52	2591.81

表8 RTS之風險值($R(X)$)

時間帶 (week)	預備容量 X	風險值 $R(X)$	時間帶 (week)	預備容量 X	風險值 $R(X)$
1	1045.54	0.00196	27	1112.57	0.00110
2	939.96	0.00483	28	943.43	0.00469
3	876.21	0.00834	29	985.04	0.00329
4	998.40	0.00293	30	839.61	0.01141
5	870.65	0.00875	31	1174.94	0.00065
6	978.96	0.00346	32	1025.35	0.00233
7	924.04	0.00554	33	967.86	0.00381
8	996.19	0.00299	34	1164.62	0.00071
9	1035.91	0.00212	35	1030.20	0.00223
10	1044.22	0.00198	36	1108.28	0.00114
11	1080.63	0.00145	37	900.55	0.00677
12	1047.41	0.00193	38	1067.74	0.00162
13	1111.07	0.00112	39	1011.99	0.00261
14	1008.21	0.00269	40	1011.99	0.00261
15	1182.36	0.00061	41	1008.74	0.00268
16	1012.83	0.00259	42	1005.97	0.00275
17	1140.35	0.00087	43	1161.59	0.00072
18	910.16	0.00624	44	936.72	0.00491
19	898.43	0.00690	45	925.61	0.00546
20	870.65	0.00875	46	932.78	0.00514
21	937.32	0.00494	47	846.58	0.01075
22	1012.84	0.00259	48	985.59	0.00327
23	908.42	0.00633	49	841.01	0.01128
24	944.55	0.00465	50	763.10	0.02198
25	919.54	0.00576	51	680.00	0.04477
26	892.39	0.00727	52	813.19	0.01431

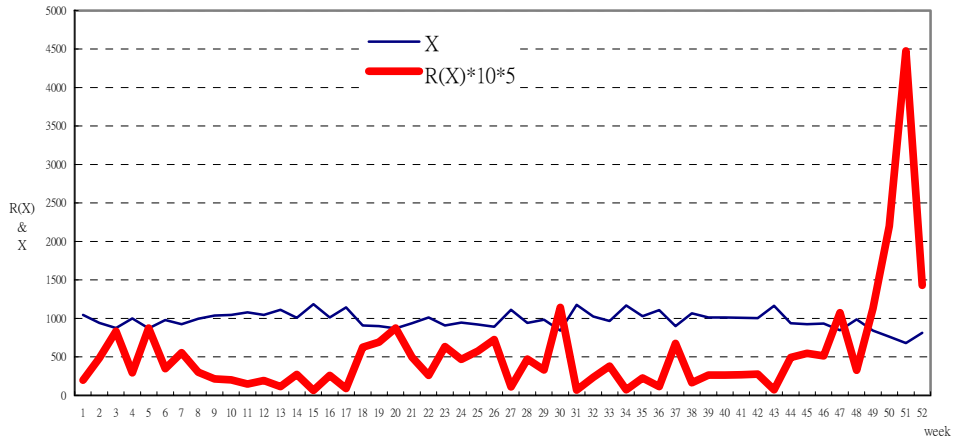


圖3 風險值 $R(X)$ 和預備容量 X 走勢圖

(為方便比較: $R(X) \times 10^5$ 倍)

由圖3或表8可看出，其中第30週之風險值 ($R(X)$) 較高，是因為年中機組檢修；而全年度中之第49週至第52週之一個月之風險值 ($R(X)$) 特別高，乃因十二月份年度歲修加上美國冬季用電量高之故，若換成在台灣地區，因冬季用電量低，則無此情況發生。

除了上述風險值 ($R(X)$) 會升高之原因外，若是核能機組與大型火力機組維修或故障時，風險值也會變大的。因此，由圖3可以清楚看出每一時間帶之風險值變化情形；也就說可以得到全年度之系統風險評估了。

在得到全年度之系統風險評估以後，系統管理者在規劃全年度之機組維修排程時，即可參考全年度之風險值 $R(X)$ 和預備容量 X 走勢圖做出最佳的機組維修排程決策，可得到在等風險模式之最佳化機組維修排程決策，如表9之等風險模式機組維修排程決策所示。所以，將風險值(VaR)應用到機組維修排程上，可預測出系統之安全性，對管理決策或系統規劃都有莫不助益。

6. 結論與討論

6.1 結論

針對本文所提出之將風險值 (VaR) 應用到機組維修排程的特點，列出以下幾項結論：

- (1) 吾人在進行機組維修排程決策時，包含許多不確定因素，包括機組與負載等諸多方面；所以，需加入風險評估之考量，對系統之安全性才有正面的作用。
- (2) 本文使用等風險模式之目的，乃在於使系統的風險度維持在一定範圍內，增加機組可用率，減少機組故障之發生，降低社會成本。

表9 等風險模式機組維修排程決策

機組 編號	機組 容量	維修期間 (week)	維修時間帶	機組 編號	機組 容量	維修期間 (week)	維修時間帶
1	20	2	01~02	17	12	2	31~32
2	20	2	31~32	18	12	2	31~32
3	76	3	11~13	19	12	2	34~35
4	76	3	27~29	20	155	4	03~06
5	20	2	31~32	21	155	4	19~22
6	20	2	31~32	22	400	6	07~12
7	76	3	36~38	23	400	6	13~18
8	76	3	43~45	24	50	2	09~10
9	100	3	09~11	25	50	2	14~15
10	100	3	12~14	26	50	2	22~23
11	100	3	33~35	27	50	2	24~25
12	197	4	26~29	28	50	2	31~32
13	197	4	30~33	29	50	2	39~40
14	197	4	34~37	30	155	4	38~38
15	12	2	10~11	31	155	4	39~42
16	12	2	12~13	32	350	5	38~42

- (3) 本文提出之將風險值應用到機組維修排程上，可清楚看出每一時間帶之風險值變化情形；可以預先得到全年度之系統風險評估。
- (4) 本文所提出之方法，有嚴謹之數學推導過程；且經過 IEEE-RTS 之實際測試，的確證實其深具實用價值。

6.2 討論

- (1) 在本文中所提出的機組維修之風險值評估模式，是一嶄新的風險值評估模式，對於目前台灣地區使用之結構複雜且龐大之台電系統，較難衡量出其可靠度。但希望未來能透過大量收集台電系統之實際運轉資料和模組化台電系統，以台電系統來證實所提出的風險值評估模式。
- (2) 針對機組維修排程決策而言，風險分析和成本之間存在著一種微妙關係，若要同時讓風險最低且成本也是最低是不可能的；所以，如何能兼顧兩者並取得最佳化協調是研究重點。而本文將風險值理論應用到機組維護排程上，且利用風險值作為成本目標函數之限制條件之著眼點；在於能確保系統之安全性下，求得系統整年之最低操作成本；如此不僅可節省最多的成本且能降低社會成本。

附錄 A：風險特性係數 m 之計算

本文仿照早期美國GE的研究員 Garver (1966) 利用指數函數來近似風險函數方式，來求得近似風險值和風險特性係數 (risk characteristic coefficient) m 。

首先，將機組容量大小繪在一半對數座標軸上，如圖A所示。在圖A中選擇P,Q兩點連接成一直線(即指數函數)局部近似風險值 $R(X)$ ；且風險值 $R(X)$ 和風險特性係數(m)之關係式為：

$$R(X) = \alpha * e^{-\frac{X}{m}} \tag{A1}$$

在此， α =常數， m =風險特性係數。風險特性係數(m)為系統風險度改變量比為 e 時之機組停機容量之變化量。故圖A所選擇P,Q兩點之相對應似風險值為：

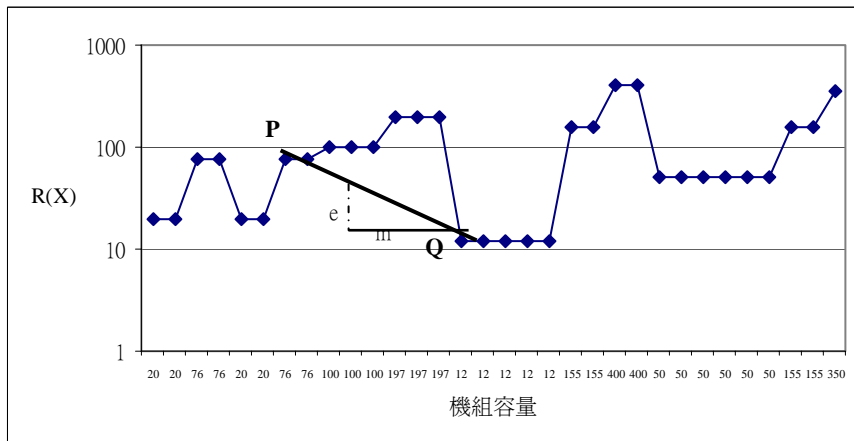
$$R(X_p) = \alpha * e^{-\frac{X_p}{m}} \tag{A2}$$

$$R(X_q) = \alpha * e^{-\frac{X_q}{m}} \tag{A3}$$

(A2)/ (A3)可得：

$$\frac{R(X_p)}{R(X_q)} = \alpha * e^{\frac{X_q - X_p}{m}}$$

$$\text{風險特性係數 } m = \frac{X_q - X_p}{\ln[R(X_p) / R(X_q)]} \tag{A4}$$



圖A 利用指數函數來近似風險值

附錄B：有效負載容量(C_e)和等效負載(L_e)之推導

(1) 有效負載容量(C_e)：

考慮新維修機組加入運轉和隨機性之停機事件對系統風險值的影響，可用以下數學式表示：

$$R(X) = p * R(X + Y) + q * R(X + Y - C) \quad (B1)$$

其中， X = 系統的預備容量

C = 系統的裝置容量

Y = 加入的新機組為維持一定風險值，所需加入系統的預備容量

p = 利用率 (Availability Rate)

q = 強迫停機率 (Forced Outage Rate, FOR)

$$p + q = 1$$

將(B1)式代入式(A1)中，可得：

$$\alpha * e^{-\frac{(X+Y)}{m}} * p + \alpha * e^{-\frac{(X+Y-C)}{m}} * q = \alpha * e^{-\frac{X}{m}}$$

$$e^{-\frac{(X+Y)}{m}} * p + e^{-\frac{(X+Y-C)}{m}} * q = e^{-\frac{X}{m}}$$

$$e^{-\frac{(X+Y)}{m}} * [p + q * e^{\frac{C}{m}}] = e^{-\frac{X}{m}}$$

$$e^{-\frac{Y}{m}} * [p + q * e^{\frac{C}{m}}] = 1$$

$$[p + q * e^{\frac{C}{m}}] = e^{\frac{Y}{m}}$$

$$\frac{Y}{m} = \ln[p + q * e^{\frac{C}{m}}]$$

$$Y = m * \ln[p + q * e^{\frac{C}{m}}]$$

$$\text{有效負載容量 } C_e = C_e - Y = C - m * \ln[p + q * e^{\frac{C}{m}}] \quad (B2)$$

(2) 等效負載(L_e)：

若考慮每日負載變化(等效負載觀念的導入)對系統風險值的影響，可用以下數學式表示：

$$R_i(X) = P(C_i - L_e) * T_p = \sum_{j=1}^{T_p} R(C_i - L_j) \quad (B3)$$

其中， T_p = 時間帶的總天數；

$C_i = C$: 系統的裝置容量；

L_e = 系統的等效負載；

L_j = 一時間帶中第j天的最大負載 (尖峰負載)。

將(B3)式代入式(A1)中，則：

$$\begin{aligned} T_p * \alpha * e^{\frac{-(C_i - L_e)}{m}} &= \sum_{j=1}^{T_p} \alpha * e^{\frac{-(C_i - L_j)}{m}} \\ T_p * e^{\frac{-C_i}{m}} * e^{\frac{L_e}{m}} &= e^{\frac{-C_i}{m}} * \sum_{j=1}^{T_p} e^{\frac{L_j}{m}} \\ T_p * e^{\frac{L_e}{m}} &= \sum_{j=1}^{T_p} e^{\frac{L_j}{m}} \\ e^{\frac{L_e}{m}} &= \left\{ \sum_{j=1}^{T_p} e^{\frac{L_j}{m}} / T_p \right\} \\ \frac{L_e}{m} &= \left\{ \sum_{j=1}^{T_p} e^{\frac{L_j}{m}} / T_p \right\} \\ \text{等效負載 } L_e &= m \ln \left\{ \sum_{j=1}^{T_p} e^{\frac{L_j}{m}} / T_p \right\} \end{aligned} \quad (B4)$$

參考文獻

- Duffie, D. and Pan, J., "An Overview of Value at Risk," *Journal of Derivative*, Vol. 4. No. 3, 1997, pp. 107-117.
- Garver, L. L., "Effective Load Carrying Capability of Generating Units," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-85, No. 8, 1966, pp. 910-919.
- Garver, L. L., "Adjusting Maintenance Schedules to Levelized Risk," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-91, No. 5, 1972, pp. 2057-2063.
- Holton, G., "Simulation value-at-risk," *Risk*, 1998, pp. 60-63.
- IEEE, "IEEE Reliability Test System," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 6, 1979, pp. 2047-2054.
- Jorion, P., *VALUE AT RISK -- The New Benchmark for Controlling Market Risk*, New-York:

McGraw-Hill, 1997.

Lin, C. E., Huang, C. J., Liang, C. C. and Lee, S. Y., "An Expert System for Generator Maintenance Scheduling Using Operation Index," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 7, No. 3, 1992, pp. 1141-1148.

Ma, H. and Shahidehpour, S. M., "Unit Commitment with Transmission Security and Voltage Constraints," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vo. 14, No. 2, 1999, pp. 757-764.

Mathews, J. H. and Fink, K. D., *Numerical Methods Using MATLAB*, Prentice Hall, 2002.

Press, W. H. and Teuko, S. A., *Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing*, Cambridge, 2002.

Satoh, T. and Nara, K., "Maintenance Scheduling by Using Simulated Annealing Method," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vo. 6, No. 2, 1991, pp. 850-856.

Sheble, G. B., "Solution of the Unit Commitment Problem by the Method of Unit Periods," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vo. 5, No. 1, 1990, pp. 257-260.

The PMI Standards Committee, *Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK)*, Project Management Institute, 1995.

Wang, X. and McDonald, J. R., *Modern Power System Planning*, McGraw-Hill, 1994.

Wood, J. A. and Wollenberg, B. F., *Power Generation, Operation & Control*, Jon Wiley & Sons, 1996.

Zura, H. H. and Qiu, V. H., "Generation Maintenance Scheduling via Successive Approximation Dynamic Programming," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 5, 1975, pp. 665-671.