

APC Symmetra MW 電源系統可靠性分析

第 109 號白皮書

版本 1

作者 Stephen Fairfax, M Technology, Inc.
Neal Downing, M Technology, Inc.
Dan Healey, M Technology, Inc.

> 摘要

MTechnology 有限公司 (MTech) 對施耐德旗下 APC 的 Symmetra MW UPS 進行了可靠性定量分析。該研究採用概率風險評估 (PRA) 方法計算了超過 680,000 種潛在故障模式的機率。該數學方法說明了故障率和元件性能的不確定性，並在每一系統元件對整體故障風險的貢獻率方面提供了詳細的指導。此研究包括對系統體系結構、元件選擇、控制系統、製造規範以及內部和外部故障回應等方面進行的詳盡分析。研究表明，在採用冗餘功率段運行時，系統平均故障間隔時間 (MTBF) 可以超過 100 萬小時。此資料包括所有設備故障，包括因 APC 無法控制的原因造成的故障，如蓄電池廠或公共電力設施的故障。

目錄

發現	2
系統說明	2
小型功率模組的優勢	3
模組性對可靠性的意義	4
可用性優勢	6
故障樹分析結果	6
冗餘的優勢	8
結論	9
資源	9
附錄	10

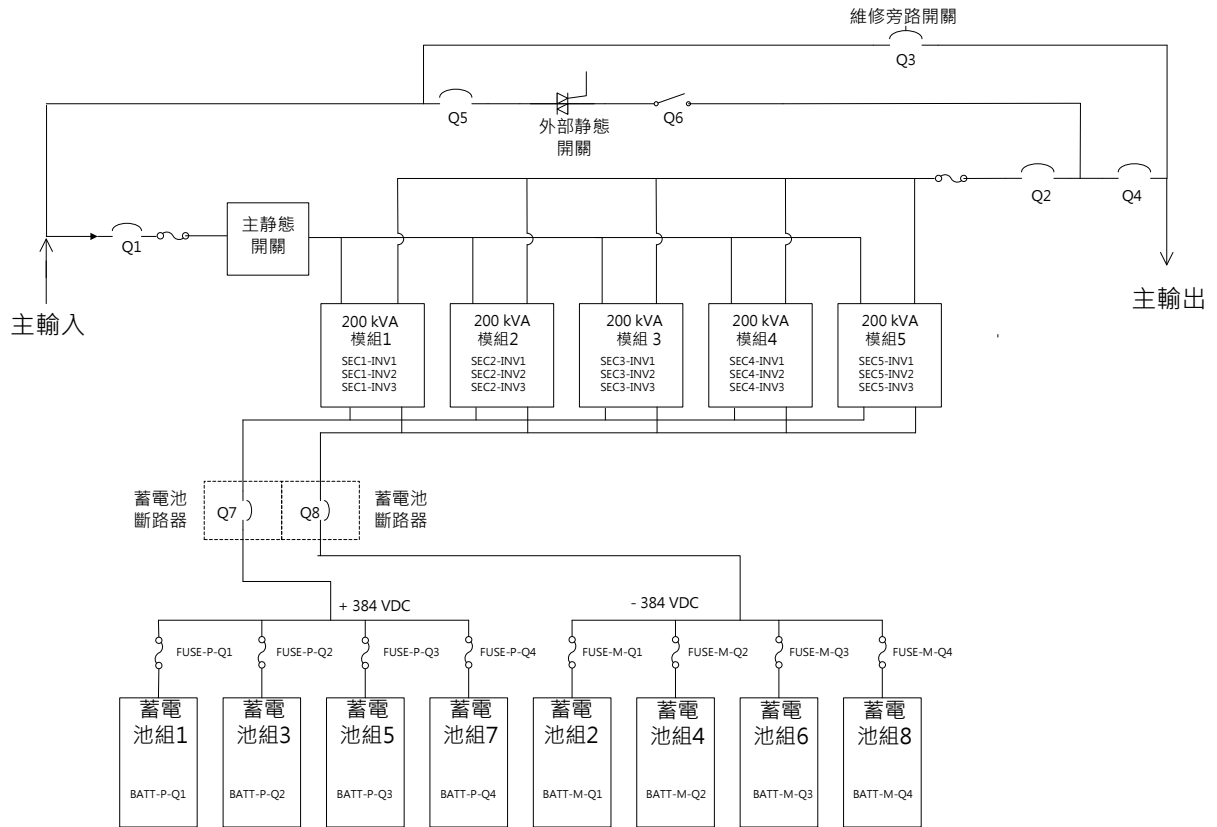
發現

1. Symmetra MW 的可靠性至少與額定功率類似的雙轉換式 UPS 相當，在採用冗餘功率段運行時，其預期平均故障間隔時間（MTBF）約為 100 萬小時。此資料包括 UPS、蓄電池、靜態旁路及公共電力設施故障的影響，即使在故障最終原因不受 APC 無法控制時亦如此。MTech 計算 MTBF 的方法應反映了具有知識和能力的客戶在運行 Symmetra MW 時可能遇到的情況。本研究中定義的故障涵蓋了因任何原因造成關鍵負載供電丟失的所有情況。
2. 系統具備高度的冗餘性，除輸入匯流排、輸出匯流排和輸出斷路器的災難性故障之外，不存在任何單一故障點。這些故障模式存在於任何大型 UPS 中，儘管它們經常被忽略或低估。Symmetra 的設計和試驗進一步顯著降低了這些不常見故障模式的可能性。
3. 冗餘、模組化設計提高了系統可靠性和可用性。系統的可靠性高於其主要元件的可靠性。對功率模組及其它主要部件計算出的 MTBF 與競爭對手宣稱的水準類似。
4. 在具有一個冗餘功率段的單個 Symmetra MW 系統中，最大的故障因素在於要求多數維修工作在系統處於維護旁路時進行，因為在系統處於旁路期間發生的電力設施故障將導致關鍵負載掉電。
5. 縮短維修時間可以減少負載承受電力設施故障的時間，從而可以降低這種風險。模組化設計可對幾乎所有主要元件實現快速、低風險的替換。
6. 冗餘的逆變器部分（如 1 MW 的系統，負載小於 800 kW）可顯著降低負載掉電的風險，其可能性約為非冗餘式配置的 1/7。
7. 通過詳細分析反對 Delta 轉換在線式 UPS 的意見，可以看出，其中多數是沒有價值的，其餘則是設計選擇而非基於拓撲結構的結果。參見附錄 A 中關於此問題的更多資訊。
8. 相比效率較低的雙轉換式設計，Delta 轉換在線的高效率所發的熱量較少，元件工作溫度會顯著降低。工作溫度升高幾乎會使所有元件的可靠性都大大降低。我們的研究未包括這一重要因素的影響，因為我們缺少關於競爭對手產品典型元件工作溫度的定量資料。這意味著我們的結果可能是保守的，Symmetra MW 系列產品的 MTBF 將很有可能大大超出我們的預期。

系統說明

APC Symmetra MW 是一種 Delta 轉換在線式不斷電供應系統（UPS）。Symmetra MW 可作為單一系統被配置為支援 400 kW 至 1.6 MW 的負載，也可採用多台 Symmetra MW 並聯方式支援更大的負載（我們的研究不會檢查並聯配置）。其設計為高度模組化，功率模組、控制和多數主要部件均置於標準的模組化構架中。這種模組性可在經濟性、可靠性和可用性等方面為系統提供微妙而又重要的優勢。圖 1 示出了一套額定值為 1 MW 的 Symmetra MW 系統的基本單線圖。

圖 1
額定值為 1 MW 的
Symmetra MW 的單
線圖



通常此系統將被用於對不超過 800 kW 的關鍵負載供電，因此如果某一個 200 kW 段內的任何模組出現故障，系統可以繼續正常運行，直至該模組被更換。對 800 kW 至 1 MW 的關鍵負載運行此系統的意義將在本報告後文中討論。此圖並未顯示 UPS 控制和製冷系統中的冗餘功能。

小型功率模組的優勢

Symmetra MW 與可比產品的區別在於它採用相對較小（67 kW）的單相功率模組，每一個 200 kW 三相段內有 3 個此類別模組。客戶可以選擇購買 200 kW 功率段空缺的單元。這些段隨著關鍵負載的增長而填入功率模組。這種方式讓不能確定未來關鍵負載大小的客戶獲得成本上的優勢，但它對系統的可靠性沒有顯著影響，將不在本報告中進行討論。（因簡化升級而使風險有相當大幅度的降低，但這不屬於本研究的範圍）。

許多與之競爭的 UPS 採用並聯單元來實現更高的功率水準，但通常每一個單元均基於“獨立式”產品。也就是說，每一並聯單元均具有完整三相 UPS 產品的所有元件和功能，包括整流器、逆變器、控制件、直流匯流排、保護電路以及某些情況下具有的靜態旁路回路。這些模組往往都很大。施耐德電機旗下 APC 的 Silicon 產品線能夠並聯最高額定值為 500 kW 的模組，以實現更高的功率水準。Liebert、MGE 以及 Powerware 的產品也採用額定值為 100 至 500 kW 或更高的並聯三相模組來實現更高的功率水準和/或冗餘。

小型模組的經濟優勢

採用較小型模組有若干經濟依據。經濟分析是實用的、可實踐的可靠性分析的一部分。其目標並非簡單地實現最高的可靠性，而是要找到在一定的成本、空間和時間限度內可實現最高可靠性的系統。在可靠性討論中引入經濟論證的實質在於：如果兩個相比較的系統可靠性相當，則應購買成本較低的系統，將有限的資金用於未來的可靠性改進或其它目的。“成本”的估算不可能十分精

確；而且個別需求、時間偏好、預算限度以及風險容忍度都將影響任何購買決策。經驗豐富的買家往往採用產品成本在其生命週期內可以實現的未來價值分析。

較小型模組的生產批量將大於較大型的模組，從而可以引入可降低單位成本同時又減少加工缺陷發生率的自動化及其它加工技術。對於每台 UPS 由兩個 500 kW 模組製成的 1 MW UPS，如其年市場需求為 100 MW，則將生產 200 個此類別模組，而 Symmetra 設計將可以生產 1,500 個功率模組。

第二個經濟依據在於冗餘性。基於 500 kW 模組的系統可通過加入 3 個模組的方式提供 1 台冗餘的 1 MW UPS。Symmetra MW 實現冗餘的方式是在一個 200 kW 隔間內集成 3 個附加的功率模組，將總數由 15 增至 18。Symmetra 設計以模組數量增加 20% 的代價實現相同的冗餘度水準，而採用 500 kW 模組的替代方案則需使模組數量增加 50%。

Symmetra MW 的 67 kW 模組具有足夠的緊湊性和輕便性，兩名合格人員可以安全地對其進行搬運。它可被快速拆卸和更換，而且沒有用戶可操作的控制件、指示器或旁路回路。而 500 kW 模組則非常巨大且沉重，在搬運中需要機械協助。拆卸、更換 Symmetra MW 功率模組僅需數分鐘，而拆卸大型功率模組則需要數小時或數天。更換大型模組的時間和難度意味著在多數情況下，大型模組的維修要在現場進行，而不能更換為經過工廠測試的單元。Symmetra 模組在現場進行更換，而且總是在工廠設施內進行維修。維修的品質和維修時間的顯著差異對於系統可靠性有巨大的影響。

模組性對可靠性的意義

關於可靠性的基本考慮認為，簡單是一項優點，即零件較少的設備其可失效的零件也較少。對於兩台實現相同功能的設備，如果其中一台的零件數是另一台的兩倍，則許多人將以直覺認為較簡單的設備可靠性更高。然而，對於低概率事件的理解，直覺往往很不可靠。

經過周密研究後增加的複雜性能夠而且確實提高了系統可靠性。現在幾乎所有汽車都採用雙重制動回路和電腦控制的防抱死制動器。這些系統比單回路液壓系統更為複雜，但可靠性要比後者高出許多倍，在處理緊急停車情況時要安全地多。

草率地添加額外的元件會降低系統可靠性，然而，對較為複雜的系統進行周全的設計和試驗將可使可靠性大大提高。大部分關於元件或模組“最佳”數量的說法都經不起嚴密地推敲。為此類說法提供支援的論據忽略了現代 UPS 所通用的基本冗餘特性，它們因此就喪失了可信度。

MTech 對 Symmetra MW 可靠性的詳盡分析表明，該產品至少會和與之競爭的大型 UPS 產品具有相同的可靠性。在我們的研究中，故障的定義包括關鍵負載供電因任何原因而中斷的所有情況。許多已公佈的資料均不包括蓄電池組功能失常等“外部”原因。一些製造商還將在預防性維護或維修期間或之後出現的故障特別排除在外，因此遮掩了由這些本身有風險的步驟所產生的非常重要的故障源。MTech 對於故障的保守定義以及分析表明，在可靠性相等的要求之下，Symmetra MW 通常發生故障的可能性較小。

對於每 MW 的負載，APC 將生產 15 個功率模組，而與之競爭的大型 UPS 設計則僅採用 1 到 2 個。除了前文所述的經濟優勢之外，這一策略還使 APC 可以更有效地實施其可靠性增長管理進程。APC 識別 Symmetra 功率模組內任何缺陷的速度約比相應的大型模組產品線要快 10 倍左右。最終，APC 應能夠檢測到缺陷出現的頻度不及競爭對手產品相應期望頻度 1/10。

APC 可以識別缺陷，並精心制定相應的回應措施，以實現更高模組產量的優勢。APC 對其可靠性增長管理計畫的承諾和實施水準在業界居於領先地位，APC 將有效地利用這一重要的競爭優勢。

模組化設計在維修方面的優勢

更大的單元產量、批量生產技術以及可靠性增長管理規範對於可靠性的意義十分重大。模組化設計對維修過程的影響要大得多、明顯地多。APC 的模組化設計將在維修故障 UPS 的過程中引入根本性的變化，這將使見多識廣的客戶立即獲益並很容易看到這些變化。

運行、故障、維修和返回運行構成了一個迴圈，其複雜性很少被確認或詳查。基於模組更換的系統體系結構將對這一迴圈產生深刻的變革。下表歸納了模組化設計與典型的大型或單體化 UPS（其模組維修需在現場進行）的維修過程的差異。

表 1

修理過程：單體化與模組式設計的比較

維修步驟	單體化設計	模組化設計	優勢
檢測故障元件或模組	通常為自動進行。獨立 UPS 並聯運行可能使檢測和隔離複雜化	自動進行。模組設計有自檢和隔離功能。	模組化設計可能稍具優勢。
操作人員對故障的確認	操作人員響應	操作人員響應	無顯著差別。
維修人員動員	需要經過深入培訓的維護人員。他們是稀有的資源，很少可在現場提供	經過最低培訓的人員即可更換有故障或懷疑有問題的模組	模組化設計具有顯著優勢：可採用數量更多、成本不高的人員，縮短響應時間。
元件故障的確認/診斷	許多故障必須被跟蹤至具體的元件。這經常需要現場試驗步驟和時間。	故障僅需被跟蹤至模組層級。元件故障診斷在工廠維修設施內進行。	模組化設計可以縮短診斷時間，減少引入隱蔽缺陷的機會。
故障排查	對可疑零件進行現場試驗和更換	無需在現場進行故障排除。在工廠進行模組維修。	模組化設計可以顯著降低引入新的隱蔽缺陷和/或誤診斷的風險。
備件的獲取	需要多種備件	對於所有元件故障僅需更換模組	模組化設計可大大減少備件庫存量。現場具備所需備件的可能性更高。
新部件安裝	現場作業	對多數故障僅需更換模組	模組化設計可以顯著降低引入隱蔽缺陷的可能性。
測試	通常無法進行全面測試	模組在工廠接受全面測試。系統可確認模組的運行。	模組化設計有非常明顯的優勢。對所有維修均按照原工廠標準進行測試。
返廠維修（RTS）	規程取決於維修的性質	標準規程和自動化的 RTS	由於發生操作人員錯誤的可能性較低，模組化設計具有顯著的優勢。
復原（從現場撤除試驗設備、零部件，清除廢物，並撤出服務人員。）	規程取決於維修的性質	在更換模組之後為標準規程	由於可以降低引入隱蔽缺陷的可能性，模組化設計具備一定優勢。

在模組化的系統設計中，移動性、故障排查、備件獲取、安裝、測試以及返廠維修等步驟的速度大大加快，風險顯著降低，而且成本顯著縮減。針對可疑零件的特別故障排查規程、現場維修以及現場更換的風險非常大。其中會產生很多發生人為錯誤的機會，並在所維修的 UPS 中引入隱蔽缺陷。通常情況下不可能讓經過現場維修的 UPS 接受由所有高品質 UPS 的製造商對每一新模組進行的全套功能和性能測試。相比之下，模組化設計則幾乎不需要任何現場維修和故障排查。模組將被更換並返回工廠進行這些流程。新的（或經過維修的）模組在離廠之前會經過全面測試。

可用性優勢

快速更換故障模組的能力可以縮短維修時間。可用性是系統可運行的平均時間的量度，因此縮短維修時間可以提高可用性。當以冗餘備用功率模組運行（如在額定值為 1 MW 的 Symmetra 上負載不超過 800 kW）時，可以將維修時間縮短至 15 至 30 分鐘，其間表 1 中所示的多數維修步驟可以在單元停用之前完成。本報告中所述的維修時間定義為關鍵負載由市電或發電設備供電而 UPS 停機維修的時間。

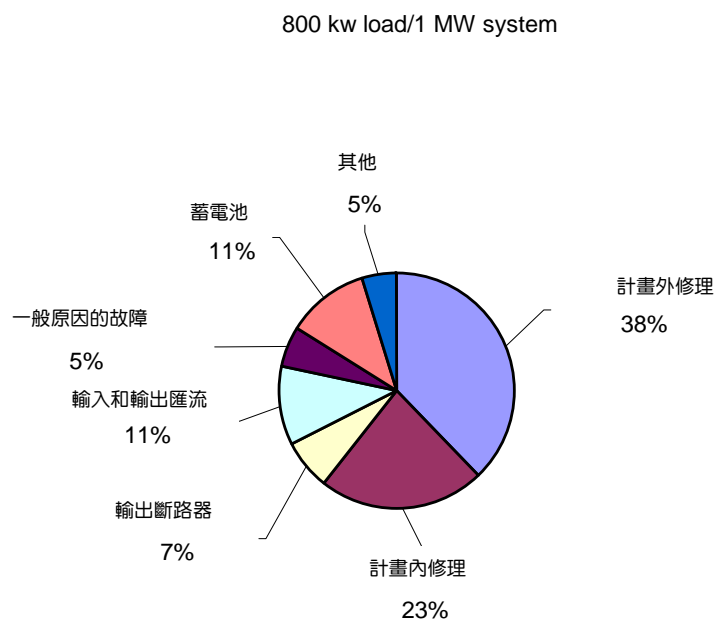
如果可用性對於客戶而言是有意義且有用的指引，則其必須被謹慎地定義。MTech 採取 UPS 所保護設備的最終使用者的角度。如果該設備正常運行，則其對這些用戶可用。即使在為更換模組而使負載短暫切換至市電期間，只要沒有市電不穩定，我們均將系統定義為可用。這並不意味著在系統的正常生命週期內沒有任何模組故障。模組可以發生故障並被更換，但只要被保護的設備有供電且可用，就可視為未發生故障。根據我們的研究，預計 Symmetra MW MTBF 可超過 100 萬小時。

故障樹分析結果

故障樹分析就是構建出描述元件故障的何種組合會最終導致系統故障的邏輯模型。Symmetra MW 高度冗餘的設計意味著單一的元件故障很少會導致系統故障，這裡的系統故障定義為關鍵負載電源缺失。故障樹中包含的“故障邏輯”與標準的元件故障率結合，以得出系統可靠性的估算結果。故障樹在附錄中示出並加以討論。

圖 2 所示為我們對所保護的關鍵負載不到 800 kW 的 1 MW（5 段）Symmetra 的分析結果。由此將導致一個冗餘功率段（N+1）。

圖 2
功率模組以 N+1 冗餘運行的 Symmetra MW 中元件對系統故障的貢獻率



導致故障的主要因素有（以順時針順序）：

- **計畫外維修 (38%)**：是強制系統靜態旁路的故障。在此狀態下，電力設施的任何故障都將導致系統故障。計畫外維修按照平均持續 24 小時進行建模。APC 在其對系統可用性和可靠性的內部計算中採用相對較高的市電故障率，即每小時 3.89E-03 次故障。此值所對應的平均市電故障時間為 257 小時，平均每年預期事件次數超過 34 次。這種保守（悲觀）的市電故障率用於強調所需故障模式和對維修時間的敏感性。在美國某些市電配電聯網的地區，實際的故障率可能不及此值的 1/10。將市電 MTTF 提高至 1000 小時可將預期系統故障率縮減為 1/3 以下。

能夠對維修進行計畫意味著維修不再是隨機的，而概率方法最適用於隨機事件。相比之下，“計畫外維修”是真正的隨機事件，因為如果系統需要維修，就需要立即開始，而且要在 24 小時內恢復運行。計畫外維修的建模可能稍微樂觀一些，因為許多維修要在 24 小時內完成很困難。

- **計畫內維修 (23%)**：是因為有冗餘元件而不會強制 UPS 進入靜態旁路的系統元件（主要是功率模組）故障。計畫內維修按照市電平均持續 30 分鐘進行建模。在此期間內，關鍵負載可能受到市電故障的影響。

我們對計畫內維修事件的建模稍微保守（悲觀）一些，原因在於其中假設在短暫的維修視窗期間市電故障率相同。在現實中，系統的操作人員會避免在故障可能性較高或故障後果會更嚴重的時段內進行維修。大型金融公司通常會禁止在交易時段內進行維修。在暴風雨、炎熱天氣或其它威脅市電可靠性的條件下也不會進行維修。

- **輸出斷路器 (7%)**：斷路器的偽跳閘（當負載電流處於設備額定電流以內時跳閘）會對所有電力系統的可靠性造成顯著的影響。針對美國核電工業中在無輻射環境中約 27,000 台機組所採集的資料顯示，故障率為每小時 1.2×10^{-7} 次，對應於 MTTF 為 500 萬小時，即 57 年。¹

- **輸入和輸出匯流排 (11%)**：輸入或輸出匯流排的災難性故障（如持續性的線間或線對地故障）會導致系統故障。儘管輸入匯流排故障不會導致立即故障，它卻會阻止 UPS 蓄電池的充電，因此蓄電池電量耗盡就不可避免。

- 輸入和輸出匯流排故障的嚴重性不在於其發生的可能性，而是在於只要有一個此類故障就將使系統停止運行。這些故障模式通用於所有大型 UPS，而並非 Symmetra 模組化設計的結果。消除這些重要的故障模式的唯一方式就是採用基於許多較小型 UPS 而非一台大型 UPS 的資料中心體系結構。感興趣的讀者可以在 MTechnology 所撰寫的第 111 號白皮書《APC InfraStruXure 英飛電源系統可靠性分析》中獲得更多資訊，在該白皮書中將 PRA 分析應用於此類體系結構。

- **共同原因的故障 (5%)**：這些是由於單一原因而導致多個元件失效的故障。共同原因的故障對冗餘的優勢添加了非常嚴重的限制。共同原因故障的來源很多：設計或生產缺陷；火災、洪水或其它自然災害；以及一個元件發生災難性故障導致產生等離子體或碎片而使附近元件失效的情況。

由於不當的規程或未能將系統復原至完全可用狀態可能導致所有 UPS 或發電機或蓄電池同時禁用，定期維護就成為資料中心內非常大量的共同原因故障的來源。我們對 Symmetra MW 的設計、試驗和生產設施的詳細檢查表明，其沒有特定的共同原因故障來源。模組化設計以及冗餘式故障保險控制系統體系結構有助於實現簡單的測試和維護規程，即使在發生操作人員人為錯誤之後也不太可能導致失去負載。

¹ NRC AEOD/S92-93 et al, Review of Operational Experience with Molded Case Circuit Breakers in US Commercial Nuclear Power, 1992 年

我們採用的每小時故障次數為 10⁻⁸，對應的平均故障間隔時間 (MTTF) 為 1 億小時，即 11,400 年。如此少見的故障在所有故障中預期占到 5% 份額的事實既表明共同原因故障的影響，也證明了 Symmetra MW 的可靠性。

- **蓄電池故障 (11%)**：主要是需求型故障，它出現在市電失效而蓄電池又無法在規定時間段內提供足夠功率以保護負載的時候。我們的模型基於多個 VRLA 蓄電池串組，包括斷路器、熔斷器、連接和控制。我們證明 Symmetra 能夠自動執行蓄電池定期測試，而該測試在識別失效蓄電池單元方面並非 100% 準確。測試會耗盡蓄電池組的電量，並縮短其使用壽命，因此我們的模型中將測試定為每 3 個月進行一次。具有許多單元和連線的大型蓄電池組會有許多失效的可能性，而蓄電池組的這種顯著的貢獻率既來源於在定期測試之間發生的可檢測出的故障，也源自於僅在蓄電池運行期間發生的無法檢測出的故障。影響此結果的因素還包括由 APC 保守估計 (悲觀) 的市電故障率值得出的大量要求。
- **其它 (5%)**：表示其它所有故障來源。儘管 Symmetra MW 以及我們的模型有非常多的元件數量，但全部故障中有 95% 只是由其中的少數元件所導致。應注意，功率模組和控制模組故障不會在前述 95% 中出現，因為冗餘式設計會防止模組故障導致系統故障。

冗餘的優勢

多數客戶將採用 N+1 個冗餘功率模組的方式運行 Symmetra MW。例如，1 MW 的關鍵負載通常由具有 6 個功率段的 Symmetra 供電，容量為 1.2 MW。任何一個功率模組或段的故障都不會強制切換至旁路。

而如果 Symmetra 被配置為沒有冗餘功率模組，則每個運行年度內總體故障概率將增至 7 倍。故障原因的分佈變化更為顯著，如下所示。圖 3 所示為我們對一套保護 1 MW 關鍵負載的 1 MW (5 段) Symmetra 的分析結果。其中沒有冗餘功率段。

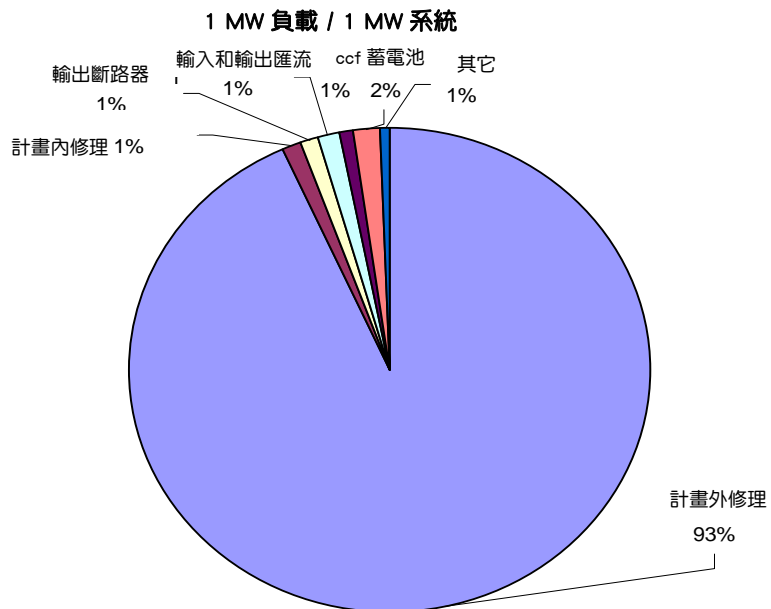


圖 3

無冗餘功率段的 Symmetra MW 中元件對系統故障的貢獻率

計畫外維修現在幾乎是所有故障的原因。功率模組故障會強制系統到靜態旁路。此時維修是真正隨機的 (操作人員在凌晨 2 點和中午 2 點接到電話的可能性相同)。從確認故障到動員人力和備件的整個維修過程在此時段內進行，我們對此時段按照持續 24 小時建模。由於大型資料中心中以具有的變更管理規程，通常難以在少於 24 小時的時間內獲得對關鍵基礎設施進行維修許可權。

結論

MTech 對施耐德電機旗下 APC Symmetra MW 的分析表明，其設計師所構造的是一種非常可靠、易於維護和維修的產品。故障的原因均勻分佈在 UPS 及其相關元件中。這是設計中考慮周全的體現。如果所有風險僅源自 1、2 個元件，設計師應更好地利用其資源，以降低這些特定零件的故障機率。

Symmetra MW 的模組化、冗餘性質對於維修過程有深遠且非常有益的影響。維修品質被大大改善，維修時間得以大幅縮短。沒有設備是完美的，在任何成功的產品系列中都有可能出現故障，不論它們有多麼可靠。施耐德電機旗下 APC 周到的工程設計和嚴格的測試所造就的 UPS 的性能相當於甚至很可能優於那些與之競爭的基於少數大型模組並聯運行的設計。



關於 MTechnology, Inc. 公司

MTechnology, Inc. 有限公司提供 21 世紀所需的電力系統工程設計。該公司提供諮詢、測試、產品開發和樣機製造服務。MTech 進行電力系統的風險概率分析、設計審核、故障根本原因分析，並提供針對規章和法律訴訟的專家證明。MTech 可在知曉風險的系統設計、運行、維護、升級和可靠性增長管理方面提供諮詢。客戶經常能夠實現資本和運營開支的大幅節省，同時又可顯著提高可靠性。MTech 的設施包括一套占地 5,000 平方英尺的測試和實驗室設施，能夠運行 500 kW 的連續負載和數兆瓦級脈衝負載。MTech 曾開展許多高可靠性分散式發電項目，涉及從活塞式發動機到燃料電池的多種技術。該公司的客戶包括公共電力企業、設計師和工程師、關鍵設施業主和運營商，以及從事 7x24 全天候關鍵任務行業的製造商。



關於作者

Steve Fairfax 是 MTechnology 有限公司的總裁。Steve 於 1997 年加入 MTech，但他自從在麻省理工學院（MIT）就讀時起就一直從事數兆瓦級電力系統的研究工作，在 MIT 他協助建造並運行一套用於托卡馬克聚變反應堆的 200 MW 電力系統。他在擔任故障分析協會管理工程師期間開始了對電力系統可靠性的全職研究。他在 MIT 等離子聚變中心 Alcator C-MOD 核聚變反應堆的設計和初始運行期間擔任工程和運行負責人，並擔任波士頓地區公司的首席工程師。Fairfax 先生持有 MIT 的物理學和電氣工程雙碩士學位。

Neal Dowling 是 MTechnology 有限公司的高級工程師。他負責進行故障樹分析及相關的建模和模擬，開發並測試新的電源和開關技術，並監管 MTech 的 400 kW 燃料電池電廠設施的運行和維護。在加入 MTech 之前，Neal 在波士頓地區幾家醫療設備製造公司工作。他的專長包括關鍵功能的固件和軟體的開發及維護、合乎 FDA 規範以及類比和數位設計。Neal 持有 MIT 的電氣工程學士和碩士學位。

Dan Healey 是 MTechnology 有限公司的高級工程師。他專門進行人為因素分析以及 PRA 技術在運行和維護活動中的應用。Dan 曾在波士頓地區幾家公司擔任工程主管，負責半導體處理、醫療設備、機器人以及光電系統方面的產品開發。Dan 持有羅切斯特大學電氣工程學士學位，並在光學和程式設計方面進行了額外的研究生工作。他目前是哈佛大學的特別生，進行技術管理和軟體發展的研究。



點擊圖示打開相應
參考資源連結



APC InfraStruXure 英飛電源系統
可靠性分析
第 111 號白皮書



流覽所有 白皮書
whitepapers.apc.com



流覽所有 TradeOff Tools™ 權衡工具
tools.apc.com



聯絡我們

關於本白皮書內容的回饋和建議請聯絡：

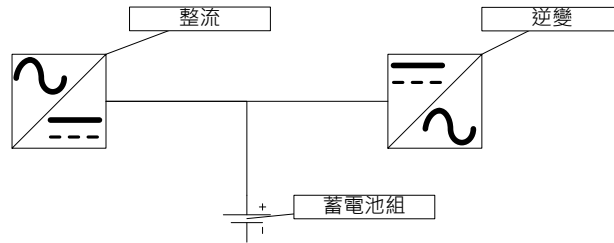
資料中心科研中心
DCSC@Schneider-Electric.com

如果您是我們的客戶並對資料中心專案有任何疑問：

請與所在地區的 施耐德電機 銷售代表聯絡，或登錄：
www.apc.com/support/contact/index.cfm

附錄 A： Delta 轉換在線式 與雙轉換式 UPS 的比較

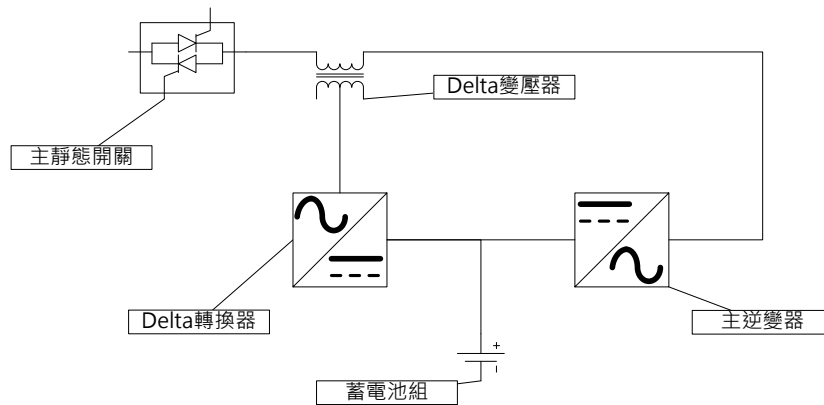
Delta 轉換在線式電路拓撲比較深奧，初看起來比標準的雙轉換式 UPS 更難理解。Delta 變壓器充當一個電流互感器。多數電氣工程師對電壓互感器很熟悉，而少數使用電流互感器的人主要將其用作感測器，而非受控源。



雙轉換式UPS

圖 A1

兩種轉換設計的比較：雙轉換式與 Delta 轉換式



Delta轉換式UPS

對 Delta 轉換式 UPS 的一種常見批評就是它比較複雜。這種觀點認為，元件較少的雙轉換式 UPS 應該更為可靠。本報告的正文中對此觀點進行了討論，發現它有問題。（汽車中的雙制動回路比單回路設計既複雜，又更可靠。）

如果我們假設以下元件的故障率大體相等（雙轉換元件在前）：

- 逆變器和主逆變器，
- 蓄電池組和蓄電池組，
- 整流器和 DELTA 轉換器，

則 Delta 轉換式 UPS 的附加組件為：主靜態開關和 DELTA 變壓器。靜態開關與乾式變壓器都是相對比較可靠的元件（每小時故障少於 10^{-6} 次），因此預計這些元件對故障的貢獻度相對較小。兩類 UPS 通常都具有由靜態旁路開關給出的冗餘供電路徑，如果 UPS 元件發生故障，該開關將向負載提供市電電源。加裝靜態旁路開關將進一步減小兩類 UPS 之間的可靠性差異。最後，兩種設計均會出現相同原因的故障。在所有負載掉電情況中，很大一部分是由大型雙冗餘式 UPS 的控制系統故障所致。實際運行中的可靠性取決於體系結構和實施方式，而非簡單的元件數量。

具體設計方案的選擇對實際產品的可靠性有很大的影響，而不論設計師在關鍵元件、加工品質、維修品質、工作環境以及製造商可靠性增長管理計畫的功效等若干可能存在的因素上是否適當採用了保守的裕度。這些因素要遠遠超出增加一兩個電路元件的影響。

有些潛在客戶對 Delta 轉換持反對意見。在本研究進行期間，MTech 的工程師們瞭解到了以下關於 Delta 轉換的價值的意見。

它屬於線路互動式 – 不如在線雙轉換好。

“線路互動式”是一個技術術語，它描述的是一種特定的 UPS 配置。線路互動式 UPS 的特性之一是，其中的單一逆變器總是被連接至關鍵負載，但在有市電電源時通常不工作，對蓄電池充電除外。有些型號中帶有抽頭變換式變壓器或其它設備，以補償較高或較低的市電設施電壓。Delta 在線式拓撲與線路互動式設計不同，只要市電存在，其 Delta 逆變器通常就會工作，這不同於多數線路互動式設計。與任何 UPS 一樣，Delta 轉換在線式 UPS 會與線路進行互動，但它當然不是常規所說的“線路互動式”設計。

“不如在線雙轉換好”只是一種價值判斷，並沒有邏輯、科學或工程論據加以支援或反駁。其含義是“雙轉換式”UPS 設計在本質上優於其它所有電路設計。並沒有任何邏輯或經驗證據可以支援如此寬泛的說法。當然現代的雙轉換式 UPS 要比有 40 年歷史的線路互動式設計更為可靠，而它們也比早期的雙轉換式產品更可靠。我們對 Delta 轉換在線式電路拓撲的分析結論是，功率模組、逆變器及其它主要組件的可靠性在本質上與其在雙轉換式 UPS 中的對應組件相同。

Delta 轉換不能進行頻率轉換，且必須與公共電力設施同步。

這種說法的正確之處在於，Delta 轉換式 UPS 的輸出頻率必須與輸入相同。然而，暗示這是一種缺陷卻是不對的，理由有二。第一，現代的電腦負載對頻率並不敏感。幾乎所有的現代開關模式電源按照設計均可在 48 到 63 Hz 之間的任何頻率運行，其中有很多的適用頻率範圍更寬。

第二點也是更重要的一點，保持 UPS 輸出與輸入交流波形同步的要求源自於靜態旁路開關的應用。幾乎所有大型 UPS（不管是雙轉換式還是 Delta 轉換式或其它設計）都帶有靜態旁路開關。它提供一個並聯路徑，是實現高可靠性所必需的條件。如果沒有靜態旁路，所有 UPS 將成為簡單串聯元件，UPS 內的任何故障都將導致關鍵負載的故障。旁路開關從根本上改變了這種性質。通常大型 UPS 功率段的平均故障間隔時間約為 150,000 小時。只有當採用旁路開關並聯運行時，系統的 MTTF 才會接近或超過 100 萬小時。

UPS 輸入和輸出波形必須保持接近同步，否則靜態旁路開關將被禁用。在大型 UPS 中嘗試進行非同步切換幾乎一定會使下游變壓器飽和，導致大電流，使保護設備動作。雙轉換式和 Delta 轉換式 UPS 均必須對輸入和輸出波形進行同步。負載對頻率並不敏感，因此如將雙轉換式 UPS 作為頻率轉換器工作，將會產生嚴重的風險（靜態旁路保護缺失），而沒有益處。

Delta 轉換式 UPS 的蓄電池電壓較高。大量蓄電池串聯會降低蓄電池的可靠性，是一個安全問題。

多數大型雙轉換式 UPS 採用 192 到 240 個蓄電池單元串聯，以實現 384 至 528 V 的額定開路電壓。Symmetra MW Delta 轉換式 UPS 採用 2 個 192 單元的串，以中心抽頭方式配置，形成總共 384 個單元串聯，額定開路電壓達到 768 V。

直流匯流排電壓的選擇是一個設計參數，Delta 轉換式和雙轉換式 UPS 設計工程師均根據多項理由來選擇蓄電池電壓。選擇較低的直流電壓確實會使串聯的單元數較少，但需要採用輸入和輸出變壓器。這些串聯設備會引入損耗（可顯著增加大型系統的運行成本）和多種新的故障模式。選擇 +/- 384 V 直流設計可以取消所有內部變壓器，儘管在特定應用中需要隔離的情況下可以再加裝。任何一種直流電源的可靠性都是客戶的第二考慮；系統的可靠性更為重要。系統可靠性只有在對系統可靠性進行更大範圍研究的條件下方可確定，且必須依靠分析方法（如本文檔所述）或現場

歷史資料。要確定某一種直流電壓選擇方案具備明顯優勢，所需要的絕不僅僅是簡單地計算單元的數量。

當有不止一個蓄電池組並聯時，此問題就需要討論。單個蓄電池組的開路故障是最嚴重的故障模式，因為它使逆變器喪失所有直流電壓。由於蓄電池僅在市電故障或嚴重超限時才放電，開路蓄電池單元故障通常會導致負載下降。並聯蓄電池組會將這種故障模式的重要性降低到可忽略的水準。並聯組排中的開路蓄電池單元故障會導致蓄電池維持時間縮短，但只要其餘的蓄電池組可以支援負載運行到備用發電機開始運轉，就不會有負載下降。不管關於串聯的蓄電池單元數量有何可以討論的價值，只要採用並聯蓄電池組，這些就通常被視為無關緊要。

安全性問題經不起詳細審查。所有大型蓄電池組都極其危險，因為它們不能被切斷，會提供致命的電壓，而且能夠提供極大的故障電流。兩種系統中的對地電勢都大到足以造成人身傷害或死亡。國家和國際規範及標準對這兩種設計沒有區別。只要對地電勢保持在 600 V 或更低水準，對兩種設計的保護、構造和絕緣要求就完全相同。

蓄電池有中心抽頭並連接至交流中性線。

Symmetra MW 蓄電池組確實採用中心抽頭方式，並連接至交流中性線，但我們沒有發現任何表明這樣會造成安全威脅或以任何方式影響可靠性的證據。我們對其它大型 UPS 系統的分析需要有從相當數量的似是而非的電氣故障（它們會導致關鍵元件級聯故障）所引發的基本事件（故障模式）。我們對 APC 設計文檔的審核表明，設計人員已預測到所有的似是而非的故障，並已成功地證明其元件不會承受過大的應力。

Delta 轉換是一種新的未經驗證的拓撲結構，不如雙轉換式可靠。

這種批評基於一種完全錯誤的認識，即“產品的可靠性會隨著系統的年齡而自動增加”。歷史和分析調研的結果都證明，可靠性是由設計、組件品質、加工品質以及維修品質所決定的。類似的系列產品的可靠性有時會隨時間而增長的原因在於可靠性增長管理，在這種管理中，隱含於現場故障中的經驗教訓被用來消除已有系列產品的缺陷，並應用於新的設計中。除非完成了有效的現場升級，原始設備的可靠性將保持不變。

MTech 已研究了各種雙轉換式 UPS、Delta 轉換、旋轉式 UPS、燃料電池以及其它更特異的設計。我們從未遇到過一種顯然優於其它所有類型的 UPS 拓撲。我們已經認識到，系統體系結構在模組性和冗餘性等方面的特性對可靠性所起的作用要遠遠大於基本電路拓撲。加工品質、操作人員介面以及現場服務政策起著同等重要的作用。Delta 轉換在線式拓撲本身可靠性與雙轉換式並無明顯差別。

Delta 轉換比雙轉換更為複雜，會降低可靠性。

此觀點基於“較多零件會導致較多故障”的簡單化概念。但如果真是這樣，則 N+1 式系統將比不上非冗餘的替代系統。採用冗餘實現高可靠性的事實證明，決定系統可靠性的是部件的添加方式而非單純的部件數量。

Delta 轉換器的功能組件確實比雙轉換式 UPS 要多。但所有大型 UPS 均有靜態旁路，用於在大多數 UPS 故障期間保持對關鍵負載的安全供電。並聯靜態旁路開關的使用會大大降低功率回路中組件數量的重要性。此外，由多個功率模組實現的故障容忍能力意味著元件故障不需要導致靜態旁路動作。這一優勢不僅局限於 Delta 轉換；模組化設計將使許多電路拓撲具有這樣的優點。

Delta 轉換式主逆變器不使用變壓器，且負載與蓄電池之間沒有隔離。

在必要或適合時，可以在系統上加裝隔離變壓器。多數競爭性產品中採用隔離變壓器是所選直流電壓過低、無法直接轉換為適當的交流電平的結果。這種觀點試圖從必要性方面加以論證，但現實中任何一種電路拓撲均可選擇是否採用隔離變壓器。

Delta 轉換由於採用兩個逆變器，將導致蓄電池更為頻繁地放電，並造成直流線路上更大的波動，從而縮短蓄電池壽命。

每次放電都會縮短蓄電池壽命。深度放電則更為有害。Delta 轉換在線方式會自動提供以超限交流輸入電壓運行而不使蓄電池放電的一定限度的能力。電壓容差由設計人員在選擇 Delta 變壓器特性和直流線路電壓時進行設置。雙轉換式 UPS 的設計者經常在輸入整流器中採用降壓或升壓變換器功能，以便實現同樣的降低蓄電池放電頻度的能力。在任何一種情況下，參數都是由設計師進行選擇，而他們必須向管理層乃至最終向市場證明其選擇的正確性。任何一種拓撲在交流輸入電壓範圍和蓄電池放電方面均沒有明顯的優勢。直流線路電壓以及電流波動的問題同樣由兩種電路中的電感器、電容器以及設計方式來控制。

Delta 轉換由於無法實現頻率轉換，故無法與發電機相容。

如前文所述，採用雙轉換式 UPS 實現頻率轉換在風險和可靠性方面是很差的選擇，因為它將禁用或許是大型 UPS 中最重要的保護元件，即靜態旁路開關。現代的資料中心負載對於任何合理的頻率變化並不敏感，要求頻率轉換並無依據。Delta 變換器在幾乎任何工作條件下均可提供統一功率因數和低諧波的能力在採用發電機運行方面具有顯著的優勢。幾乎所有發電機在切換至前導型功率因數負載運行時均會出現非常嚴重的故障模式，即自激。自激會導致控制發電機輸出電壓的能力缺失。現代的資料中心負載經常會有稍微前導的功率因數，而某些雙轉換式 UPS 在輕載下也會以很大的前導功率因數運行。這些系統必須與發電機進行謹慎的集成，以避免自激和關鍵負載下降。採用 Delta 轉換式產品的系統則不會涉及這種特定的問題。

逆變器採用 kW 額定值，必須進行超選型方可應對實際負載。

兩類 UPS 的有功功率 (kW)、無功功率 (kVAR) 和視在功率 (kVA) 容量均由設計工程師確定。雙轉換式和 Delta 轉換在線式系統均可設計成視在功率大於或等於有功功率額定值。kVA 額定值大於 kW 額定值的設計中通常包括無功功率源。將發電機切換至具有無功功率源的設備運行將可能導致自激和電壓控制缺失。APC 將 Symmetra MW 設計為具有相等的有功和無功功率額定值，但這只是一種選擇，而並非 Delta 轉換在線的必要條件。

Delta 轉換在線式所宣稱的高效率並不真實；雙轉換式在實際負載下效率更高。

這是一種事實存在的說法，可以通過簡單的測試加以佐證或反駁。Delta 轉換僅讓部分能量流接受矽功率電晶體的轉換，而雙轉換式中的所有能量流均被轉換兩次，這一事實表明，Delta 轉換式拓撲在本質上效率更高。當然 APC 與其競爭對手的效率宣傳均支持 Delta 轉換在線式效率更高的觀點。

Delta 轉換在線式不能應對非線性負載，它們會導致輸出電壓波形出現大的失真。

兩種設計均採用矽功率電晶體合成得出接近純正弦的電壓波形。兩種設計中的功率電晶體的額定值選擇均按照在最大額定功率下連續運行而選擇。任何一種逆變器對非線性負載回應的任何差異均由負責測量輸出和控制電晶體的電路的設計來決定。任何一種設計在本質上都不容易受電壓失真的影響。

附錄 B： 負載故障和協調 故障

有許多可能的故障模式可以被包含在故障樹中，但實際卻沒有。我們對於其它大型 UPS（特別是採用幾個三相模組並聯運行的大型 UPS）的分析中已考慮一個模組內的負載故障或元件故障導致系統故障的可能性。通常這源自於熔斷器與斷路器之間協調不佳，使得一個模組內的短路會導致若干模組（有時還包括靜態旁路）的斷路器或熔斷器開路。我們對 Symmetra MW 進行了審核，發現其工程師們已經加入了特別的準備，使這些故障模式難以出現，多數是要求同時發生的故障，而非一個故障會導致下一個故障發生的級聯情況。

熔斷器與斷路器協調對於 UPS 在技術上通常有很大難度，對於大型 UPS 更是如此。當若干大型模組並聯運行時，確保保護設備正確協調的目標可以被證明十分困難甚至根本不可能實現。協調意味著最靠近故障處的設備最先動作，而上游設備僅在首個設備未能清除故障時才動作。

許多大型 UPS 的設計基本上採取多套完整的 UPS 產品並聯運行的方式。這些設備通常最初並非針對並聯運行而設計。每台 UPS 均有其自己的輸入和輸出斷路器、內部熔斷器以及其它保護功能。針對並聯運行的附加要求，特別是關於保護設備的回應協調方面，可能會與單台 UPS 的要求相衝突。

Symmetra MW 設計以兩種完全不同的方式降低了協調故障的可能性。第一也是最重要的一種就是，設計者考慮了系統每一部分內的故障電流和影響，包括輸入、輸出、功率模組、直流匯流排、交流濾波器以及外部旁路回路。他們採用了應用高速熔斷器的策略，此類斷路器預期僅在有很大故障電流的短路期間動作。每個熔斷器均可無限期傳導數倍於其正常工作電流的電流值。以這種方式運行熔斷器將使熱損耗非常小，因此，與長期溫度相關的熔斷器降級應可忽略。這種在設計階段對並聯運行細節的關注可消除許多潛在的故障模式。

Symmetra MW 設計中降低熔斷器和協調故障機率的第二方面是功率模組規格相對較小。有一個 67 kW 模組內出現故障的 1 MW 系統（5 個段，每段 200 kW）將有 4 個模組對發生故障的模組供電。發生故障的模組內的熔斷器所傳導的電流將是正常模組內的 4 倍，它將首先動作。相比之下，在由 2 個 500 kW 模組組成的 1 MW 系統中，故障模組和正常模組中熔斷器的電流相等。正常工作模組中的熔斷器很有可能在故障模組之前發生斷路。即使故障模組的熔斷器首先斷路，正常模組內的熔斷器也可能降級，並且在未來也有可能因為傳導故障電流而產生偽動作的情況。控制系統要正確辨識哪個模組故障也要困難得多。許多並聯式 UPS 設計在每次模組故障時都必須切換至旁路，依靠本地市電可提供的較大的故障電流來使保護設備動作。

附錄 C： 故障樹模型

圖 C1
Symmetra MW 800 kW 負載

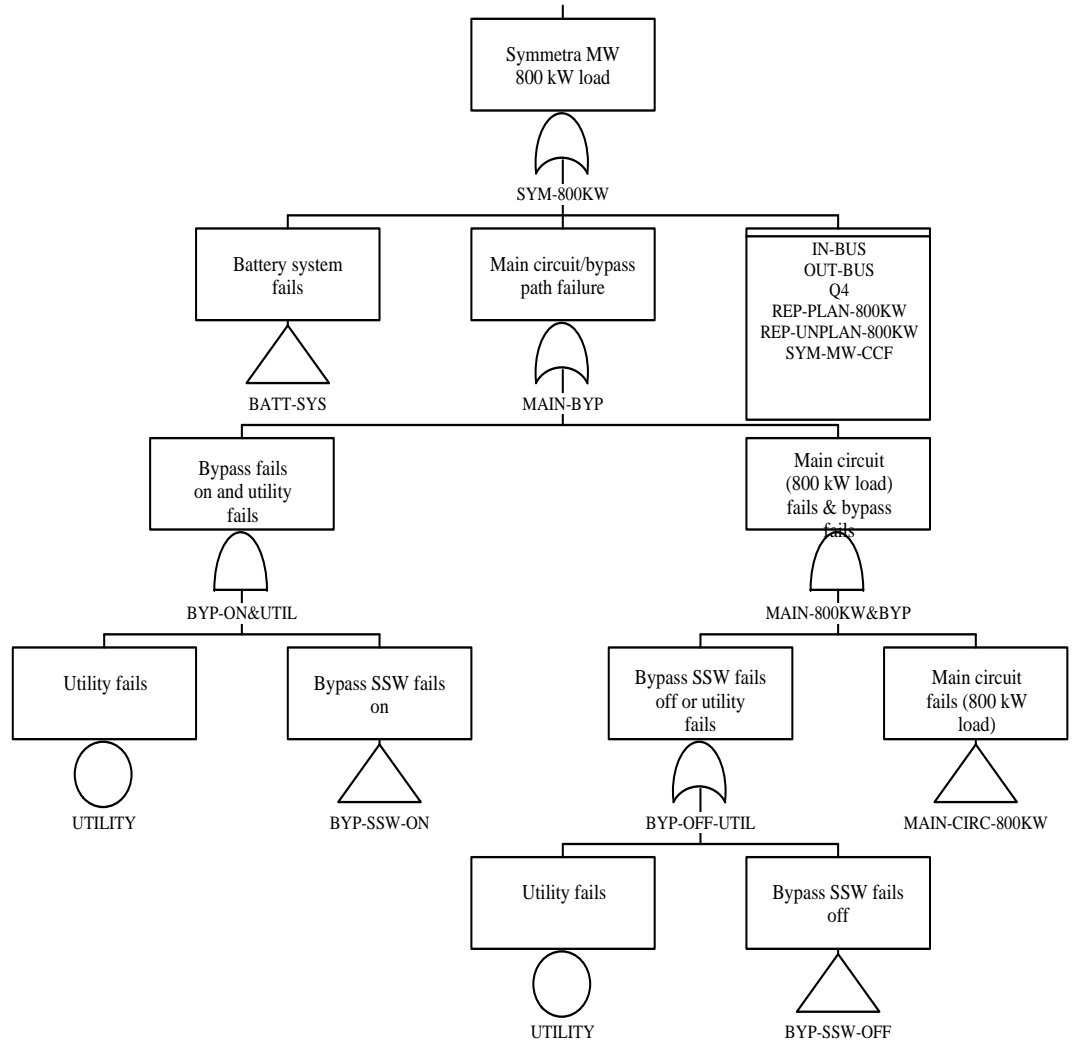


圖 C2
Symmetra MW 1 MW 負載

