

以模型化基礎設計(Model-Based Design)開發複雜的風力發電機

採取拆解風力發電機各元件的分部模擬是解決錯誤的最簡易方法

作者：Steve Miller, MathWorks 物理建模模擬 技術行銷經理

風力發電機並非只是將各個系統整合在一起後即可具備發電功能，它還必須解讀各種環境因素，依序做出相對應的反應。要做為商業用途的供電來源，非計劃性的停機是不被允許的，風機製造商須提供一個合乎規定條件、安全可靠且穩健的發電機組。

在所有的設備開發中，測試是開發階段中至為關鍵的一環；然而要測試一台頗具規模的風力發電機實體原型實屬一大挑戰，因為測試零組件的成本和測試輸入資料範圍，需取決於不同的風向條件和風機的架設位置。使用模型化基礎設計(Model-Based Design)可以降低以實體原型進行測試的次數，讓測試更具效率，工程師也能極大化整個系統的性能。

日益趨近複雜化

目前德國的風力發電機有超過 20,000 台，風力發電總裝機量達到將近 2.4 萬 MW，佔德國總發電量電力 7% 左右，風能電力快速擴張的主因，是因為風機尺寸增加以及新的風力發電場建設日益增加，這乃是拜風力發電機的科技進展所致，更好的葉片空氣動力效能、更有效率的發電機和不斷改善的監控控制系統造就今日更甚以往的風力發電效率。

日新月異的技術給工程師們帶來新的挑戰。風力發電機是由複雜的系統所組成，各個子系統間必須盡可能有效率地相互整合，子系統包括機械設備，如葉片、齒輪箱、液壓或電力驅動設置槳距角、電子轉向動力單元控制驅動器、發電機、和電網的連接。而這些子系統是由一個極為複雜的監控控制系統來監視，必須因應不同的環境條件做出適當的反應，如改變風速。

在傳統的開發過程，各個子系統是由各自獨立的軟體和模擬環境所建立的，而其規格需求亦由其他環境來建立，例如文件檔案。如此將會導致許多問題，因為規格沒有納入到開發過程中，很難比較設計與規格間的差異。一旦設計變更時，工程師無法確定系統可否滿足規格的要求。最糟糕的是，若規格需求的錯誤或不完整沒有即時被偵測到，而是等到最後開發流程階段，當子系統間要整合時才被揭露，已釀成大錯無法修正或是付出高昂的代價。

錯誤在開發流程的晚期才被發現—導致極高的修正的成本—常是因為工程師在早期開發階段並沒有整合彼此的設計，例如開發發電機的團隊與監督控制系統的設計團隊分開獨立作業，此時將難以預測子系統整合後的效果，意即工程師使用不同的軟體工具和模擬環境，是不大可能對整合設計的模擬進行測試，這將導致要在硬體原型化後才有機會讓子系統相互整合進行測試。由於各種氣候條件範圍廣大，而破壞分析基於成本、安全性、和彈性的考量，不大允許能進行硬體原型的疲勞測試(exhaustive testing)，使得零件和系統會過度被設計(overdesign)以確保葉片渦輪能經得起考驗。

衝突的目標

不同控制系統的各自目標分歧，卻又必須相互溝通整合，因此導致設計的困難性而面臨極大挑戰。例如，葉片監控系統必須確保電力不餘匱乏又能滿足所需；同時，又必須避免各零件遭受磨損，這兩個衝突的目標即是監控系統運作時考量的重要因素。

一般而言，風力發電機在風速達到 2 至 4 米/秒時才會開機運作，較低的風速既無法產生足夠的風能，又會增加風機零件的磨耗；在風力大時，控制器會關閉發電機並放慢葉輪的旋轉(或停止旋轉)，來降低傳動系統的負載，而在較低轉速下，控制葉片的系統應能控制發動機的速度讓其持續達到最大風能。此外因應發電故障的問題，系統也要隨時控制或是利用風機驅動系統嚴防風機的不穩定或毀損。

在正常運作下，合適的機艙偏航轉向控制(Yaw Control)系統可讓葉片迎向風，偏航控制系統必須確保機艙並不會一直往相同方向迴轉，因此風機基座內的電纜不會在超乎極限下扭轉，這些也都須再次仰賴監視控制器協調這些潛在的目標衝突。而挑戰之所以增加，是因為系統是非線性的行為，包括齒輪箱的後座力和大型球狀軸承的摩擦力等。

穩定且持續地開發

事實上，風機中的所有子系統都可以在早期開發階段進行模擬和測試，藉由使用模型化基礎設計(Model-Based Design)，由此控制器硬體可在整系統進行原型化之前提早測試，系統最後必須一起工作，例如葉片螺距控制(Pitch control)、偏航轉向控制(yaw actuators)，而它們都可被同時模擬和協調以達到最佳性能。

風機開發廠利用這個設計理念，使開發過程得以穩定且持續不斷的進行。在此單一的開發環境下，不僅同時納入了模型和模擬，也同時與需求和規格無縫接合。此外嵌入式軟體可

直接從該模型產生，藉此簡化團隊之間的溝通，讓整合的難題在早期設計過程時即能順利解決。

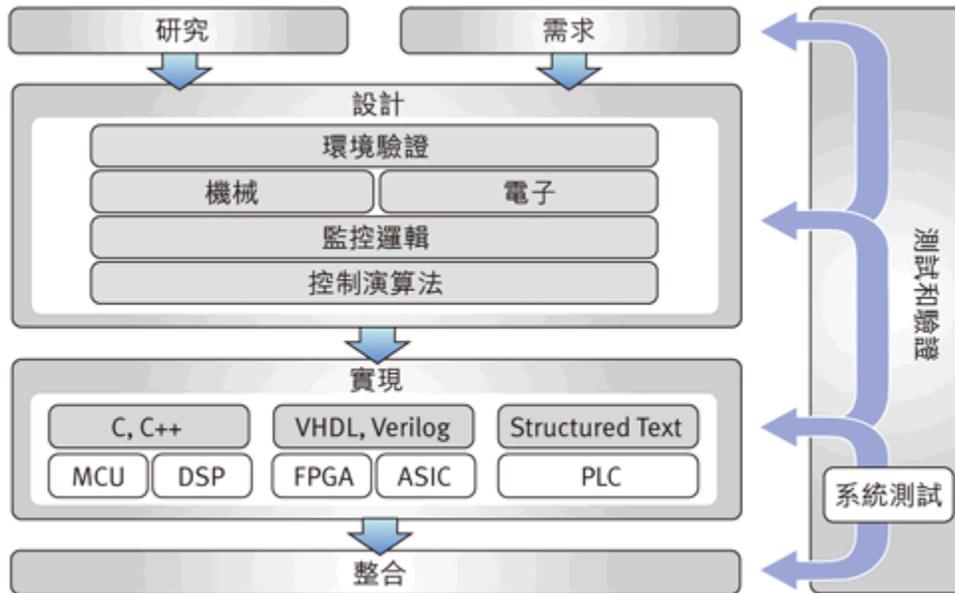


圖 1：模型化基礎設計工作流程可協助早期驗證

從模型到程式碼產生

工程師從設計流程開始，可利用如 MATLAB 和 Simulink 的軟體來建立整個風機葉片的模型，其中每個模塊都分別代表物理系統中的機械、電子、液壓子系統，輸入模型中的空氣動力荷載(Aerodynamic Loads)值，即可針對不同的輸入參數進行模擬，包括風速和風向等。

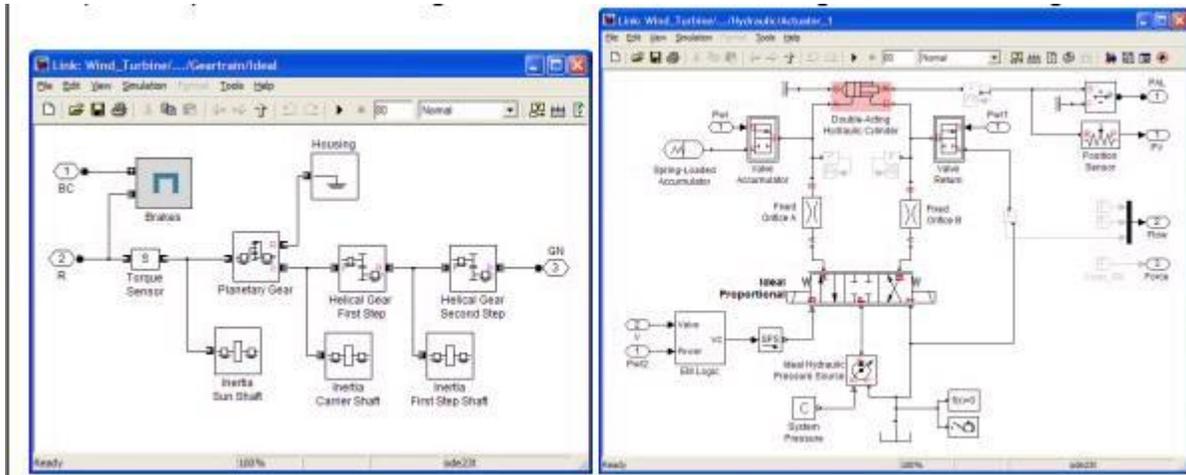


圖 2：利用動態系統模擬軟體 (Simulink) 的傳動模擬模塊組 (SimDriveline) 和液壓模擬模塊組 (SimHydraulic) 建立機械和液壓系統。利用模塊組內建的函式庫，建立客製化的齒輪傳動和驅動模型。

工程師可進行系統層級的分析，選擇技術並決定系統需求。一個理想的驅動系統的模型，可經由逐步的修正最後取代實際的模型，並達到性能最佳化。例如，一個理想的螺距制動器能決定制動器所需的力量，工程師可以藉此計算液壓缸尺寸，開發者可以在模擬中針對所選擇的液壓元件加入更精細的模型；而偏航轉向控制模型，可由先輸入一個理想的扭矩值開始，並逐步調整加入四個單獨的馬達，一個機械系統的模型包含齒輪箱、電路圖和其他細部零組件。

規格需求可以隨著設計不斷被修正，同時也可加入新的規格，藉由使用雙向的連繫(**bi-directional links**)，包含規格與需求的文件也可以直接連結到模型中，這能讓設計者很容易地在模型和規範之中搜尋，檢查確保每一個開發階段中的需求都能被滿足。這種循序漸進的方式，好處是工程師可逐步測試每一階段的設計，並加以驗證和修正需求。

透過模型化基礎設計，所有子系統的模式，在早期開發階段即可整合與模擬。由不同部門開發的子系統也可以逐步加入整個模擬及系統性能的測試中。在每一階段，模型精度與模擬速度間的取舍可取得平衡，如此一來，設計師可重覆快速地檢驗整合後的問題。例如，當專注於開發偏航轉向控制器，工程師可使用詳細的偏航轉向控制器模型，而快速地取代精度較低的葉片螺距控制系統到整個模型中，這樣不僅可縮短模擬時間，並且能檢視兩個系統在整合上面臨的難題。

接下來，即可利用一個完整系統層級模型來進行各種不同的模擬，系統內建的 3D 動畫和圖形可呈現不同的關係值，葉片開發者因此可以藉此了解各種情境下的設計反饋。

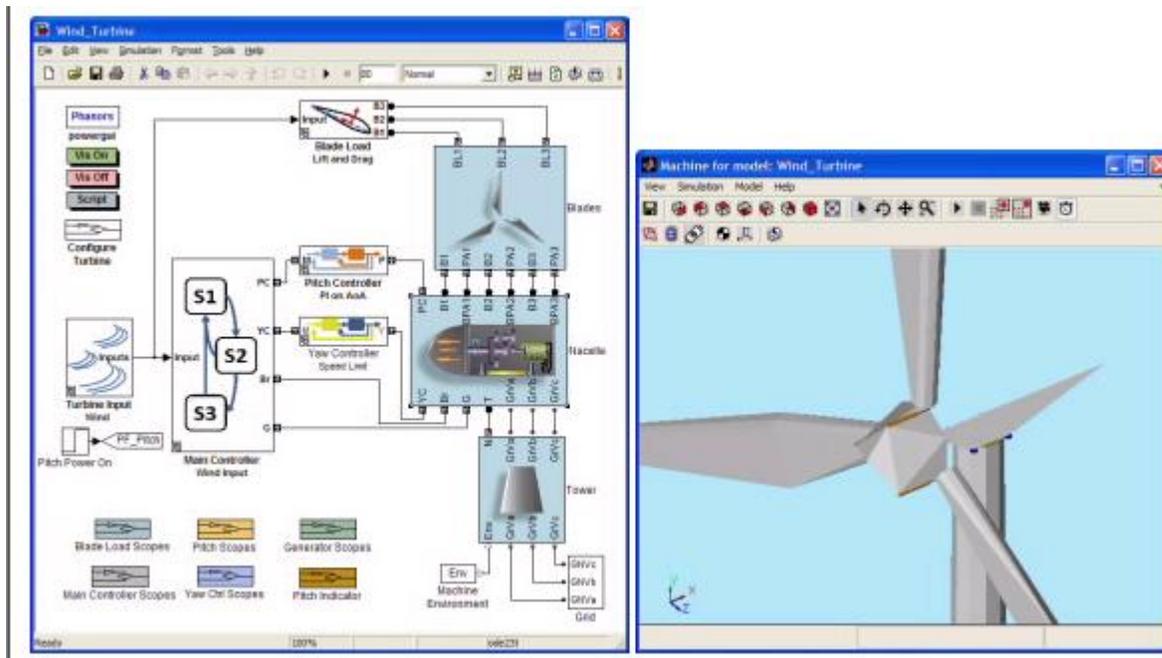


圖 3：風機葉片的系統層級模型包括電子、液壓、機械和控制系統

降低對實體物理原型的需求

將上述模擬的模型轉成 C 程式碼有兩個目的，一是從模型控制演算法轉來的 C 程式碼，是給監督控制系統使用，能測試控制器硬體。若要測試該控制的程式碼以及控制器，硬體迴路測試(Hardware-in-the-loop; HiL)的方法可以取代實際建出風機的物理原型。HiL 的原理是，將物理系統模型(包含機械、電子、液壓)轉成 C 程式碼，並將之下載至一個即時(real-time)系統的電腦上，HiL 的即時電腦連接到硬體控制器，並仿效模擬風機葉片的實際行為，工程師可測試控制系統的條件範圍，比起傳統物理原型測試還要來得廣。而且，藉由使用在早期開發階段所用的相同物理系統模型，工程師可正確地驗證所產生的程式碼性能，而且只要使用桌上電腦即可。

模型化基礎設計的好處是可以在硬體原型化甚至被製造之前，即能測試系統和控制器硬體，並可模擬現場電力的中斷情形，這可大幅節省工程人員往返風場診斷問題所耗費的成

本，尤其是那些架設在偏遠地帶的風機。工程師可將風機葉片的開發、性能最佳化的過程統整，因此而縮短至少一半的開發時間。