

透過虛擬動力計模擬來設計永磁同步馬達力矩控制器

By Dakai Hu, MathWorks

高效能馬達驅動設計中最重要目標之一是要讓永磁同步機(permanent magnet synchronous machine, PMSM)的力矩控制達到高水準的精確度和效率。在本篇文章，我們將以基於有限元素分析(finite element analysis-based, FEA-based)的高逼真 PMSM 機器來模擬設計馬達控制演算法，以達成高力矩精確度，並最大化機器效率。

馬達控制工程師通常只在設計概念研究時使用模擬驗證演算法。這些演算法通常會包含查找表(lookup tables, LUTs)進行校正以達到期望性能。大部分控制器的 LUTs 是使用動力計(dynamometer, dyno)在實際硬體上執行測試而取得。傳統上，這些測試包含了機器有效性驗證、特性化、效率測試。若以在動力計上的測試作為最終目標，在時間上可能較不實際，因為在使用動力計時，必需要考量到更多因素 – 比如動力計操作時間、操作成本、安全問題，以及機器、轉換器、負載系統的故障等等。

盡量降低動力計使用時間因而成為馬達工程師必須的優先任務。模型化基礎設計(Model-Based Design)可以幫助工程師在 Simulink 中以“虛擬的動力計(virtual dyno)”透過模擬來執行更多測試，以縮短硬體測試及整體開發時間。在較高層級的設計階段來說，利用虛擬動力計模擬的目的是要將 PMSM 特性化，取得機器的非線性通鏈與力矩資料，接著將資料用來設計與實現弱磁(flux-weakening)力矩控制查找表。

本篇文章介紹利用虛擬動力計來設計、測試一個基於有限元素分析的高逼真 PMSM 力矩控制器。我們將討論以下幾個問題：

- 什麼是虛擬動力計?
- 為什麼要使用以有限元素分析為基礎的高逼真 PMSM 機器模型?
- 如何將高逼真的 PMSM 機器特性化?
- 如何使用這些特性資料來設計一個力矩控制器?

我們在高逼真 PMSM 機器模型使用的初始的有限元素分析資料是從 ANSYS® Maxwell® 及 JMAG® 產生，由 ANSYS 與 JMAG 特別提供。

什麼是虛擬動力計?

虛擬的動力計是一個模型，以電腦模擬馬達動力計的概念。動力計被用來測試力矩、燃燒發動機或電機的功率。傳統的動力計在力矩速度平面的四個象限都可以操作，幫助進行耦合機器在穩態或暫態的監控與進行測試。圖 1 為動力計機制示意圖。測試中的機器為一台內置式 PMSM (IPM)，而動力計可以是永磁同步馬達、感應電動機(induction machine)、或者是任何可四個象限操作的機器。

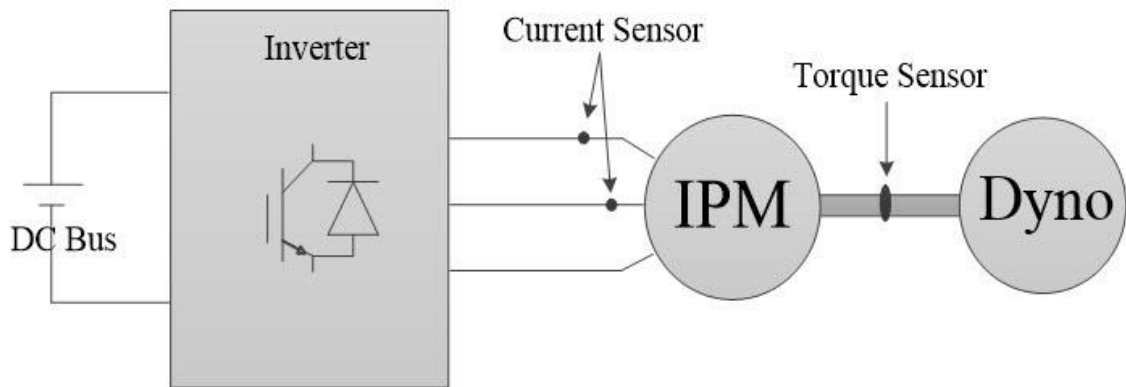


圖 1. 實際動力計設置示意圖

在虛擬動力計中，是以虛擬速度或力矩來源代替動力計機器。受測的機器就像是在真實的動力計一般，若由速度來源驅動，會以力矩模式運作，而若是由力矩來源驅動，則以速度模式運作。運用這樣的方式，所有機器的特性化及測試都可以透過模擬來執行。

為什麼要使用以有限元素分析為基礎的高度逼真 PMSM 機器模型?

在傳統的作法，FEB-based 的馬達設計流程及馬達控制的開發流程是分開進行的，因為馬達控制工程師不是使用 FEA 資料來進行封閉迴路(closed-loop)控制系統模擬。然而在現在，FEB 模擬資料可以匯入到 Simulink 及電力系統模擬模塊組 (Simscape Power Systems™)來進行高逼真的 PMSM 建模。高逼真 PMSM 模型具備了非線性的特性，這是因為飽和、在反動勢(back EMF)受轉子位置影響的空間諧波(spatial harmonic)元件、磁鏈、以及力矩的關係。

FEA-based PMSM 模型不像傳統的線性群聚參數(lumped-parameter) PMSM 模型，它運作起來就像是真正的馬達，這是因為它在轉子位置、磁鏈、電流、與力矩之間有非線性的映射，而不是固定的電感與永磁磁鏈參數。

FEA-based PMSM 模型讓控制工程師可以建立一個實際的封閉迴路模擬，甚至在開始機器正式生產前就可取得其非線性操作特性，這讓控制工程師與馬達設計工程師在開發的早期階段就能夠互相配合。除此之外，因為所有的測試都是在 Simulink 以模擬的方式進行，模型給予馬達控制工程師探索極端操作條件的自由度，不需擔心超出界限。在機器被製成後，模擬結果還可以引導實際的動力計測試。實驗設計(Design of Experiments, DoE)的設置需要對機器特性有所了解，而模擬可以幫助工程師決定如何以最少的運轉點進行測試。

如何將 FEB-Based PMSM 模型特性化?

將 FEB-based PMSM 模型特性化的目的是為了取得不同運轉點下的非線性磁鏈資料。以我們的情況來說，運轉點是由同步參考架構上的穩態電流指定，也就是穩態 i_d 與 i_q 運轉點(operation points)。

有了虛擬動力計，PMSM 模型速度可以維持在固定且低於基準速度(機器終端電壓達到額定調變指數時的速度)。在圖 2 所示的範例，直流匯流排電壓在 500 V 以下時的基準速度大約為 1800 rpm。

在實驗設計 DoE 設置期間，電流的 i_d 與 i_q 指令是由一個電流控制器執行 (圖 2)。在這個受控體模型，速度來源會在虛擬動力計控制 PMSM 模型速度時起作用。

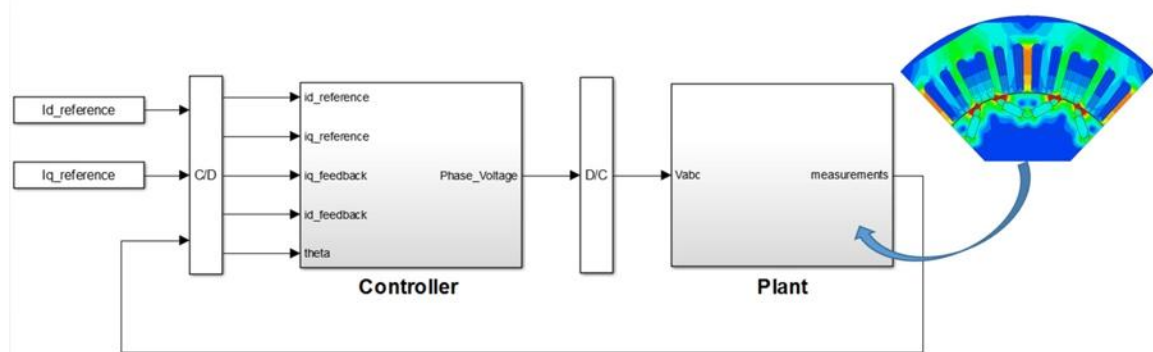


圖 2. 虛擬動力計的 DoE 設置

我們對每一個受指令的[id, ig]組合執行模擬，讓電流反映達到穩態，接著登錄(log)下列資料集: [id, ig, flux_d, flux_q, torque]。因為在 FEB-based PMSM 機器中有諧波與漣波，最好在登錄資料集之前先取好穩態下特定持續期間的平均值。

舉例來說，為了將監視區內的 PMSM 機器特性化，所有在圖 3 指定的[id, ig]組合會經過掃描。圖 3 的紅線代表這台 PMSM 機器的電流運轉限制，或電流極限圈(current-limit circle)。雖然機器本身在一般正常的運轉下不會超過電流極限圈的範圍，不過在虛擬動力計，我們可以讓機器超限運轉來掃描所有圖 3 標示的運轉點，不必擔心實體機器的過熱問題。

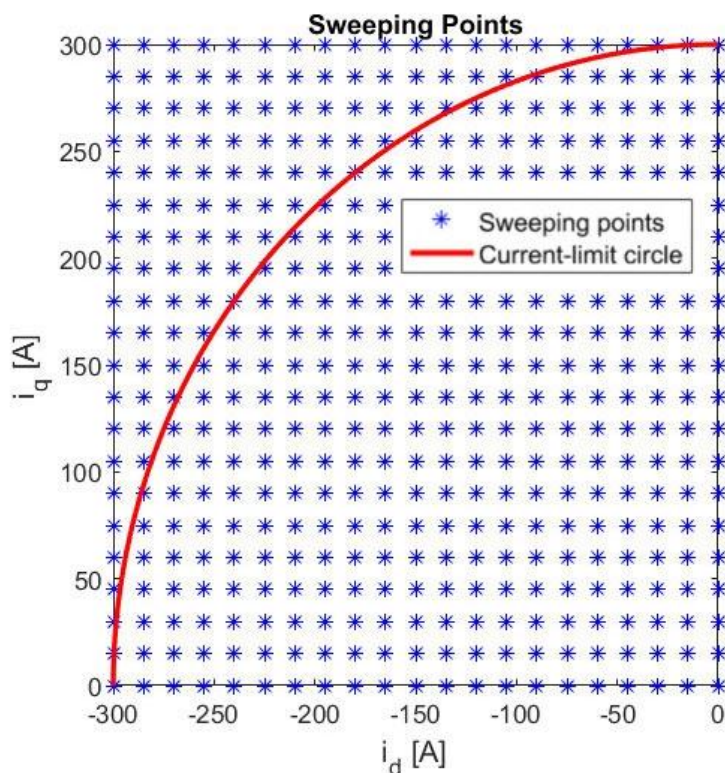


圖 3. FEB-based 高逼真 PMSM 機器掃描點(sweeping points)

我們可以在 MATLAB®中寫程式完成特性化的工作。還有另一種方式，是利用 Model-based 調校工具箱(Model-Based Calibration Toolbox™)來設置 DoE 的工作，可自動掃描程序與收集資料。

如何以特性化的資料設計力矩控制器

現在我們已經有了高逼真 PMSM 機器的特性化資料，可以開始設計力矩控制器。這包含以下三個階段：

1. 找出最理想的運轉範圍
2. 選擇查找表點
3. 力矩控制器性能測試

找出最理想的運轉範圍

最理想的運轉範圍被定義在特定的力矩指令與速度回饋，包含機器最理想的運轉點。對一個線性群聚參數 PMSM 模型，最理想的運轉範圍可以透過 PMSM 機器的參數以數學計算出來。但因為真實機器的參數會隨著運轉點改變，這項計算以真實機器來說並不精確。

有兩種方法可以計算出高逼真 PMSM 機器模型更精確的理想運轉範圍。其一是以特性化的資料集[id, ig, flux_d, flux_q, torque]、以及用 MATLAB 來撰寫程式。或者也可以利用 Model-Based 調校工具箱推導而來。透過 Model-Based 調校工具箱，我們可以設計實驗、設定目標、登錄符合所設目標的資料。舉例來說，其中一部分已知的最理想運轉範圍為每安培的最大力矩(maximum torque per ampere, MTPA)曲線。為了要計算出這條曲線，我們可以利用 Model-Based 調校工具箱來設置一個 DoE，讓我們沿著電流環(current circle)掃描電流運轉點，並監控力矩直到達到最大力矩點。還可以用類似的方法來計算最大電流與每瓦最大力矩(maximum torque per volt, MTPV)的臨界值。

圖 4 顯示計算出的理想運轉範圍。我們也可以繪製力矩與速度的輪廓，因為這些是計算過程中的目標或限制。我們利用曲線契合工具箱(Curve Fitting Toolbox™)將最理想運轉範圍的邊界平滑處理，並消除由掃描資料中機器的非線性或諧波導致的異常值。

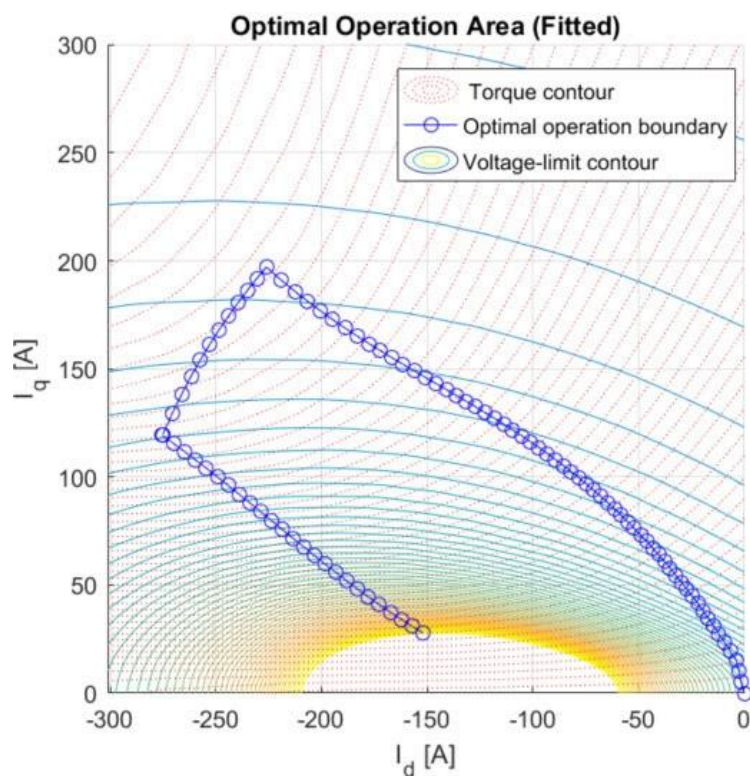


圖 4. 最理想運轉範圍邊界的計算

選擇查找表點

力矩控制器設計的第二個階段為在最理想運轉範圍內依據每一個力矩指令與速度回饋找出每一個運轉點。這樣做的目標是要找到不僅能符合不同力矩指令與電壓限制，同時又能讓定子繞組銅線(stator winding copper)損耗最小化的運轉點。在 Model-Based 調校工具箱，我們可以設定目標為每安培的最大力矩(maximum torque per ampere, MTPA)，設定限制為最大化相流(phase current) I_{s_max} 與電壓 V_{s_max} ，接著執行最佳化。

圖 5 為經過最佳化、可符合目標與限制的運轉點群集。這些最佳化的運轉點將在圖 6 所示的建議力矩控制器作為查找表數據點。

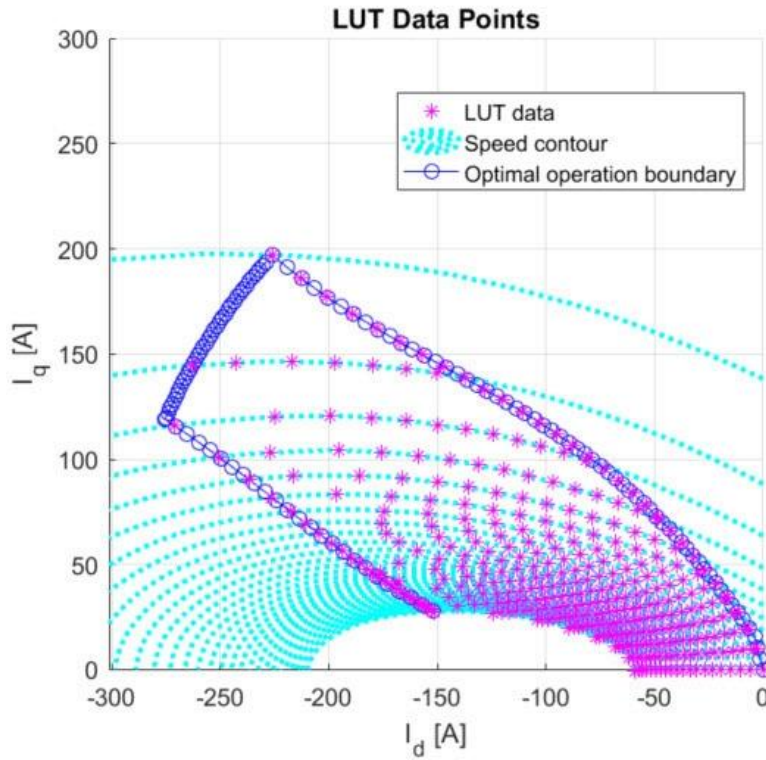


圖 5. 理想運轉範圍內最佳化的運轉點

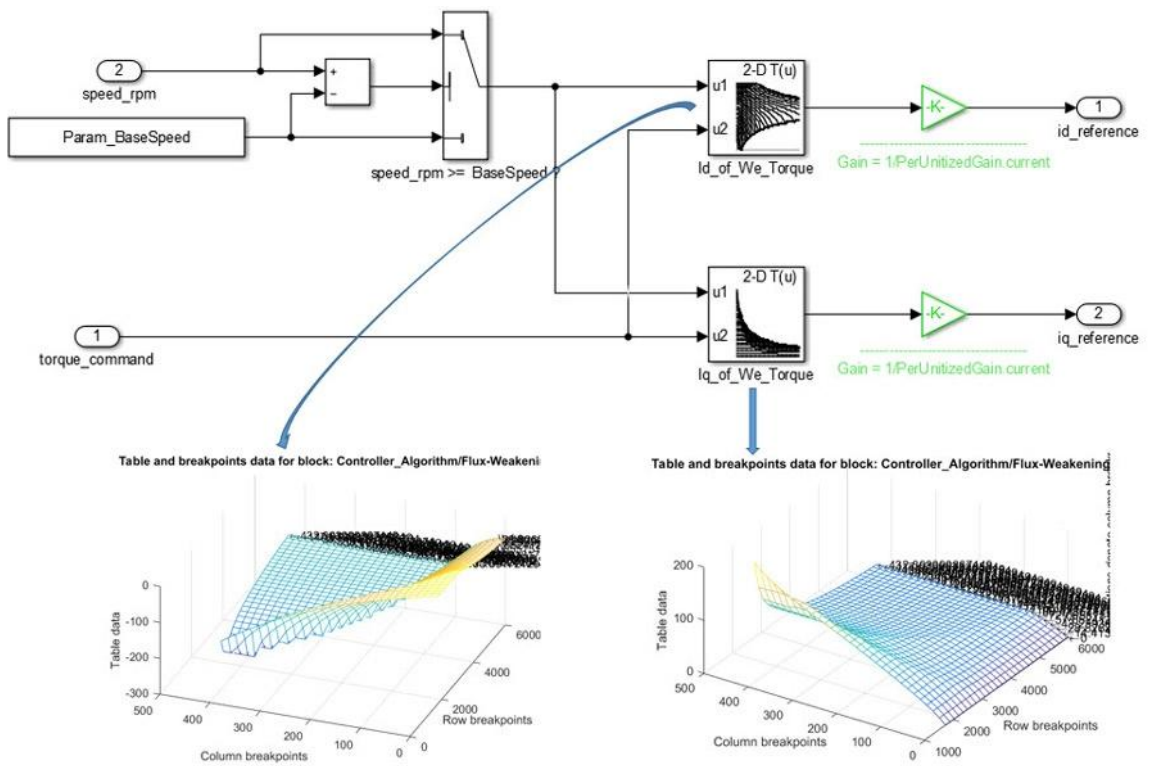


圖 6. 帶有 LUTs 的開放迴路力矩控制器

力矩控制器性能測試

為了測試控制器，我們用虛擬動力計來執行模擬。在測試當中，我們先不讓機器速度超過大約 1800 rpm 的基準速度，只讓速度維持在 1500 rpm。一秒鐘之後，我們增加機器速度直到達到機器的弱磁區域。我們對獨立的力矩步驟給予指令，由開放迴路力矩控制器執行。圖 7a 為模擬結果。

我們可以從圖 7a 的性能波型看到，力矩很適當地跟隨著力矩步驟指令被控制著，不論是否超過基準速度。

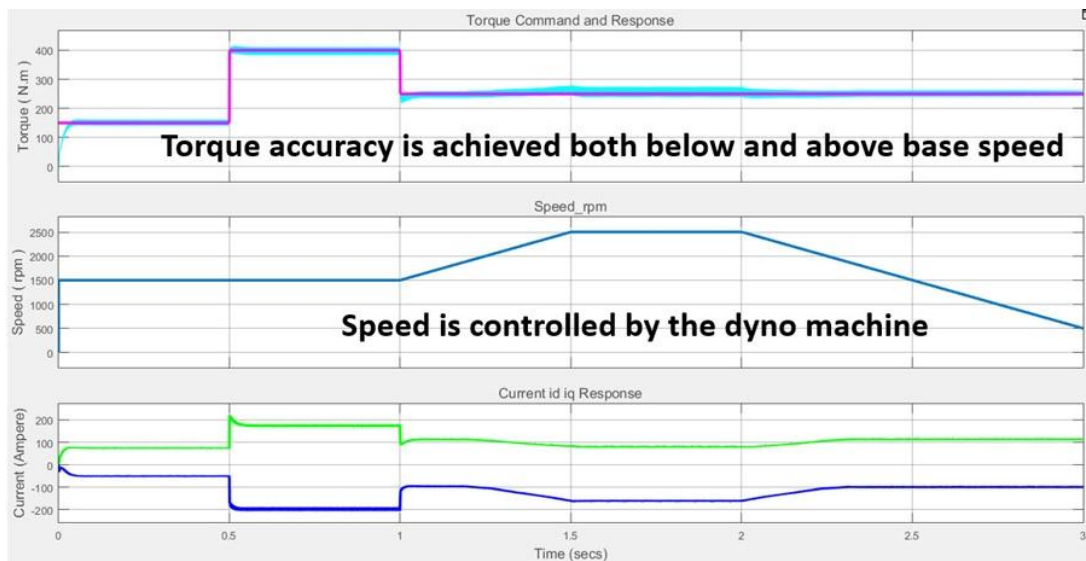


圖 7a. 力矩控制器性能

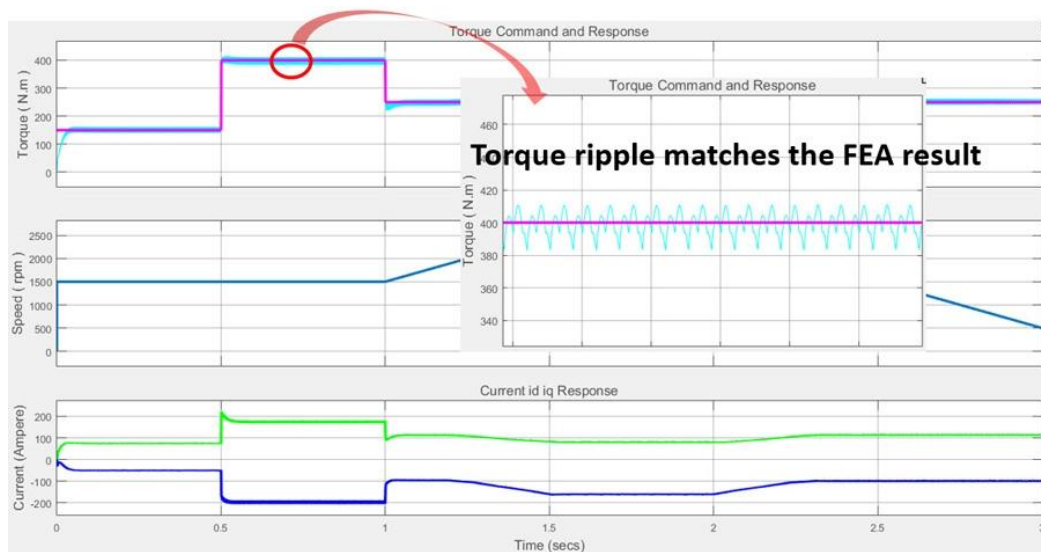


圖 7b. 力矩控制器性能 (在放大力矩漣波時)

圖 7b 將以高逼真 PMSM 模型作為受控體所產生的力矩漣波的波型放大來看。(請注意力矩漣波通常受到連結 PMSM 的機械系統抑制，且不受注意。)

我們對於模擬的結果感到相當滿意。以上提到工作流程的結果，也就是經過優化的力矩控制查找表，現在可以在機器生產完成時在真實的動力計上被測試。

藉由採用以模型化為基礎的虛擬動力計的方法，我們幾乎可以在馬達設計的同時就開始進型馬達控制開發工作，該方式也能提供給之後實驗設計 DoE 與初始控制查找表相當有用的資訊。文中提到的封閉迴路模擬平台也可以被用來快速驗證馬達驅動性能，而不需要運行在真實的動力計上。