

## 油電混合動力車 — 傳動元件理論與模擬介紹

作者：Peter van Duijsen / 張佑全

本文針對油電混合動力車 (HEV)，使用電力電子與電機系統軟體 Caspoc，模擬其動力整合裝置、電子與電動機控制部分，如差動齒輪、齒輪箱與行星齒輪，並針對電動機控制的電源轉換器與向量控制，進行深入的探討。

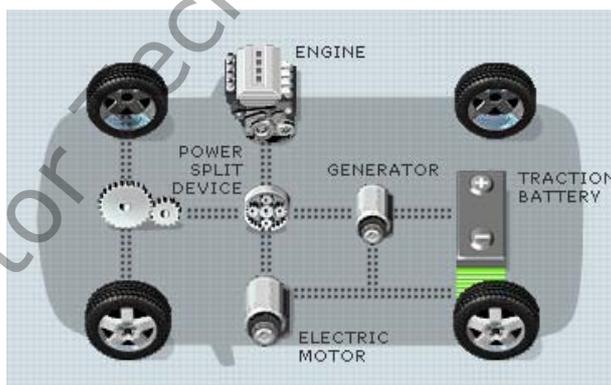
大多數的汽車都包含一個內燃機 (IC)，其所需的燃料、為汽油或瓦斯，是由有限的自然界化石產生。因應汽油價格飆漲，油電混合動力車 (HEV) 開始受到重視。並且在最近三十年內，有越來越多人開始研究車輛的下一代驅動系統。

且因為環境與經濟問題，如空氣污染、酸雨與氣候變動，以及石油價格的波動，例如波斯灣地區的石油政策，以及卡崔娜襲擊紐奧良附近的鑽油平台，使得石油價格不斷上漲，讓更多人轉而考慮油電混合動力車，以符合其省油的需求。

### 1. 油電混合動力車

HEV 同時使用汽油引擎與電動馬達，其中引擎提供傳輸動力，產生額定的轉速；馬達則協助啟動、煞車，並提供非額定速度下的動力。馬達所提供的動力，將附加至引擎產生的動力中。

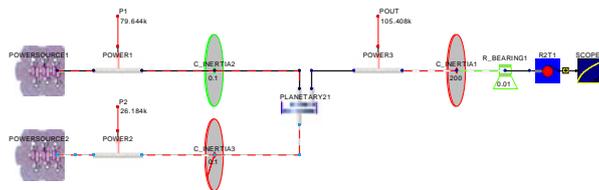
圖一為 HEV 的驅動系統，包含引擎、馬達、蓄電池與發電機，以及動力整合裝置，此裝置傳送馬達與引擎的輸出、附加馬達至引擎的動力，並讓引擎維持一定轉速。



圖一 HEV 的架構，包含引擎、馬達、發電機、蓄電池與動力整合裝置。

#### 1.1 動力整合裝置

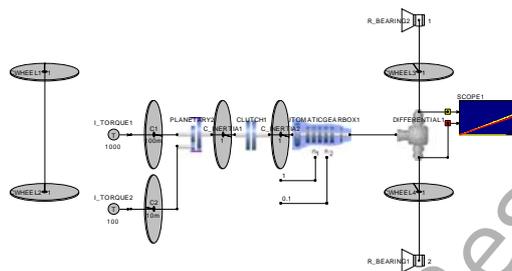
圖二為動力整合裝置的模擬，二個引擎的輸出經由行星齒輪相加，並傳至輸出軸。其中第一個引擎的輸出約為 80kW，第二個為 26kW，使輸出軸產生 106kW 的動力，並以一個旋轉質量與軸承來模擬引擎的負載。



圖二 動力整合裝置提供二個引擎的動力至輸出軸。

## 1.2 差動齒輪

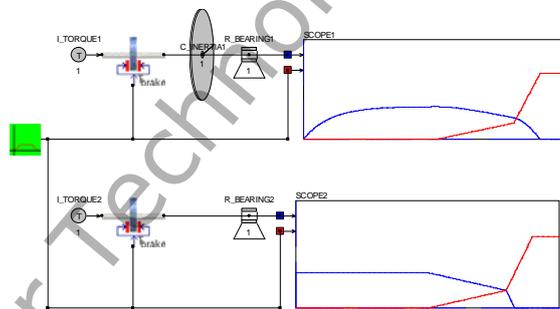
圖三模擬 HEV 的機械傳輸鏈，以研究引擎、動力整合裝置、齒輪箱、差動齒輪與車輪間的動力傳輸。除了模擬軸承、車輪質量與摩擦損失，藉由在車輪軸承上，使用二個不同的摩擦係數，以模擬出二個車輪不同的角速度。



圖三 HEV 的機械傳輸鏈模擬。

## 1.3 煞車

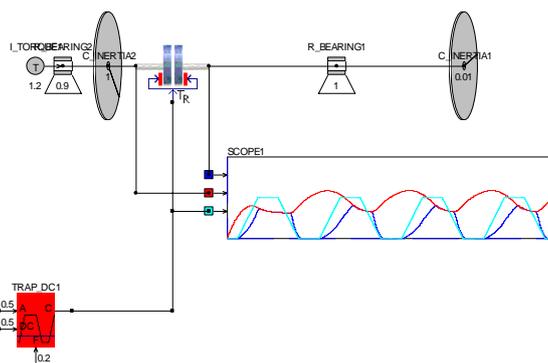
煞車是車輛不可欠缺的功能，模擬時並非直接建立此模型，而是加入煞車扭矩至傳輸鏈。圖四為煞車盤上的煞車輸入，以此降低傳輸鏈的能量，轉化為熱能並離開裝置。



圖四 傳輸鏈的煞車模型。

## 1.4 離合器

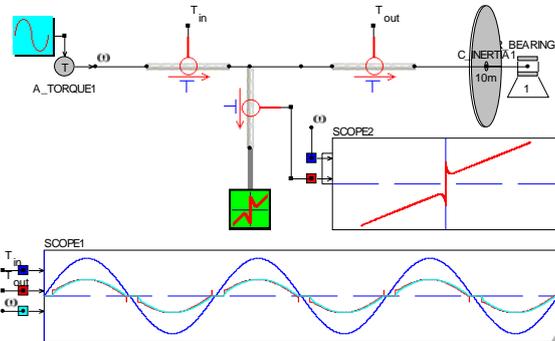
圖五以二個互相受壓抵制的平板，模擬離合器行為。由平板抵抗彼此的壓力，決定二者為結合或分離狀態。若平板能滑動，則離合器將傳遞部分的輸入扭矩至輸出軸，並擁有較低的角速度輸出。



圖五 二個旋轉質量間的離合器模型。

## 1.5 摩擦力

機械損失可使用簡單的摩擦模型表示，其損失量正比於角速度大小。然而真實的模型更為複雜，必須考慮靜止時的煞緊與啟動扭矩。使用數學函數物件，可精確模擬此類摩擦行為。傳輸鏈因摩擦而損失的能量，將轉換為熱能並離開此模型。



圖六 於模型使用數學函數模擬扭矩移除。

## 2. 馬達模型

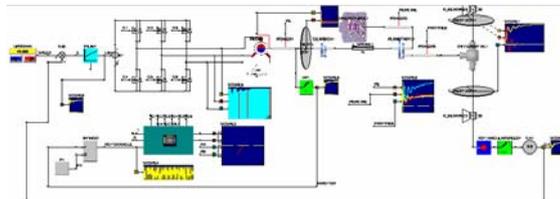
建模馬達模型可使用不同方法。首先，可使用一個簡單的線性模型，以了解系統的整體效能。接著再建立更詳細的馬達模型，以研究其他行為，如磁飽和影響，以及非線性行為。永磁同步馬達與感應馬達的模型可參考[11]。

## 3. 電力電子模型

於 HEV 系統，電力電子裝置用於馬達的驅動與控制，其設計困難點為，車輛運行時此裝置不能發生錯誤。高溫是其中一項挑戰，設計者必需考慮故障保護(fail safe)，以避免中斷發生。熱設計文獻可參考[4]

### 3.1 電源轉換器與永磁同步機

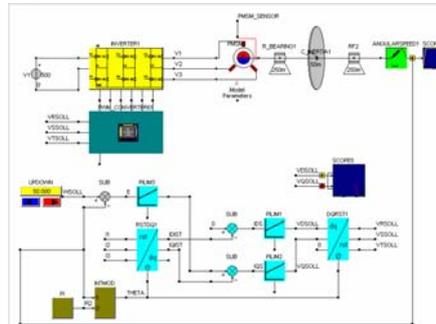
圖七為完整的 HEV 電子與機械傳輸鏈，並使用理想開關模型，來模擬電源轉換器，以達到快速模擬的效果。由永磁同步馬達 (PMSM) 產生的扭矩圖，可觀測到轉換器經脈衝寬度調變 (PWM) 產生的諧波。在包含電力電子、PMSM 與機械傳輸鏈的完整模型中，能進行動力電子控制的設計與最佳化。



圖七 HEV 電子與機械傳輸鏈的模擬。

## 4. 控制

考慮驅動系統的整體效率與效能，電力電子控制是一個重要的環節。圖八為 HEV 驅動範例，使用一個永磁同步馬達、電力電子轉換器、機械負載與向量控制模型。之後的節次將簡要的討論設計管制(design control)。



圖八 PMSM 的向量控制。

### 4.1 磁場導向控制

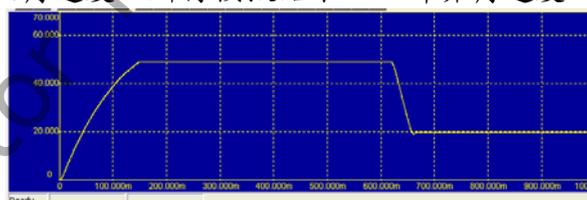
向量控制的模擬中，使用永磁同步馬達，並連接至電源轉換器。此同步馬達是一個帶有永磁激發同步馬達的 dq 模型，產生的扭矩將傳送至一個包含旋轉質量與軸承摩擦的機械傳輸鏈。使用感測器模組，可量測軸承的角速度並計算轉軸的位置。

永磁同步馬達的電流感測器可測量定子電流，以計算 dq Frame 的靜子電流與軸承角度的關係。此電流量測值將與設定值比較，輸出結果經由二個 PI 控制器，以控制 dq Frame 中所需的定子電壓。

模擬時，d 軸電流預設為 0，並以速度控制器控制 q 軸的預設值。此控制器由一個 PI 模型建立，其輸入為預設與量測角速度的差值，輸出為 q 軸所需的定子電流。dq Frame 中的控制定子電壓，將轉換為真實定子電壓，做為脈衝寬度調變的輸入。

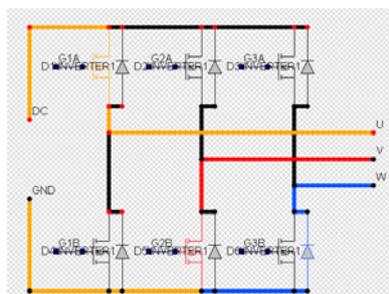
### 4.2 控制執行模擬

圖九為模擬時更改轉軸角速度，所得模擬結果，以計算角速度改變對於輸出的響應情形。



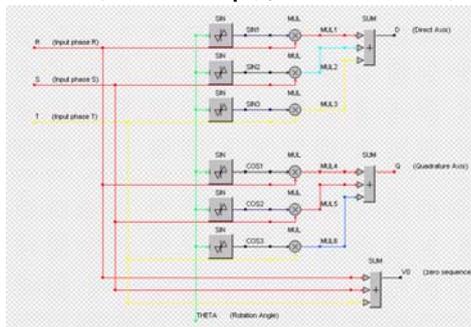
圖九 模擬時更改速度所得的驅動響應。

模擬時可以顯示整流器的內部結構，並以動畫方式追蹤，觀測電源轉換器的電流流動，如圖十。



圖十 電源轉換器的動畫效果。

圖十為電源轉換器的模擬，此時左上方 MOSFET 為通路(橘色)、連接至 DC 正電壓端。在模型下半部，右下方的二極體 (藍色) 與其鄰近 MOSFET (紅色)處，包含一個無約束過程 (freewheeling process)。圖十一為 RST-dq 轉換器的模擬範例。



圖十一 Clark/Park 轉換器的內部模型。

### 4.3 嵌入式控制C程式碼的匯出

圖十二為匯出的 C 程式碼，包含執行速度與未使用區塊名稱的最佳化處理，以縮減 C 程式碼的容量。可將此模擬過程的程式碼，使用於 DSP 或單晶片控制器，或是其他的嵌入式 C 語言程式專案。

```

PMSM_VectorDrive2x - Notepad
File Edit Format Help
static double _dblLib_74(SIN) )Remark = Block = SIN2\DQRST1
_dblLib_74=sin(1*THETA*(-2.09439510000000E+0000));
static double _dblLib_79(SIN) )Remark = Block = SIN1\RST1DQ1
_dblLib_79=sin(1*THETA+0);
static double _dblLib_67(SIN) )Remark = Block = SIN1\DQRST1
_dblLib_67=sin(1*THETA+0);
static double _dblLib_88(SIN) )Remark = Block = COS3\RST1DQ1
_dblLib_88=cos(1*THETA+ 2.09439510000000E+0000);
static double _dblLib_78(SIN) )Remark = Block = COS3\DQRST1
_dblLib_78=cos(1*THETA+ 2.09439510000000E+0000);
static double _dblLib_89(SIN) )Remark = Block = COS2\RST1DQ1
_dblLib_89=cos(1*THETA+(-2.09439510000000E+0000));
static double _dblLib_73(SIN) )Remark = Block = COS2\DQRST1
_dblLib_73=cos(1*THETA*(-2.09439510000000E+0000));
static double _dblLib_90(SIN) )Remark = Block = COS1\RST1DQ1
_dblLib_90=cos(1*THETA+0);
static double _dblLib_68(SIN) )Remark = Block = COS1\DQRST1

```

圖十二 C 程式碼的匯出。

## 5. 油電混合機械與電力模型 油電混合機械與電力模型

圖十三為 HEV 的機械傳輸鏈與電力電子模型。二個後輪由差動齒輪驅動，差動齒輪的輸入端連接至離合器，離合器的另一端則連接至動力整合輸出。

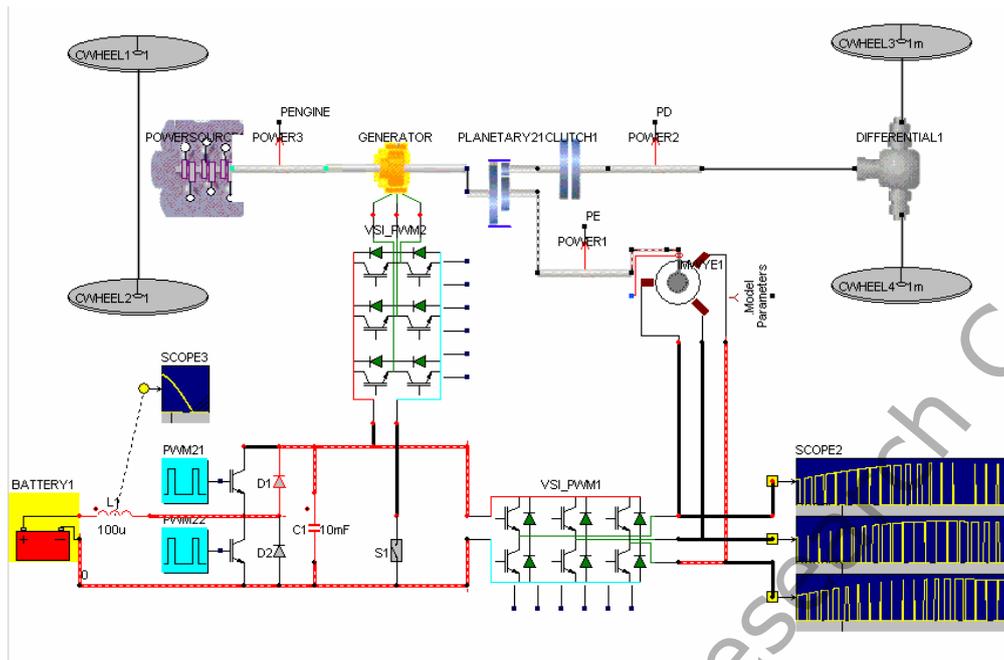
動力整合裝置包含行星齒輪，使用柴油引擎與馬達做為輸入，輸出則連接至離合器。齒輪箱在此範例中未被建置。動力整合軸承分別連接至柴油引擎與發電機。發電機的三相終端被整流，受開關控制並連接至一個直流匯流排(DC bus)。

使用控制器，電池電力可由直流匯流排載入，並經由電壓源轉換器與脈衝寬度調變 (PWM)，傳送動力驅動馬達。

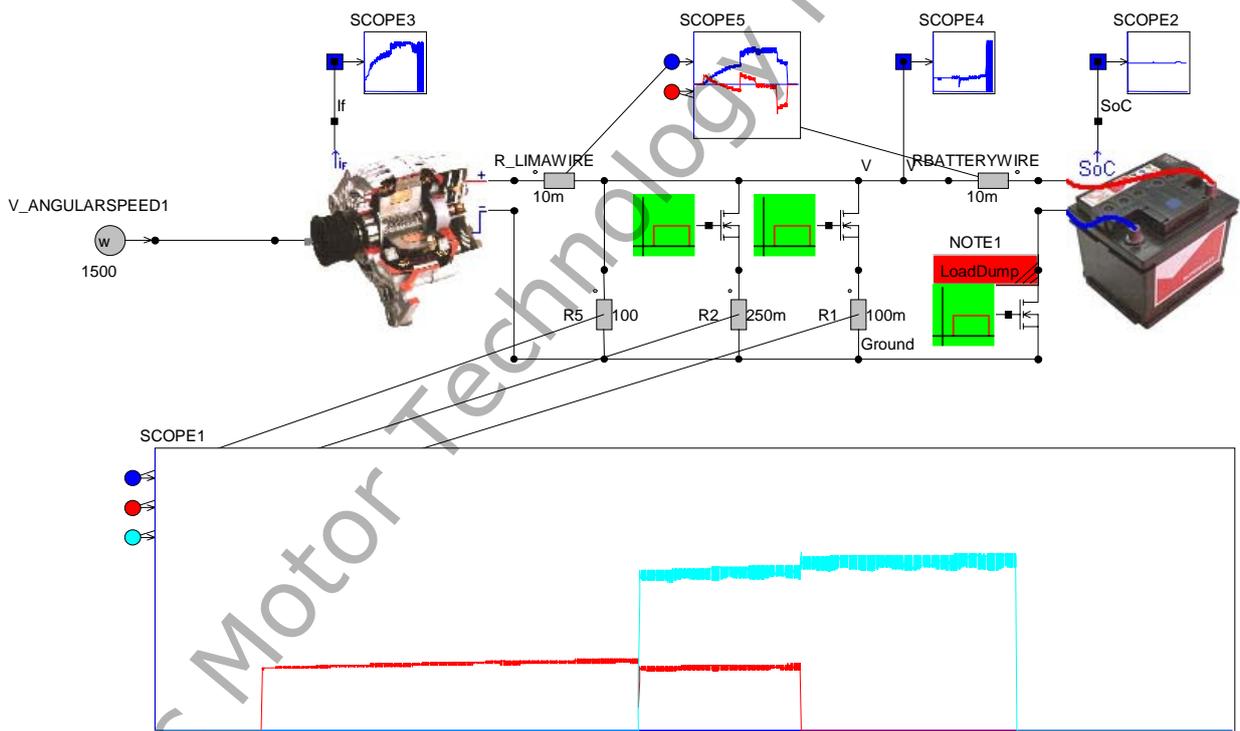
### 電力網路模擬

車輛的電力網路系統 (Automotive Power Grid)，為一個由三相磁場激發同步發電機、整流器、控制器與鉛酸電池，所產生的直流電壓。當內燃機關閉時，直流電壓將變得不穩定，同時電池與電力網路系統斷開。

此時交流發電機仍持續運轉並產生能量，但因電池斷開而無法儲存，而使電力網路的電壓上升。圖十四的模擬顯示，在電池斷開後，由於驅動系統慣性，使交流發電機以固定速度運轉，最後使電壓提升。



圖十三 HEV 的馬達驅動傳輸模型。



圖十四 車輛電力網路與負載突降 (Load-Dump) 現象。

## 結論

本文簡短討論 HEV 的建模與模擬過程，著重於電力電子與電機機械的控制，以及各種元件的建模，例如機械傳輸鏈、馬達、電力電子與控制裝置。在機械傳輸鏈中，動力整合、差動齒輪、轉軸與車輪慣性是必須的模型元件。



馬達模型可由系統行為的一階模型，或由有限元素計算決定；電力電子模型則包含非線性開關行為，以模擬電機中的諧波。最後經由磁場導向控制的模擬，討論內嵌 C 語言程式碼，以應用於 DSP 或單晶片控制器。

## 參考文獻

- [1] J. Otto, U. Killat, and P. J. van Duijsen, "Energy Based Model Synthesis for Electrical Actuators and Sensors," *PCIM 2002*, Nürnberg.
- [2] P. Bauer and D. Owsianik, "Integrated Computers Aided Design of a Flyback Converter," *Power Electronics Journal*, April 2002
- [3] P. J. Van Duijsen, P. Bauer, and D. Gospodaric, "simulation based Optimization of Electrical Drives," *PCIM 04*, Nurnberg, May 25-27, ISBN 3-928643-39-8, pp.922-927
- [4] P.J. Van Duijsen, P. Bauer, and U. Killat, "Thermal Simulation of Power Electronics," *PCIM 04*, Nurnberg, May 25-27, ISBN 3-928643-39-8, pp.881-886
- [5] P. Bauer, P. Korondi, and P. J. van Duijsen, "Integrated Control and circuit Simulation for a Motion Control System," *EPE 2003 Toulouse*, 2-4 September 2003, ISBN 9075815-07-7
- [6] P. Bauer and P. J. van Duijsen, "Integrated Simulation of Embedded Controls in Power Electronics," *PCIM 2002, Proceedings Intelligent Motion*, ISBN 3-928643-31-2
- [7] U. Drofenik, , J. W. Kolar, , P. J. Van Duijsen, and P. Bauer, "New Web-Based Interactive E-Learning in Power Electronics and Electrical Machines," *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference 36th IAS Annual Meeting*, Chicago (Illinois), USA, Sept. 30 - Oct. 4, Vol. 3, pp. 1858 - 1865, 2001.
- [8] H. Weiß, A. Schmidhofer, and A. Schmid, "Animated and Interactive E-Learning, Concept and Realization," *The IASTED International Conference on WEB-BASED EDUCATION*, WBE 2004, February 16-18, 2004, Innsbruck, Austria
- [9] B. Davat, P. Bauer, and P. J. Van Duijsen, "Teaching of power electronics: from graphic representation to animation," *11<sup>th</sup> International power electronics and motion control conference*, 2 -4 September 2004, Riga, Latvia EPE-PEMC 2004.
- [10] Simulation Research, Caspoc2005, [www.caspoc.com](http://www.caspoc.com)
- [11] Bauer P. and P. J. Duijsen van, "Challenges and Advances in Simulation," *PESC 2005*, Brazil
- [12] A. Veltman, D. Pulle, and De Doncker R.W., *Fundamentals of Electrical Drives*, Springer 2007, ISBN-13: 978-1402055034