

結合燃料電池與鋰電池的車用混合動力系統模擬

範明賢、*張崴縉

南臺科技大學機械工程系

*wcchang@stust.edu.tw

摘要

本研究以模擬方式探討以燃料電池與可充電電池組成雙電力的混合動力系統，安裝於一小型電動車輛，期望能找到較佳能源控制策略。此系統使用 1.2 kW 的質子交換膜燃料電池組為主動力源，搭配 3kWh 鋰離子電池，在不同能量分配策略下，觀察車輛的性能表現。使用 ADVISOR 分析軟體，模擬 HV1 及 HV2 二個不同控制策略之行駛行為。模擬車輛在縮小比例的都會區動力計行駛時程（reduced-urban dynamometer driving schedule, r-UDDS）模式下，不同控制策略下的能量改變及車輛行駛狀態。結果顯示，在蓄電池充電至預設電量且車輛遵循相同速度規範的狀況下，HV2 比 HV1 有更少的氫氣消耗量與更高的燃料電池系統效率。在適當能量配制下，燃料電池混合動力車能節省氫氣消耗量且克服電動車巡航限制。

關鍵詞：混合動力車、車輛模擬、燃料電池、氫氣消耗量

Simulation of Vehicle Hybrid Power System Combining Fuel Cell and Lithium Battery

Pham Minh Hien, *Wei-Chin Chang

Department of Mechanic Engineering, Southern Taiwan University of Science & Technology

Abstract

This study uses a simulation method to explore a dual electricity hybrid power system consisting of a fuel cell and a rechargeable battery. It is installed in a small electric vehicle, and it is expected to find a better energy control strategy. This system uses a 1.2 kW proton exchange membrane fuel cell stack as the main power source, with the assistance of a 3 kWh lithium ion battery, to observe the performance of the vehicle in different power distribution modes. Use ADVISOR analysis software to simulate the driving behaviors of two different control strategies—HV1 and HV2. Simulate the energy change and vehicle driving status under different control strategies in a reduced scale urban dynamometer driving schedule (r-UDDS) driving cycle. The results show that HV2 has less hydrogen consumption and higher fuel cell system efficiency than HV1 when the battery is charged to a preset charge and the vehicle follows the same speed specifications. With proper energy allocation, fuel cell hybrid vehicles can save hydrogen consumption and overcome the cruising limitations of electric vehicles.

Keywords: Hybrid Vehicle, Vehicle Simulation, Fuel Cell, Hydrogen Consumption.

壹、前言

電動車使用馬達作為牽引動力，並將化學電池、燃料電池、超級電容等作為其相應的能源。與引擎車相比，電動車具有許多優點，例如無排放、效率高、不依賴石油及運行平穩。電動車的傳動系統峰值效率約為 70%，不僅噪音低而且維護需求少。然而具有合理電池重量的純電動汽車，其行駛範圍限制大約為 100 公里 [1]，並且至少需要幾個小時才能充飽電。因此多數純電動車充電後的行程仍不及使用引擎的車輛，且充電站數量及普及程度亦難以滿足需求。實際上，基礎研究 [2] 顯示，即使具有最佳的電池容量，電動汽車也難挑戰使用液態燃料的車輛。使用傳統儲能系統的電動汽車，其局限性促使人們尋求新的解決方案，除改善可行駛距離，也必須減少能量補充時間，同時保持零排放的關鍵優勢。因此，近年來，先進的車輛技術研究投入燃料電池車輛以及混合動力車輛。

氫經常被認為是未來的燃料，但它不是能源，只是儲能的一種手段。氫氣每單位質量的能量含量為 120.7 kJ/kg，幾乎是汽油的 2.6 倍。燃料電池使用氫來進行發電，是很有潛力的動力源，供電給馬達可以推動車輛。使用燃料電池的汽車，不僅可以快速補充氫氣，行駛距離亦較遠。與引擎車輛相比，因為能量轉換是由化學能直接轉為電能不經燃燒，所以具有效率高且低汙染排放的優點 [3]。燃料電池不受熱機卡諾 (Carnot) 效能限制，因此效率比引擎高約兩倍左右 [4]。此外由於燃料電池內部沒有移動元件，因此非常安靜可靠。其中低溫型燃料電池之一，質子交換膜燃料電池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 具有高功率密度、低操作溫度 (60~90 °C)、快速啟動和良好的動態性能，非常適合於汽車應用。

做為車用動力源，燃料電池可以自成一獨立系統，也可以搭配成為混合動力系統。後者作法之一是以燃料電池或一般電池為主，藉由共同使用來縮小主要電源的大小，當功率需求低時，僅使用主電源提供所需的功率；當電力需求很高時，例如在高負載下或在加速過程中，由輔助電源提供額外功率，使主電源系統更有效地運行。混合動力的缺點是重量增加、控制系統的複雜性和額外的電源成本，但是通過混合動力的使用，可以降低汽車主電源的成本 [1]。有許多不同種類的車輛混合動力整合方式，功率可以跟隨負載或平衡負載的需求 [5]，或以能量或功率混合方式 [6] 來使用燃料電池。

燃料電池使用氫或甲醇等燃料產生電能，而且沒有噪音和燃燒。當使用氫氣作為燃料時，唯一的排放物將是水。只要能夠持續供應燃料，該技術就可以克服電動汽車的短距離限制。在眾多類型的燃料電池之間，質子交換膜燃料電池具有最高的功率密度 (> 1 kW/l)，因此在車輛應用中最受歡迎。不幸的是，氫氣在車上儲存困難，無法與一般車輛的成本競爭，都阻礙了將燃料電池車輛引入市場。直接甲醇燃料電池可以克服燃料儲存的問題，但是甲醇對人體有劇毒不安全，且燃燒時沒有可見的火焰。儲存汽油在車上進行重組改質是另一種選擇 [7]，但目前技術仍未成熟。動力系統效率越高，儲氫問題就越小，解決方案是燃料電池汽車帶有煞車回充和搭配其他電池成為混合系統。近幾十年來發展密集的混合動力是汽車的新概念，這種類型的設計將縮小尺寸的主電源 (燃料電池或蓄電池) 與峰值功率設備 (電池，超級電容器...) 結合在一起。峰值功率設備會在所需的高功率超出主電源供應量瞬間啟動，並在總功率需求較低的時間進行充電。

當前電池技術中，鉛酸電池是目前市場上最便宜，最簡單的電池技術。但是，鉛酸電池能量密度低，壽命短且在低溫下性能較差 [8]。主要競爭對手鎳氫 (Ni-MH) 電池、鎳鎘 (Ni-Cd) 電池和鋰離子電池，皆已用於許多電動和混合動力汽車。使用鎳鎘電池供電的電動汽車包括克萊斯勒 TEVan，馬自達敞篷跑車，三菱電動汽車，雪鐵龍 AX，標致 106 和雷諾 Clio [9]。豐田和本田在其混合動力汽車中使用了鎳氫電池。鎳氫電池具有很高的自放電率，很難正確充電 [8]。鋰離子電池的標稱電壓約為 3.7 V，是傳統鎳氫和鎳鎘電池的三倍 (1.2 V)，鋰離子電池的最大優勢之一是其優越的比能量。另外，鋰離子電池沒有鎳基電池相關的記憶效應，鋰離子電池還具有最低的自放電 [9] 和較高的充放電循環。因此，鋰離子電池是其他電池技術的首選。

貳、實驗設計

本研究將原本使用鋰離子電池的純電動車，加裝燃料電池堆，改裝為燃料電池/電池混合動力汽車，如圖 1。為了分析不同控制策略對車輛性能的影響，使用 ADVISOR 軟體建立車輛、燃料電池、電池和馬達的數學模型，提出了兩種不同的控制策略加以討論。除模擬運行過程以預測整體車輛性能，並進行實測以驗證結果。



圖 1 改裝後之燃料電池/電池混合動力車

電動汽車比任何其他類型的動力傳動系統效率更高。燃料電池車輛，尤其是燃料電池/電池混合動力車輛已經成為克服電動車短行駛距離限制的可能解決方案，同時仍保持電動車輛的優點。本研究之推進系統以一個 1.2kW 的燃料電池堆搭配一個 3kWh 的鋰離子電池組，帶動兩個 600W 牽引馬達。車輛的元件配置如圖 2 所示。

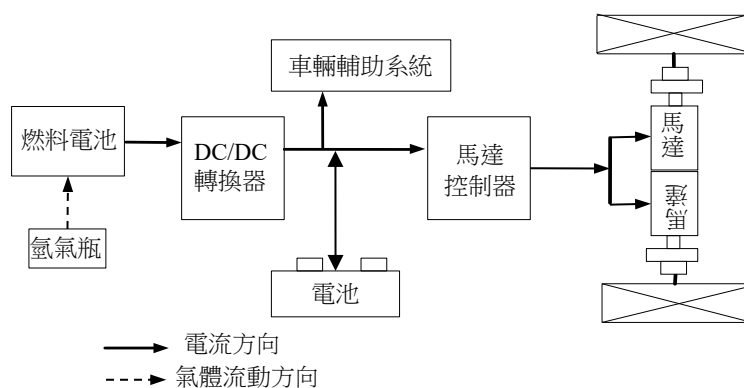


圖 2 車輛元件配置

一、控制策略

關於混合系統的控制策略有很多研究 [10–11]，本研究改變原有鋰電池電動車架構，使用功率控制策略，以維持整個系統的效率並監視電池的電量狀態 (state of charge, SOC) 來決定能量流。考量燃料電池系統的特性，在低功率或高功率輸出區域運行時效率非常低 [12]。當燃料電池或電池做為主要動力來源，必須使用不同的控制策略，控制器必須讓燃料電池以其最高效率運行。以下探討以燃料電池為主要動力時，混合動力系統的工作原理描述如下：

(一) 正常功率需求模式

在此期間，功率需求在燃料電池的工作範圍內，並且電池 SOC 仍然很高，燃料電池為馬達提供全部功率需求，如圖 3。

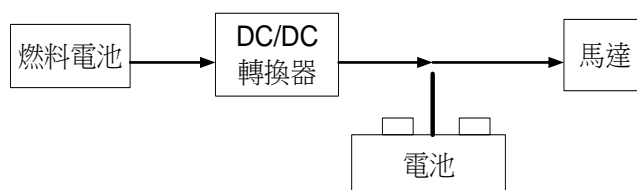


圖 3 正常功率需求模式下的能量流

(二) 低功耗需求模式

此一模式下，系統總功率需求較低或為零（無負載），燃料電池將被視為主要電源。如果電池的 SOC 在低設定點以下，則控制器將決定為電池充電。因此，燃料電池的部分電力將被引導為電池充電，如圖 4，這是使用混合系統的好處之一。

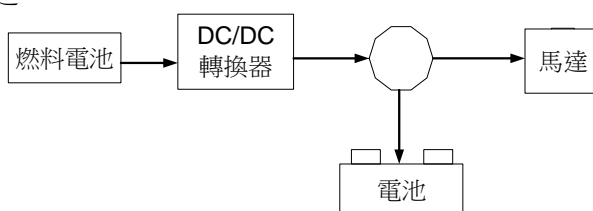


圖 4 低功耗需求模式下的能量流

(三) 高功率需求模式

控制燃料電池以在有效範圍內運行。如圖 5，在高功率需求期間，一旦所需功率超過燃料電池最大輸出功率，電池便開始向馬達提供能量並支援燃料電池。通過電壓和電流傳感器，控制器將按照規劃時機切換不同的模式。

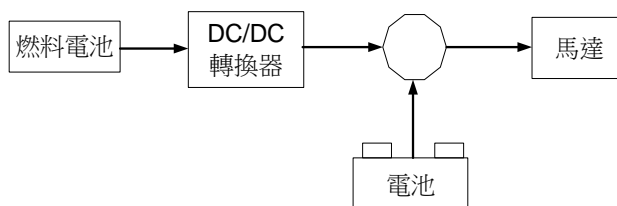


圖 5 高功率需求模式下的能量流

(四) 充電模式

當車輛停止時，馬達不需要電力，此時如果電池 SOC 低，則燃料電池將為電池充電，如圖 6。

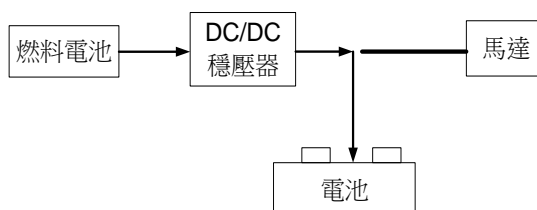


圖 6 充電模式下的能量流

二、燃料電池混合動力汽車的模擬

(一) 整體模擬說明

使用由美國國家再生能源實驗室（NERL）開發的免費軟體 ADVISOR 進行模擬工作，在 2003 年前免費提供全世界的研究人員下載使用，至今在車輛動態研發上仍很受歡迎 [13-14]。ADVISOR 使用 MatLab/Simulink 環境，並使用向後模擬方法 [15]，該方法的計算並非從駕駛員的需求開始，而是從可編寫的行駛週期其預定義的車輛行為開始。

圖 7 顯示 Simulink 模擬車輛的模型構造。車輛模型、燃料電池的燃料轉換模型、電池模型、車輪模型、附件模型、馬達控制器模型和動力傳動系統控制模型都各別建檔輸入。

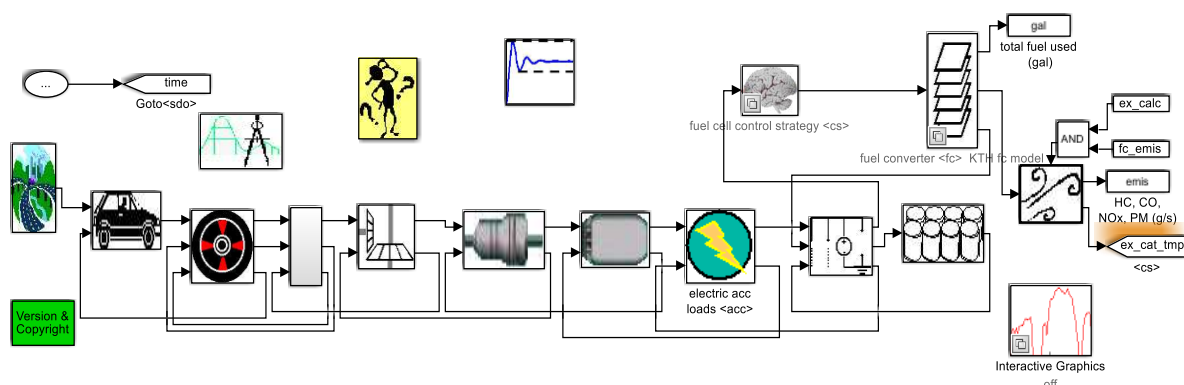


圖 7 燃料電池/電池混合動力車模型

圖 8 顯示 ADVISOR 的車輛數據設置輸入頁面，可選定傳動類型（串聯、並聯、燃料電池等）以及其他組件，各組件皆已事先完成設定並保存為個別檔案後，於 Advisor 開啟時讀入應用程式。

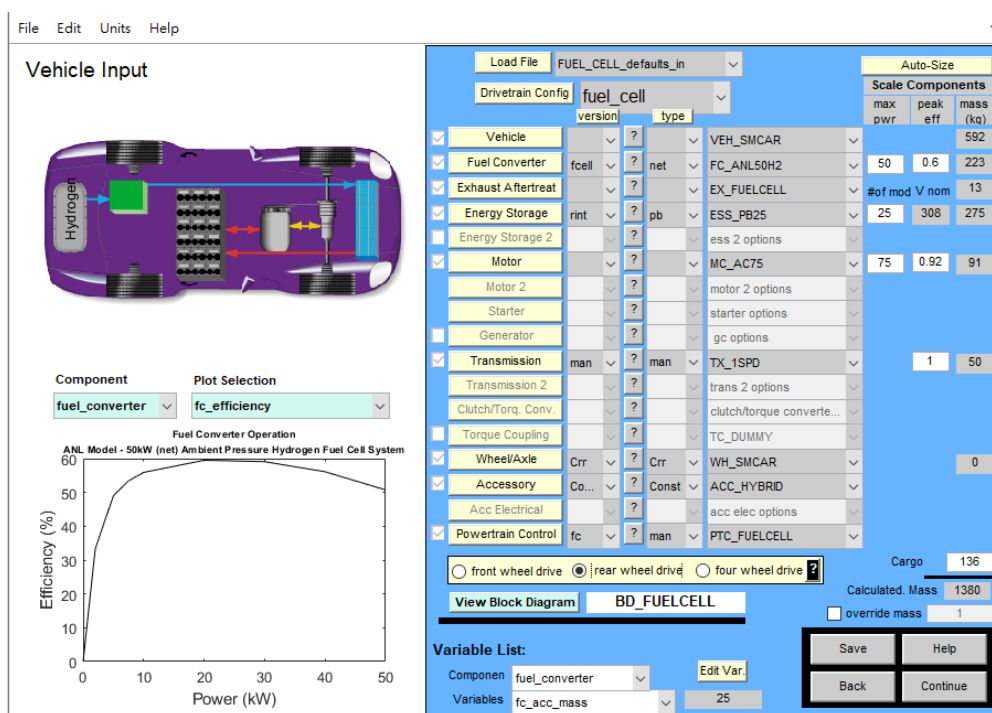


圖 8 Advisor 燃料電池車資料輸入介面

(二) 車輛模型

車輛數據如表 1。與車輛有關的作用力包括空氣阻力、加速力、爬升力和滾動阻力，克服這些力量，車輛行駛時所需的功率 P 由公式 1 表示：

$$P = \left(\frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2 + ma + mg \sin \theta + C_{rr} mg \cos \theta \right) v \quad (1)$$

其中 ρ 是空氣密度， C_d 是風阻係數， A_f 是車輛的正投影面積， v 是速度， m 是車輛的總質量， a 是車輛的加速度， g 是重力加速度， θ 是道路坡度角， C_{rr} 是滾動阻力係數。

表 1 車輛參數

車身重量 (kg)	承載重量 (kg)	軸距 (m)	正投影面積 (m ²)	風阻係數
98	100	1.5	0.86	0.2

(三) 燃料電池的燃料轉換模型

本研究使用的 1.2kW 燃料電池堆是由 Ballard 公司生產，經過實驗測試獲得其性能曲線。功率上升時，受極化特性影響，電壓範圍從系統空載時的 43 V 下降到滿載時的 26 V。淨輸出功率範圍從系統空載時的零到額定功率的 1200 W。在整個發電的工作範圍內，淨輸出電流則從零到 46 A。燃料電池系統的 V-I 曲線如下圖 9 所示。該電壓、電流特性的實驗測試結果，其氫氣供應壓力約為 1.4 bar。圖 10 顯示該燃料電池系統功率和燃料消耗具有相同趨勢。在 1.2 kW 時，油耗約為每分鐘 13 升。這些參數稍後將在燃料電池模型中使用。燃料轉換器模型的參數如表 2 所示。

表 2 燃料轉換器模型的參數

低熱值 (kJ/g)	能量密度 (g/l)	系統重量 (kg)	最大功率 (kW)	峰值效率 (%)
120	18	20	1.2	53

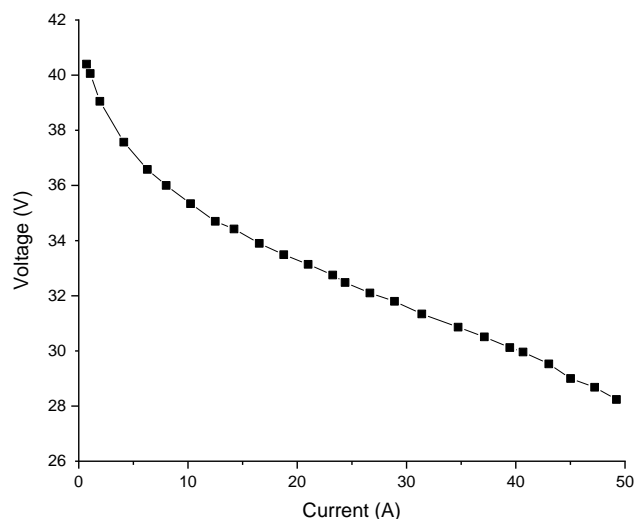


圖 9 1.2 kW Ballard 電堆性能曲線

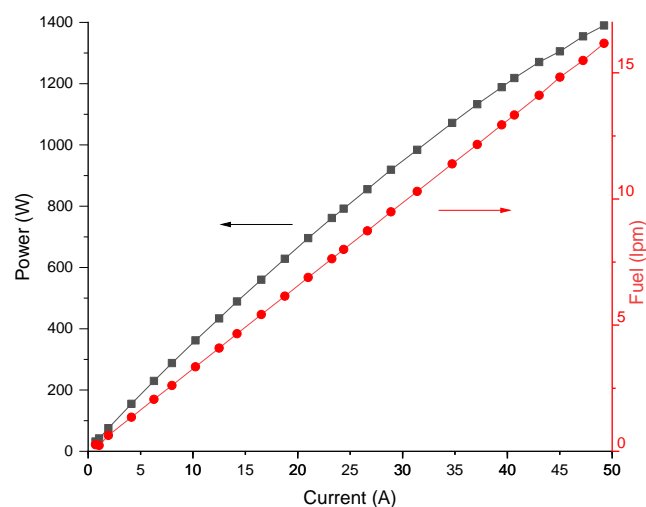


圖 10 1.2 kW Ballard 電堆輸出功率與燃料消耗關係

在額定功率 1200 W 時，系統效率約為 39%。在部分負載（約 400 W）時，系統最大效率約為 53%。當部分負載低於 300 W 時，系統效率會迅速下降，因為輔助負載開始主導氫氣消耗的需求。在高負載 400 W 下，效率隨著燃料電池電流的增加而降低。

(四) 電池模型

電池在燃料電池/電池混合動力車輛中的作用，可以是車輛電氣設備的電源或是煞車回充系統儲存能量的設備。純電池或燃料電池/電池混合動力汽車的最重要特徵，是能夠回收大量的制動能量。在汽車應用中，典型都會地區的制動能量可以達到總消耗能量的 25%，在大城市中可能高達 70% [16]。有效的煞車回充設計，可以顯著提高燃油經濟性 [17]。

電池可以在低系統負載的條件下，儲存從燃料電池產生的電能；也可以在高系統負載的條件下，輔助燃料電池。ADVISOR 中有四種不同的電池模型：電阻容量模型、內部電阻模型、基本鉛酸電池模型和神經網絡電阻模型。本研究使用 3 kWh、116 Ah 鋰離子電池組，藉由界定開路電壓（OCV）和在不同溫度和充電狀態（SOC）下的內阻建立電池模型。數據取自現有的 7 Ah SAFT 鋰離子電池數據，並通過表 3 所提供的一些參數放大至 113 Ah。

表 3 鋰離子電池的參數

模組平均電壓 (V)	模組容量 (Ah)	組件質量 (kg)	並聯電池數	串聯電池數
25.9	116	30	50	7

(五) 動力總成控制模型

動力總成控制模型定義了混合動力控制策略，依照燃料電池的工作範圍及功率輸出變化訂出兩種不同的控制機制。

1. 第一種燃料電池/電池混合動力控制策略車輛 (HV1)

本策略假設燃料電池的初始狀態為關閉。在峰值功率的 10-20% 的狀態下使用燃料電池堆是最有效的。然而，即使效率低，有必要以高電流密度和高功率操作燃料電池以驅動車輛。燃料電池功率的最大增加率被設定為 600 W/s，燃料電池功率的最大減少率被設定為 -900 W/s。燃料電池保持關閉的最短時間設置為 20 秒。

當所需的車輛功率低於燃料電池最大功率的 20% 時，電池將為車輛提供所有所需的功率，且燃料電池保持關閉。當所需功率大於燃料電池的最大功率時，電池將提供電量以達到平衡。燃料電池在最大功率的 15%-80% 範圍內運行。電池 SOC 的最高期望值設定為 80%，最低期望值設定為 40%。

2. 第二種燃料電池/電池混合動力控制策略車輛 (HV2)

燃料電池的工作範圍設置在最大功率的 20%-60% 範圍內，以便從鋰離子電池中提取更多功率並保持燃料電池在其高效率範圍內運行。將燃料電池的功率最大增加速率設置為 360 W/s，最大減小速率設置為 -480 W/s。當電池 SOC 達到其下限時，燃料電池開啟。其他條件與上述第一輛混合動力汽車的控制策略相同。

(六) 行駛週期 (Driving cycle)

本研究使用之車輛因是改裝自日本休閒用電動車，速度限制低於 25 km/h，然而現有車輛測試的標準行駛週期其速度均遠高於此，因此參考都會區動力計行駛時程 (UDDS) 的標準，再乘上一比例因子 0.25 以降低所有速度要求，如此可在進行車輛行駛的模擬測試時，達到行駛週期中最大速度要求。如圖 11 所示，此行駛標準 (R-UDDS) 的最高速度為 22.8 km/h。平均速度為 7.87 km/h，總運行時間約 1400 秒，行駛距離為 3 公里。車輛將以此一行駛週期之速度變化進行動態模擬，以便觀察在不同控制策略下，燃料電池及鋰電池之間的能量改變。

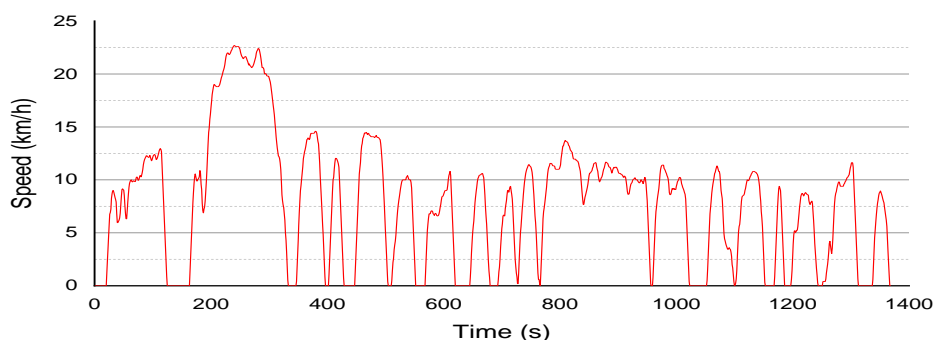


圖 11 速度縮減的 r-UDDS 行駛週期

參、模擬結果與討論

HV1 的模擬結果如圖 12 所示。該圖從上至下顯示在行駛周期的速度規範下，電池 SOC 的歷程記錄、馬達輸入功率和燃料電池的功率輸出。電池的初始 SOC 設置為 0.61，當車輛需要加速時，電池協助燃料電池為驅動馬達供電。在行駛過程中，燃料電池的輸出功率為 180 W 至 960 W。當車輛減速時，電池由燃料電池充電並儲存煞車回充的能量。根據模擬結果，計算出的 HV1 能耗相當於每 100 公里 0.86 升汽油當量。要行駛 100 公里，車輛在 200bar 壓力下需要 12.9 升氫氣，在 1 bar 壓力下需要 2380 升或 231.94 g 氫氣。

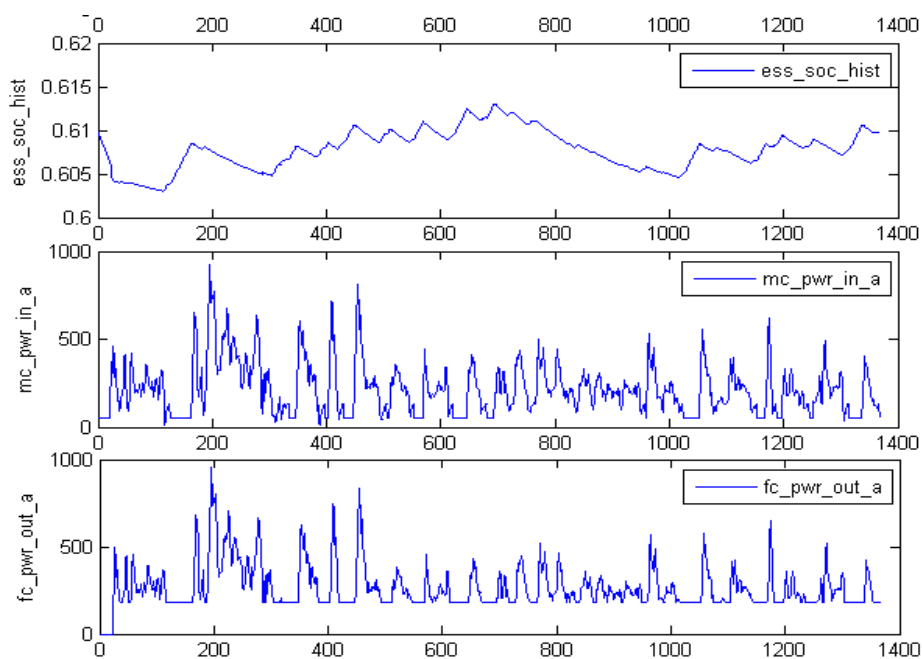


圖 12 HV1 模擬行駛結果

圖 13 顯示了 HV2 的測試結果。該圖從上至下顯示在行駛周期的速度規範下，電池 SOC 歷程記錄、馬達功率輸入和燃料電池功率輸出。初始電池 SOC 設置為 0.6。車輛首先依靠電池行駛，直到電池 SOC 達到下限 0.4 為止。接著燃料電池開始驅動馬達。在剩下的循環中，電池由燃料電池充電，還儲存一些煞車回充的能量。根據模擬結果，計算出的能量相當於每 100 公里 0.83 升汽油當量。要行駛 100 公里，HV2 需要 200 bar 的氫氣 12.2 升，若為 1 bar 則需 2440 升或 219.356 g。

模擬結果顯示，從 0 km/h 加速到 25 km/h，使用 HV1 策略需要 12.2 秒，最大加速度為 0.7 m/s^2 。使用 HV2 控制策略，則僅需要 11.5 秒的時間，最大加速度為 0.8 m/s^2 。HV2 的速度比 HV1 快，因為它使用較多來自鋰離子電池的電力，而鋰離子電池的響應速度比燃料電池快。

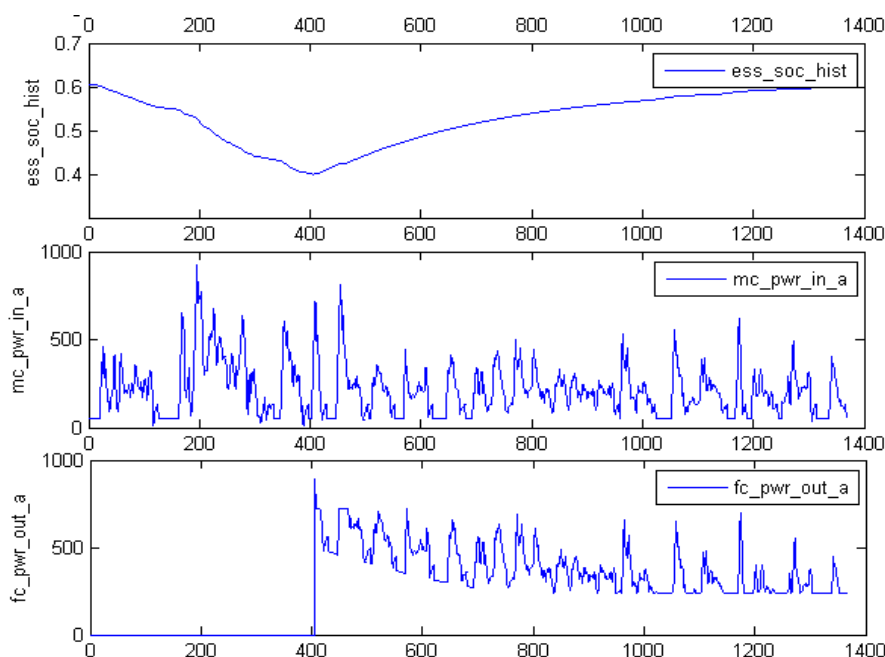


圖 13 HV2 模擬行駛結果

HV2 的油耗低於 HV1。如圖 14 所示，HV2 中的燃料電池系統比 HV1 在較高的效率範圍運行，HV1 和 HV2 的燃料電池系統效率分別為 44.79% 和 48.2%。

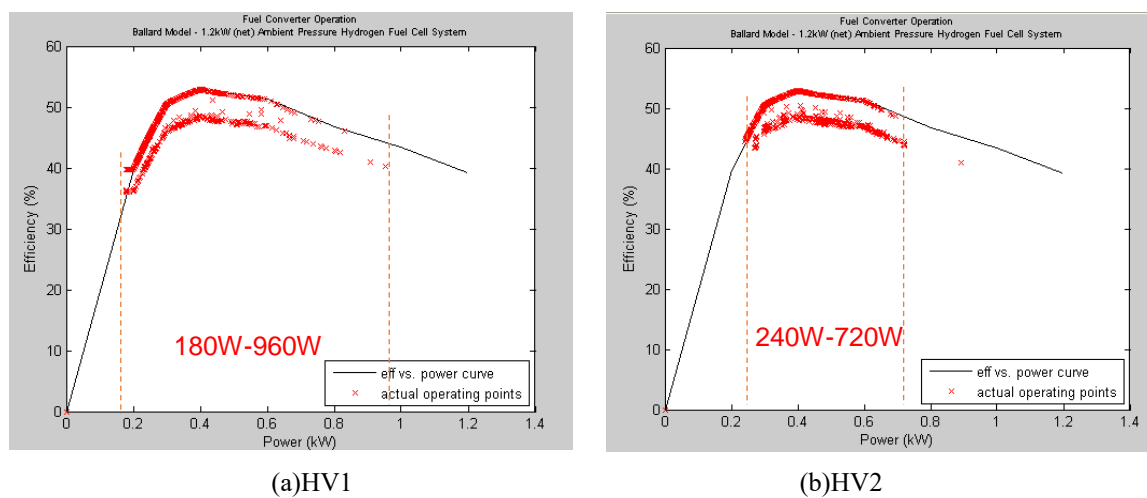


圖 14 燃料電池操作效率

與 HV1 相比，HV2 的燃料消耗更低，效率更高，因為燃料電池的輸出功率較低。如先前對燃料電池系統特性之描述，當燃料電池以 700 W 以上的功率運行時，燃料電池系統的效率會隨著功率輸出的增加而迅速下降，這是因為當功率輸出增加時，輔助負載也會增加，因為空氣泵浦和冷卻風扇的負荷升高。如表 4 所示，當燃料電池系統空轉時，輔助功率約為 35 W。當燃料電池系統輸出 700 W 功率時，輔助功率約為 160 W。一旦燃料電池系統產生 1000 W 的功率，所需的輔助功率將為 190 W。氫消耗與淨輸出電流成正比。燃料電池系統主要受操作模式和行駛週期的影響。本模擬之方法，藉由改變控制策略之實車測試，亦已經被驗證且結果相近，表 5 [18] 為兩種策略下車輛在校園行駛時的結果比較，HV2 表現出更好的燃料電池系統效率，行駛速度比 HV1 高而氫氣消耗反而降低。

表 4 燃料電池功率 vs. 輔助系統功率

燃料電池輸出功率(W)	待機	700 W	1000 W
輔助系統功率 (W)	35 W	160 W	190 W

表 5 HV1 與 HV2 應用在一般道路測試之結果比較

策略	平均測試速度 (km/h)	1 bar 壓力下氫氣 每公里消耗量(litre)	DC/DC 效率 (%)	燃料電池系統效率 (%)
HV1	13.85	32.98	95%	47.6
HV2	15.6	29.6	91%	47.9

肆、結論

這項研究成功建立燃料電池/電池混合動力汽車的兩種不同控制策略模型，此混合動力汽車使用 1.2 kW 質子交換膜燃料電池堆和 3 kWh 鋰離子電池為兩個 600 W 馬達供電。在按比例縮小的 r-UDDS 行駛週期中模擬該車輛行駛狀態，平均速度為 8.78 km/h。模擬結果顯示，車輛可以在行駛週期內達到規定的速度，並在週期結束時和啟動時一樣使電池充滿電。HV1 和 HV2 控制策略的燃料電池系統效率分別為 44.79% 和 48.2%。HV1 的氫氣消耗量為 2.32 g/km，HV2 的氫氣消耗量則為 2.19 g/km。後者可以較高的速度運行，但卻俱有較低的氫消耗量和較高的燃料電池系統效率。實車測試已經完成，結果與模擬預測接近，顯示模型建置成功。日後不同能量分配之控制策略，皆可依此方式先行檢視，避免過多實際測試浪費經費。

針對燃料電池搭配電池之混合動力車，藉由使用車上儲存的氫氣，可以克服電池容量導致行程範圍較短之限制。從模擬結果來看，此燃料電池/電池混合動力汽車中，燃料電池的最佳工作範圍是其最大功率的 20% 至 60%。

參考文獻

- [1] K. S. Jeong, B. S. Oh. (2002). Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle. *J. Power Source*, 105, 58–65.
- [2] Y. Gao, M. Ehsani, (2002). An investigation of battery technologies for the Army's hybrid vehicle application. *IEEE 56th Vehicular Technology Conference*. Vancouver, BC, Canada.
- [3] D. Doerffel. (2007). *Testing and characterisation of large high-energy lithium-ion batteries for electric and hybrid electric vehicles*. (Doctoral Dissertation). University of Southampton, UK. Retrieved from: <https://eprints.soton.ac.uk/47951/>
- [4] C. N. Maxoulis, D. N. Tsinoglou, G. C. Koltsakis. (2004). Modelling of automotive fuel cell operation in driving cycles. *Energy Convers. Manag.*, 45(4), 559–573.
- [5] P. Corbo, F.E. Corcione, F. Migliadidi, O. Veneri. (2005). Experiment study of a fuel cell power train for road transport application. *J. Power Sources*, 145(2), 610–619.
- [6] M. Ouyang, L. Xu, J. Li, L. Lu, D. Gao, Q. Xie. (2006). Performance comparison of two fuel cell hybrid buses with different powertrain and energy management strategies. *J. Power Sources*, 163(1), 467–479.
- [7] J. C. Martin, P. Millington, B. Campbell, L. Barron, and S. Fisher. (2019). On-board generation of hydrogen to improve in-cylinder combustion and after-treatment efficiency and emissions performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine. *Int. J. Hydrog. Energy*, 44(25), 12880–12889.

- [8] A. Stienecker. (2005). *An ultracapacitor-battery storage system for hybrid electric vehicles*. (Doctoral dissertation). The University of Toledo, OH, USA. Retrieved from: http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=toledo1121976890
- [9] S. Dearborn. (2004). Power management in portable applications: Charging Lithium-ion/Lithium-polymer batteries. *Application Note 947*. Retrieved from: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/00947a.pdf>
- [10] Z. Jiang, L. Gao, R. A. Dougal, M. J. Blackwelder. (2004). Design and experimental tests of control strategies for active hybrid fuel cell/battery power sources. *J. Power Sources*, 130, 163–171.
- [11] H. S. Lee, K. S. Jeong, and B. S. Oh. (2003). An experimental study of controlling strategies and drive forces for hydrogen fuel cell hybrid vehicles. *Int. J. Hydrog. Energy*, 28, 215–222.
- [12] H. Y. Cho, W. Gao, and H. L. Ginn. (2004). A new power control strategy for hybrid fuel cell vehicles. In *Power Electronics in Transportation* (pp.159–166). Novi, MI, USA
- [13] J. X. Teoh, M. Stella and K. W. Chew. (2019). Performance analysis of electric vehicle in worldwide harmonized light vehicles test procedure via vehicle simulation models in ADVISOR. In *2019 IEEE 9th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)* (pp. 215–220). Shah Alam, Malaysia.
- [14] W. Yaïci, L. Kouchachvili, E. Entchev and M. Longo. (2019). Dynamic simulation of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for the electric vehicles). In *2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)* (pp. 460–465). Brasov, Romania
- [15] T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O’Keefe...and K. Wipke. (2002). ADVISOR: A system analysis tool for advance vehicle modeling. *J. Power Sources*, 110(2), 255–266.
- [16] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, A. Emadi. (2009). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles – fundamentals, theory and design* (2nd ed.). CRC Press: Boca Raton, FL.
- [17] I. Hussein. (2010). *Electric and hybrid vehicle: Design fundamental* (2nd ed.). CRC Press: Boca Raton, FL.
- [18] M. H. Pham. (2009). *A simulation and experiment study of small fuel cell/battery hybrid vehicle* (Master thesis). Southern Taiwan University of Science and Technology, Taiwan.