

Development of the Small-scale Wind-power System for Improving Vehicular Power Stability and Energy Efficiency

Chung-Neng Huang^{1*}, Wen-Ping Cheng²

¹*Graduate Institute of Mechatronic System Engineering, National University of Tainan*

²*Department of Auto Mechanics, Municipal Kaohsiung Senior Vocational Technical High School*

Abstract— The common target for vehicular industry, as auto motor, ship, or aircraft, always focuses on minimum cost, lowest fuel consumption, and optimal function, but many contradictions exist and conflict with each other. So if can effectively retrieve the wind loss against on car body and transfer to useful power as' turn obstruction into helping hand ', then the energy efficiency of vehicle system can be promoted. In this paper, the auxiliary generation system based on wind power is proposed to improve energy efficiency and stabilize electric power supply. The effectiveness of this proposal is confirmed through the MATLAB/SIMULINK simulation studies and the comparison of logical demonstration to induce the optimal system.

Index Terms— Wind-power, Vehicle, Power stability, Energy Efficiency.

* Correspondence author : kosono@mail.nutn.edu.tw



可改善載具電力穩定度和能源效率之小型風力發電系統

黃崇能*

國立臺南大學機電系統工程研究所

鄭文平

高雄市立高雄高級職業學校 汽車科

摘要

舉凡載具如：車、船或航空器等工業所生產的產品莫不是以最小的成本、最低的油耗、最佳的功能為目標，但是這些目的函數間都有著相互抵觸的地方。因此若能有效的「化阻力為助力」回收加諸於車體迎風面之風阻損失，轉換成有效之能量，如此一來整車系統之能源效率便可獲得提升。故本論文提出以風力發電為基礎之輔助型車用發電系統，藉此提昇車輛能源使用效率及電力穩定。透過MATLAB/SIMULINK 模擬的方式，論證其正確性與可行性，並說明本研究之模擬步驟與分析，且將結果與前述之邏輯論證做比對，以歸納出最佳化之系統。

關鍵詞：風力發電、載具、電力穩定度、能源效率

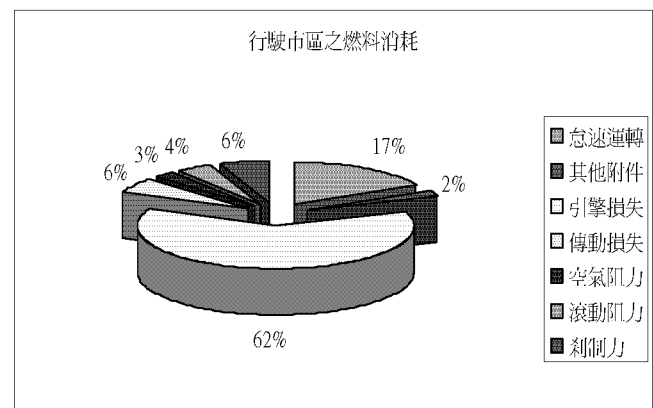
壹、前言

在世界各國追求經濟成長過程中大量採用石化原料使得全球能源日益枯竭，因此先進國家訂定嚴格之污染、耗能法規，如CO₂減量之國際協定與環保之需求，藉此來減緩環境污染與能源日愈短缺窘境。所以，對自然能源的再生和利用也成為大家所關心及探討的課題。

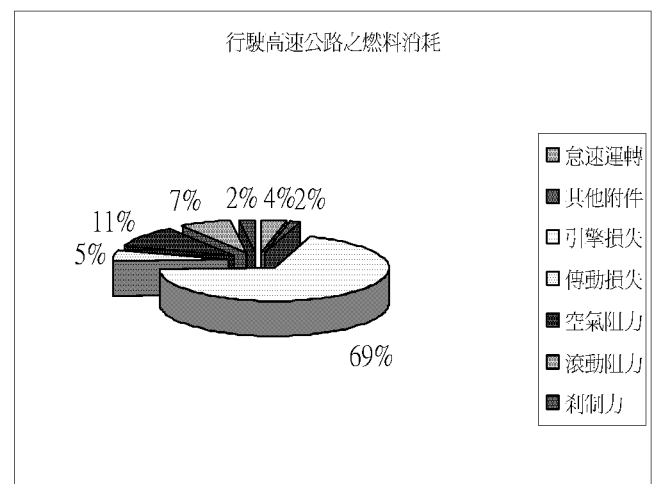
日本自動車研究所（JARI）所預測汽車工業科技發展趨勢，估計技術發展之驅動力將由HC、NOx等污染排放逐漸轉移到油耗的降低，再移轉到新能源的利用。因此，車輛本體耗能改善技術主要項目分別為：動力傳動系統效率最佳化技術、車輛行駛阻力降低與新能源運用等方面。目前車輛所需電力約為2 kW，未來將提升至3 kW~5 kW 電力，以提供如電子節氣門、電子控制懸吊系統、電動水/油泵、電動輔助方向機、電控四輪轉向、電力驅動式冷氣壓縮機、電動輔助剎車系統等用電。未來，複合式動力車輛（Hybrid Vehicular）、電動車輛（Electric Vehicular）的發展方向顯示，車輛所需電力將會再持續增加。

以中型汽車燃料消耗的比例來看，引擎損失所占的比例最高為62~69%，而行駛於市區時的空氣阻力占該車燃料消耗率約3%（圖一），行駛於高速公路占該車燃料消耗率的11% [1-2]（圖二）。現有車輛能源回收的應用上，利用車輛剎車時的動能轉換為電能而儲存於電瓶，如電子控制煞車

（Electronically Controlled Brake, ECB），其功能不僅改善行車安全又可節省燃油消耗，對於降低油耗與空氣污染有明顯的助益 [3]。



圖一 行駛市區之燃料消耗



圖二 行駛高速公路之燃料消耗

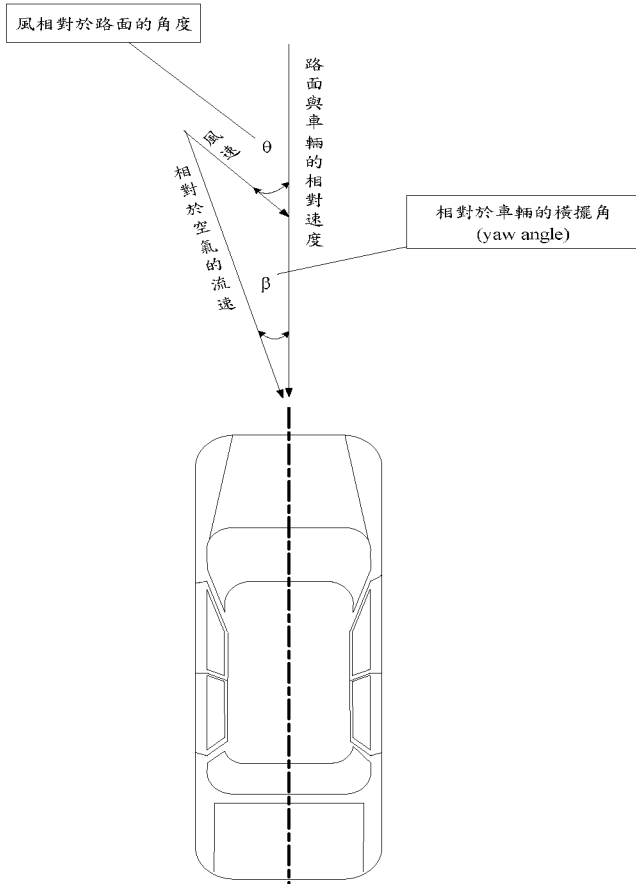
但是由於車輛重量輕量化的趨勢（單位馬力所承載的重量降低）使得車輛衝量減小，相對所產生的動量也降低，因此所回收之電力亦相對減少。另



外某些車輛前、後擋風玻璃中或車頂上嵌入太陽能集電板 (Solar Photovoltaic Panels)，經由太陽能轉換為電能並驅動車內散熱風扇以降低室內溫度。由於車身面積小 (須符合空氣動力學的要求)，又前、後玻璃與陽光照射的角度並不見得是最佳角度 (因停車位置與行駛方向而改變)，且某些地區的天氣型態如陰天的日數較多，空氣中灰塵量較大，都會使的能量轉換效率降低，因此電力的產生相對較小。

貳、化阻力為助力-風阻轉換

由於風阻和車身體積大小、外型以及車速有關，車輛正向投影面積愈小、其風阻係數也小，所以流線型汽車的風阻係數比箱型汽車小 (圖三)。但是汽車外型並非全是以流線型設計 (車室空間亦趨狹窄)，反倒是以迎合大眾審美觀點和乘坐舒適及使用功能多樣性而加以設計。因此，如何能在低風阻係數和實用性上找到平衡點，也是各車廠研發的重點。



圖三 路面與車輛的相對速度及風速所產生車輛相對空氣的速度[5]

車輛在高速行駛下最大阻力為空氣動力力量，在低速時此阻力可忽略，但在高速的行駛速度下將產生約 0.03g 的力量。而所謂風阻 (drag) 是來自於風作用的結果，且直接作用於車輛縱軸方向之移動的切線力量 (Tangential force)，此切線力量稱之風阻[4]，其定義為

$$T = \frac{\rho}{2} \cdot V_{\infty}^2 \cdot c_T \cdot A \quad (1)$$

V_{∞} ：風速， c_T ：切線力係數， ρ ：空氣密度， A ：車輛前視面積。又 c_T 為 β 的函數，因此可得

$$c_T = \frac{T(\beta)}{\frac{\rho}{2} \cdot V_{\infty}^2 \cdot A} \quad (2)$$

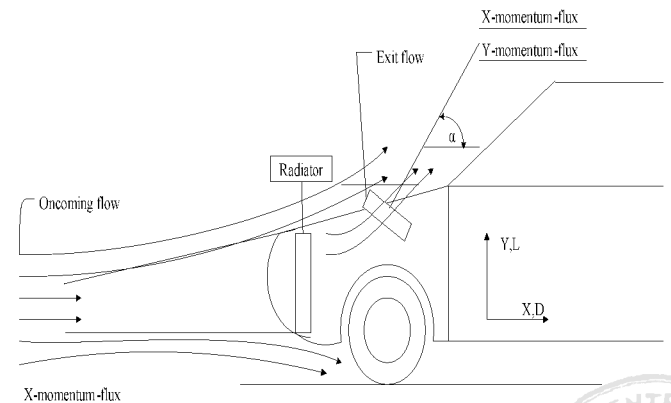
風力對車子質量中心所產生的橫擺 (yaw) 之平均有效角，若非常小即 $\beta < 8^\circ$ 則 $c_T \approx c_D$ ，空氣阻力 (Aerodynamics drag) 由空氣所產生之阻力，視動態壓力而定，與速度平方成正比。因此整理可得

$$D = \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot c_D \cdot A \quad (3)$$

D ：空氣阻力， V ：車速， c_D ：風阻係數

細分車輛之空氣阻力包含了，摩擦阻力(Friction drag)、外型阻力(Shape drag)、導引阻力(Inducted drag)，其中流經引擎室空氣力所造成的阻力占全部風阻的 13~20 % [6]。

從空間狀態來看冷卻系統的風阻，實際上全部的空氣經冷凝器和水箱流入引擎室之空氣力，可分為阻力(Drag-force)與上升力(Lift-force)，如圖四。並可表示為[7]



圖四 流入引擎室的空氣力



$$c_{DC} = \frac{D_c}{\frac{\rho}{2} \cdot V^2 A}$$

$$= 2 \left(\frac{A_R}{A} \right) \left(\frac{V_R}{V} \right) \left(1 - \frac{V_E}{V} \cos \alpha \right) - c_{pE} \left(\frac{A_E}{A} \right) \cos \alpha \quad (4)$$

阻力可由

$$D_f = \rho V_R A_R (V - V_E \cos \alpha) - (P_E - P_\infty) A_E \cos \alpha \quad (5)$$

V_R 為流經水箱的空氣速度， A_R 為水箱的面積， V 為流入的空氣速度， V_E 為流出引擎室的空氣速度， P_E 為流出引擎室的空氣壓力， P_∞ 為流入的空氣壓力， A_E 為流出面積。而上升力為

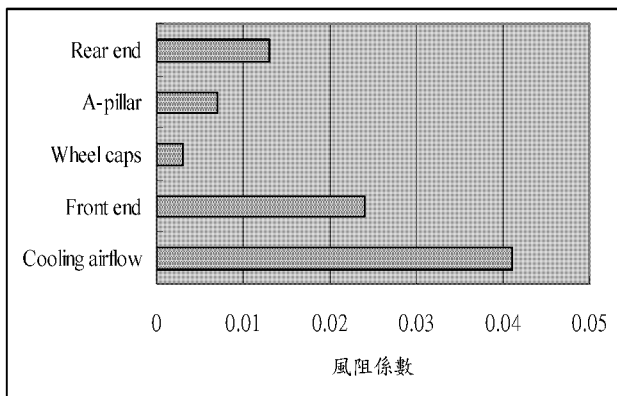
$$L_f = -\rho V_R A_R V_E \sin \alpha - (P_E - P_\infty) A_E \sin \alpha \quad (6)$$

若 $\alpha = 90^\circ$ 時則可將 (4) 式，簡化為

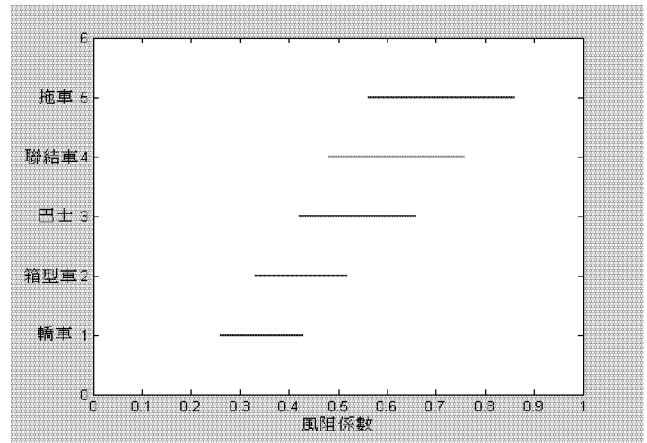
$$(c_{DC})_{\alpha=90^\circ} = 2 \frac{A_R}{A} \frac{V_R}{V} \quad (7)$$

因此由 (7) 式作為冷卻風阻的估算式，可得 c_{DC} 值約為 0.02 ~ 0.06。1980 年 Opel Rekord 車型，其空氣阻力在實車上所量測出的數值做比較可看出，在冷卻方面所占的阻力最多並與估算式相互印證。

車輛隨着速度的增快其空氣阻力也隨之增加，在各種商用車輛上因考慮承載人數、商品與重量，在外型上大不同且體積的大小也有所差異 (圖五)。在 40 噸的聯結車行駛於一般道路與高速公路上因車速的改變，其空氣阻力隨之變化所造成燃料消耗率從 2.5% 增加 35 % [8]。歸納出大客車之風阻係數約為小客車的 1.5 倍，聯結車和拖車約為小客車的 2 倍 (圖六)。



圖五 車輛各部位風阻係數之比較



圖六 各種車輛之風阻係數

近年來空氣動力學在商用車輛的研發著重於駕駛室和正面投影面積的改善已有相當大改進，但車身仍受限於承載空間考量。因此，目前仍相當多廠商開發降低風阻之附加裝置來降低油耗。又根據 E. GÖHRING and W. KRÄMER [9] 加裝駕駛室上方導流板 (air deflector)、前保險桿下襠 (front apron)、車身側的護板 (side skirts) 等可減少全部風阻係數的 27%。因此，以裝設附加裝置，若能將風阻轉化成可利用之助力進而產生能量的方法，那將是能源再生的另一種方式。

參、小型風力發電機之運用

風力發電是由空氣流動時所產生的力與速度來推動風車葉片，並藉此旋轉力矩帶動發電機而產生電力。因此，風力發電是由風能轉成機械能再轉換成電能的一種能量轉換方式。風車的選擇包含了葉片的角度、數量、安裝位置等，而不同型式的風車對於輸出功率落差很大。一般風車可區分為阻力型風車 (Drag-type windmill) 和升力型風車 (Lift-type windmill)。

升力型風車，風力作用在葉片上所產生的力，依據軸向動量原理 (Axial momentum theory) 和柏努利方程式 (Bernoulli's equation) 推導出 [10]

$$F = (p_d^+ - p_d^-) A_d = 2 \rho A_d U_\infty^2 a (1 - a) \quad (8)$$

p_d^+ ：流入風車葉片的風壓， p_d^- ：流出風車葉片的風壓， A_d ：風車面積， U_∞ ：風速， a ：流入因子 (inflow factor)

$$Power = 2 \rho A_d U_\infty^3 a (1 - a)^2 \quad (9)$$

又依據德國空氣動力學者 (Albert Betz) 所提的 Betz Limit



$$C_p = \frac{Power}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 A_d} \quad (10)$$

並將 (10) 式簡化為

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (11)$$

當 $a=1/3$ 時，可得到最大風能係數 $C_{pmax} = 0.593$ ，又可從(10)式得出推力係數 C_T (Thrust Coefficient)

$$C_T = \frac{Power}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A_d} \quad (12)$$

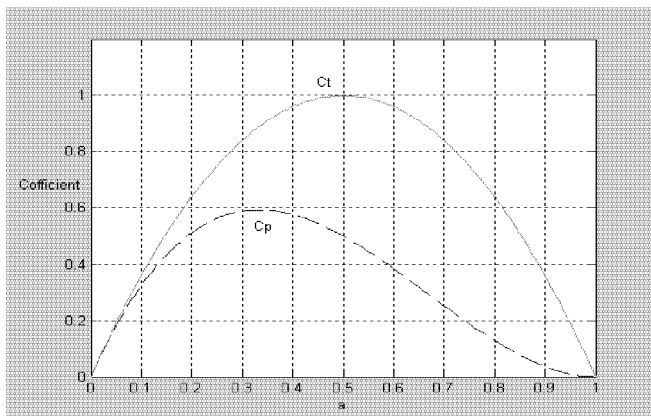
並將 (12) 式簡化為

$$C_T = 4a(1-a) \quad (13)$$

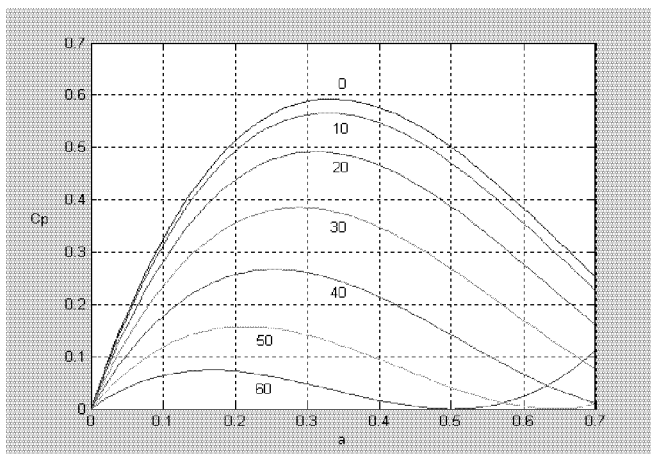
而風能係數與風向的改變亦可從 (11) 式，求得風車的橫擺角度即

$$C_p = 4a(\cos \gamma - a)^2 \quad (14)$$

圖七、八分別為流入因子 a 與 C_p ， C_T 及 C_p 之關係圖。



圖七 C_p 與 C_T 的數值



圖八 C_p 和風車的橫擺角度

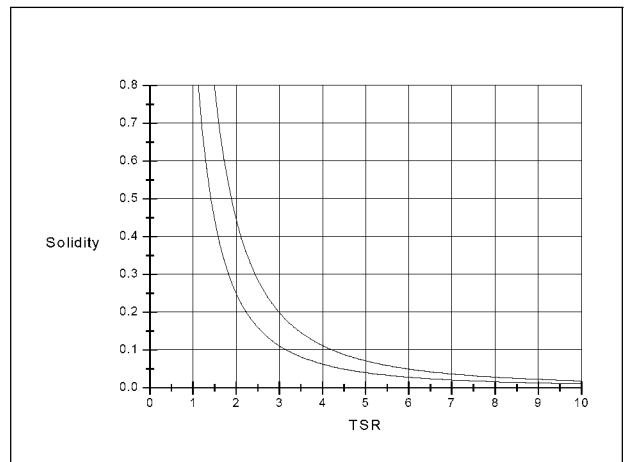
在風車的性能中，周速比(Tip-Speed Ratio, T.S.R)是一個重要的參數，而周速比是指風車葉片翼端的速度與風速之比。

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{V_w} \quad (15)$$

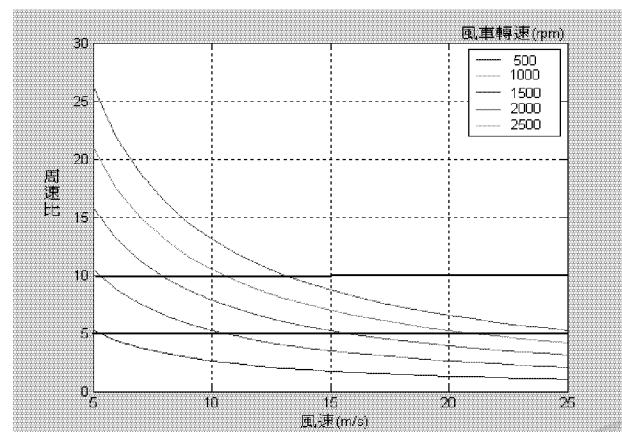
λ ：周速比， R ：風車半徑， ω ：風車轉速， V_w ：風速。

風車的旋轉面積與全翼面積之比或風車葉片面積與受風面積之比，稱之 Solidity。空氣的動態壓力是依據風速的變化，當風速增大時，揚力增加。風車葉片升力取決於升力係數(C_L)、風速、葉片面積，因此推算出周速比與 Solidity 的關係式[11]，如圖九所示可得知，風扇葉片面積愈大，則周數比愈小，亦即相對轉速愈慢，而圖十則為周速比與風速關係，且由上圖得知，若要將周數比維持在設定之 5~10 的範圍內時，其風車轉速需維持在 1000rpm 以上。

$$S \propto \frac{1.78}{C_L} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^2 \quad (16)$$



圖九 Solidity 與周速比的關係



圖十 周速比與風速關係



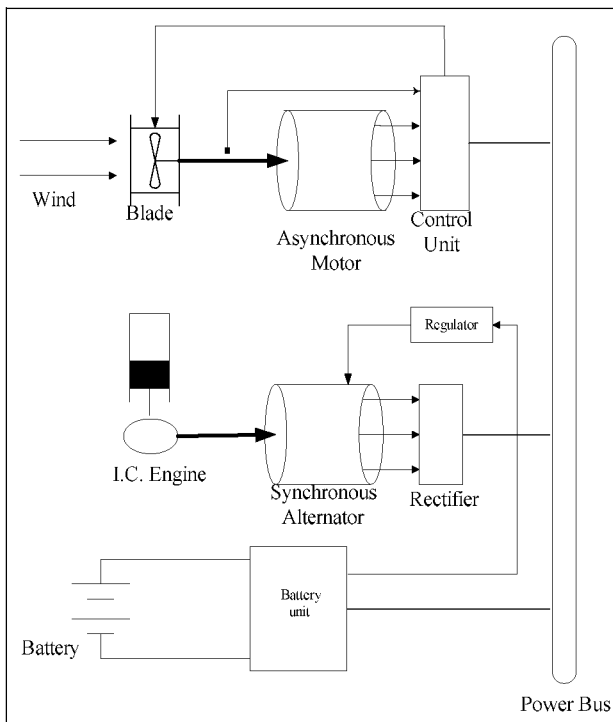
肆、風力發電系統之設計與驗證

一、系統概要

在不改變車輛原有之電力系統的原則下，上裝置一風力發電系統，藉由車輛行駛時的風阻力來驅動一非同步發電機，以提供車上負載及電瓶充電使用，以分擔車輛主發電機之負載，並減少引擎功率損失，達到節省能源之功效。風力發電機將採用小功率輸出，其原因為：

1. 不改變車輛外觀為前提。
2. 不增加車輛行駛時的阻力與油耗。
3. 車輛以搭載汽油引擎，運轉時所需之連續負載電力為需求。

本系統採用感應發電機，此型式發電機不需要特殊操作技巧與調整的特性。雖然，輸出電力的功率因數無額外的激磁裝置而無法調整，但可以由電容器提供補償。對於輔助電力設備而言是一種良好的選擇。本系統之設計如圖十一所示，利用風力發電機之輸出電壓與其驅動轉速成正比之特性，控制單元在偵測出發電電壓超出（低於）設定電壓值時，透過一簡單之回授控制，調整風車扇葉角度，使得驅動轉速維持一定值，以穩定輸出電壓。其輸出電力在輕載時可做電池回充，在重載時即可分擔主發電機之負載，以提升車輛電力系統系統效能並穩定電源。



圖十一 車用風力輔助發電系統概要

二、系統模擬與驗證

為驗證本文所設計之系統的有效性，在本節透過 MATLAB/SIMULINK 模擬的方式來進行驗證。首先，因為風車的輸出功率為

$$P_w = \frac{C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \rho A}{2} \quad (17)$$

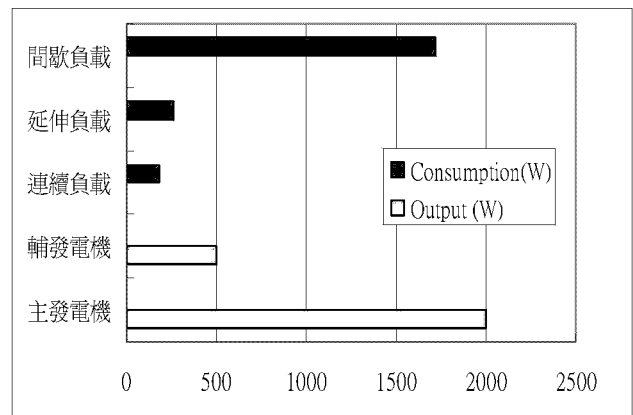
V_w ：風速， ρ ：空氣密度， A ：風車旋轉面積， C_p ：風能係數。由於，風能係數為周速比與風扇角的函數。

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(\beta)\lambda^2 + c_2(\beta)\lambda^3 + c_3(\beta)\lambda^4 \quad (18)$$

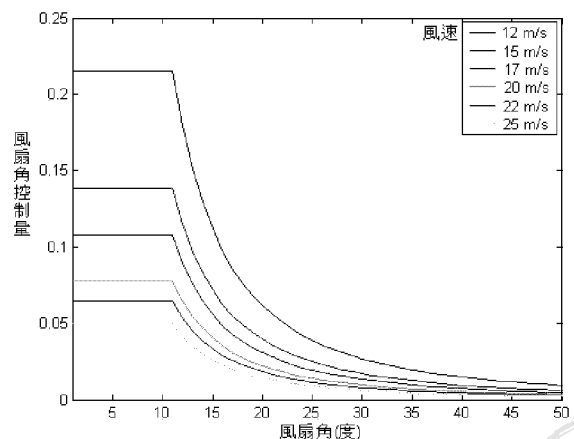
$$\begin{aligned} c_1(\beta) &= c_{10} + c_{11}\beta + c_{12}\beta^2 + c_{13}\beta^3 + c_{14}\beta^4 \\ c_2(\beta) &= c_{20} + c_{21}\beta + c_{22}\beta^2 + c_{23}\beta^3 + c_{24}\beta^4 \\ c_3(\beta) &= c_{30} + c_{31}\beta + c_{32}\beta^2 + c_{33}\beta^3 + c_{34}\beta^4 \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $c_{10} \sim c_{34}$ 為常數

將風速設定為 Randon 的函數，找出其平均風速值，並將表一所設定之相關風車參數代入（17）式求得發電機輸出功率、風車扭矩、扇葉角控制量。



圖十二 主、副發電機與負載



圖十三 扇葉角與控制扇葉變化量之曲線

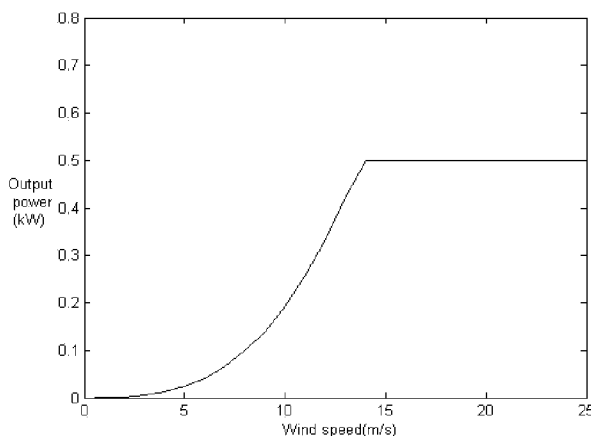


表一：風車特性參數

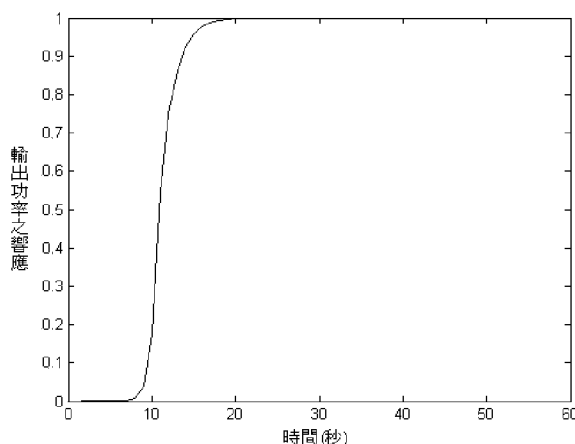
名稱(符號)	數值	單位
風速 (V_w)	15	m/s
風能係數 (C_p)	0.4	無
空氣密度 (ρ)	1.225	kg/m ³
風車半徑 (R)	0.5	m
發電機容量 (P_g)	500	W

其中圖十二所示為一般車輛電力負載之分佈情形，而本節亦以其為模擬計算之初期設定，其中圖一3為設定之扇葉角與控制扇葉變化量之曲線。本系統採用PD控制策略，以提昇響應速度和改善穩定度，期望達到電力穩定之功效，經由視覺化模擬環境 (Simulink) 的圖控程式將上述控制之區塊圖作規劃。

透過上述之控制流程，其結果如圖一4，15所示。由圖得知，透過此一控制，在風速愈大時，發電機之輸出呈穩定的增加，並不會因風速之變化而造成輸出電力之不穩定。



圖十四 風速與發電機輸出功率之曲線



圖十五 功率輸出之響應曲線

伍、結論

本文所論述之載具用風力發電系統，是依現行的車輛為例，以其外觀和其裝置並以能源回收的角度，希望的從中「化阻力為助力」再產生電力而加以應用。因車輛各部份都採集中化設計，可用空間不大、故採用500W小功率發電機。又當主發電機發生故障時，而輔助發電機之發電量足以供應引擎運轉所需電力，讓車輛能繼續行駛為其特點，也因此該系統亦可扮演著備用系統的角色。在回收效能方面經估算在高速行駛時，風阻損失(10.73%~9.32%)當中，回收(3.22%~2.69%)之所占的燃料損耗。

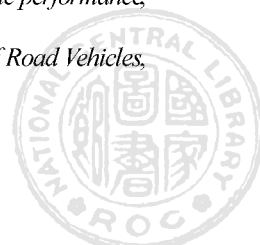
在本文中風車的風扇葉直徑為1m，與現有的散熱風扇葉片直徑450mm有着相大的差異。因此，須將扇葉縮小以符合現有車輛的寬度及其裝置，又風扇葉直徑變小後，為避免輸出扭矩過小，在狹小空間中需設計減速機構。散熱風扇的風扇角度和風車之風扇角度的變換幅度約為60度，風扇葉角度的控制等，都是亟待解決的問題。

目前，車輛多電源系統，可提供交、直流電壓選擇，並整合為電力網系統，讓車輛電力具多樣性與可用性。而本系統未將主、輔發電機之發電量，輔助發電機的電壓轉換，電瓶充放電狀態、車輛電力動態負載之變化，作明確的電力整合、調配，主、輔發電機之降載運轉，動態卸載等相關電力問題作進一步的探討。

本世紀是各型載具工業的重大轉型，尤其在動力方面的改變，從內燃機的往復式活塞引擎，到沒有燃燒和排氣污染的電動馬達為主。在能源使用方面，從石油所煉製的碳氫化合物燃料，到開發電力源、電能儲存技術、回收及使用自然的能量為重點，這將是兼具環保、安全、快速與便利的車輛新世代。

陸、參考文獻

- [1] Anon.(1994, July), *PNGV Program Plan*, U.S. Dept of Commerce, Washington DC, and USCAR, Dearborn, MI.
- [2] Charles A. Amann. (1997), *The Stretch for Better Passenger-Car Fuel Economy*, SAE Paper, 972658, pp. 87-91.
- [3] Masayuki Soga, Michihito Shimada, Jyun-Ichi Sakamoto and Akihiro Otomo, (2002, October), *Development of vehicle dynamics management system for hybrid vehicles: ECB system for improved environmental and vehicle dynamic performance*, 23 (4), *JSAE Paper*, 20024667.
- [4] Wolf-Heinrich Hucho (1998), *Aerodynamics of Road Vehicles*, USA: Society of Automotive Engineers.



- [5] R.H. Barnard (1996), *Road vehicle Aerodynamic Design*, England: Addison Wesley Longman.
- [6] Giancarlo Genta (1997), *Motor Vehicle Dynamics Modeling and Simulation*, Singapore: World Scientific Publishing.
- [7] SOJA, H., WIEDEMANN, J. (1987, September), *The Interference Between Exterior and Interior Flow on Road Vehicles*, Ing'nieurs d' Automobile, pp101-105.
- [8] Hoerner S. F. (1965), *Fluid Dynamic Drag*, Hoerner Fluid Dynamics, PO Box 342, Brick Town N.J. 08723.
- [9] GÖHRING, E., KRÄMER, W. (1987), *Seitliche Fahrgestellverkleidungen für Nutzfahrzeuge*, "ATZ", 89, pp. 481- 488.
- [10] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi (2001), *Wind Energy Handbook*, England: John Wiley & Sons, pp 42-207.
- [11] 牛山泉, 三野正洋 (1980), *小型風車ハンドブック*, パワー社。

BIOGRAPHIES



Chung-Neng Huang (IEEE M'04) received the B.S.E.E. from National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan, in 1992, and the M.S.E.E. and PH.D. degrees from Tohoku University, Sendai, Japan, in 1997 and 2000, respectively. From Feb. 2001 to Jul. 2006, he was an assistant professor, and was promoted to be an associate professor at the Vehicle Engineering

Department, National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan. In Aug. 2006, he transferred to the Graduate Institute of Mechatronics & System Engineering, National University of Tainan, Tainan City, Taiwan, as an associate professor and was promoted to be as a professor from Aug. 2010 to present. He received the Golden Medal for the excellent paper in the 98th National Convention of the Institute of Electrical Engineers of Japan in the 100th anniversary of the foundation, the Excellent Achievements for the New Researchers in 2003 from the National Science Council, Taiwan, and the Outstanding Teacher Award in 2008 from the National University of Tainan.

His research and teaching interests are system optimal design, manufacturing/control parameter optimization, hybrid/intelligent controls and green power applications etc..



Wen-Ping Cheng received the B.S.M.E. and M.S. M.E. from the Department of Vehicle Engineering, National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan, in 2002 and 2005, respectively. Now, he is a teacher at the Department of Auto Mechanics, Municipal Kaohsiung Senior Vocational Industrial High School. He owns several technical qualifications on the Automobile repair and maintenance, such as the

A-grade, B-grade Master cards, and skill competition referee certificates etc., from the Bureau of Employment and Vocational Training, CLA, Taiwan.

His research and teaching interests are the all in the fields and applications of automobile-related.

