

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

電動機車煞車回充控制之方法分析及效率研究 A Study of the Brake Regeneration Controller for Electric Motorcycles

計畫編號：NSC89-2212-E009-061

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：金甘平 交通大學機械工程系

一、中文摘要

本文主要是探討電動機車煞車回充控制，其目的係藉由煞車回充能源的產生以提升電動機車之續航力。回充電流之產生係使用時間比控制方式，計劃中利用霍爾感測器與光學編碼器之位置與速度回饋提出兩種控制策略，其控制結果均能得到穩定之回充電流。由程式模擬結果與實際實驗測試資料比對誤差及驗證，此模型架構確實重現電動機車煞車之物理特性，並可得到車輛行駛特性。因此，由電腦模擬結果可提供電動機車電控系統設計發展之 Rapid Prototyping，並能加速研發時間與節省研究經費。

關鍵詞：電動機車、再生煞車、煞車回充控制器

一、 Abstract

This project discusses the regenerative braking control of electric motorcycles. The purpose of this project is to extend the driving distance of electric motorcycles by optimizing the brake regeneration energy. Based on the Time Ratio Control (TRC) method, two methods, one uses the Hall sensor, and the other uses the optical encoder for feedback purpose, are proposed to achieve regenerative braking control. Simulation and experimental results show that both methods are effective in tracking the regenerative current command. By

evaluating the simulation results, a simulator could provide valuable data to design and analyze prototypes of electrical vehicle. Therefore, rapid prototyping can be achieved to speed up the development of new vehicle.

Keywords: electric motorcycles, regenerative brake, regenerative braking controller

二、緣由與目的

任何複雜或較大系統裝置的設計，應事先作好規劃與估算出誤差極小的預測性能。因此，電動機車在設計階段可使用各種電腦模擬程式作為計算以預測性能，其模擬結果可作為提升性能的參考指標 [1][2][3][4]。我們可將電動機車個別子系統獨立分析設計，完成後再加以整合，便能建構出電動機車系統的整車模型。由模擬可得到行駛動態特性，利用此結果可預測所研發之電動機車是否符合設計要求。一般車輛在減速時，僅使用摩擦之煞車方式消耗動能，但以電瓶供電之電動機車系統，可利用煞車回充裝置，將動能轉成電能回充給電瓶儲能，以達到增加續航力的目的。因此，本計劃預期研究的重點，是在不增加硬體線路的情況下設計煞車回充控制器，使馬達由驅動模式轉成發電機模式，以達到再生煞車回充的目的。

目前電動機車無法普及的主要原因，是單位體積之電池能量密度與功率密度太小，造成行駛里程短且行駛速度不高。其

解決方法可利用發電機將動能轉為電能，使電能存回電池，如此可增加電動機車之續航力，使用此方法必須在馬達部分增加充電器，並設計煞車充電電路使電能以定電壓、定電流或脈衝充電的方式回充。再生煞車充電的控制原理，可使用升壓直流轉換(Boost DC-DC converter)或升降壓直流雙向轉換(Buck-Boost Bi-directional DC-DC converter) [5][6]，但回充電路系統使用變壓器及電感之體積、重量頗大，可能造成電動機車額外的負載及能源損耗 [7]，其控制方法可利用模糊控制系統，以速度為函數控制煞車回充[8][9]。為了不使用充電器，卻能達到電流回充的目的，[10]提出以原有 inverter 架構，使用升壓式電壓轉換原理與電流限制控制方式(Current Limit Control, CLC)，產生回充電流以流回電源端。此外，另一種回充控制是以截波器之四象限時間比控制方式(Time Ratio Control, TRC)操作[11]，也能產生再生煞車回充。

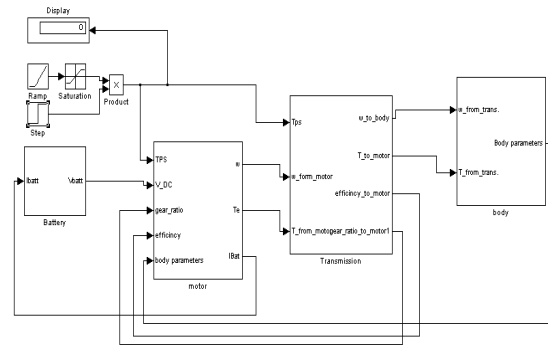
計劃中將利用 Matlab 與 Simulink 軟體發展出電動機車各部模型與煞車回充控制器，整合模擬以得到行車性能與能量消耗等動態與暫態特性，其結果能即時顯示或儲存以供分析。煞車回充將以升壓直流轉換及時間比(Time Ratio Control, TRC)控制方式產生再生煞車與回充電流，並分別利用霍爾感測器(Hall sensor)與光學編碼器(Encoder)回饋位置與速度之控制方式設計回充電流控制器，此控制器不但能驅動馬達也能達到煞車回充的目的。將模擬結果與實驗之實測資料比對，可驗證煞車回充控制器之性能，且煞車回充控制結果也能符合控制需求。

三、研究方法

3.1 電動機車系統模型之分析建立

將電動機車之電瓶、馬達、驅動器與控制器、傳動機構、車體動力五個子系統，分別以其數學模型或物理特性作分析探討，作為模型建立之基礎，將各組模型加以整合可得到電動機車整體模型，如圖

一。使用 Simulink 建立各部模型模擬程式。將鑑定之參數輸入，並依照實驗之條件模擬得到數據，將實驗資料與模擬結果對照分析，以驗證模擬程式之正確性與可用性。



圖一 電動機車 Simulink 整合模型

3.2 直流無刷馬達使用霍爾感測器之再生煞車回充分析與控制器設計

直流無刷馬達以三個霍爾感測器(Hall sensor)偵測目前馬達轉動的位置，並由六個功率開關控制驅動電壓向量，使馬達做正轉或反轉控制。假設 PWM 之週期為 T 。由每區間 H-Bridge 之開關切換，我們可以分析其再生煞車時間比控制(TRC)的穩態狀況。由直流無刷馬達之數學分析得到模型，考慮 A、B 兩相之電路方程式，將兩式相減並合併，並令 $(i_a - i_b) = I_{ab}$ ，可得

$$L_s \frac{d}{dt} I_{ab} + R \cdot I_{ab} + 2k_e \dot{S} = (v_{ag} - v_{bg}) = v_{ab} \quad (1)$$

所以

I. 能量儲存區間 ($0 \leq t \leq rT$)

$$L_s \frac{dI_{ab}}{dt} + R \cdot I_{ab} + 2k_e \dot{S} = 0 \quad (2)$$

II. 能量回充區間 ($rT \leq t \leq T$)

$$L_s \frac{dI_{ab}}{dt} + R \cdot I_{ab} + 2k_e \dot{S} = V \quad (3)$$

產生電流的大小與波形由兩區間功率開關的切換時間比例 r 決定，考慮週期 T 內馬達平均端電壓為 V_{ab} ，故

$$L_s \frac{dI_{ab}}{dt} + R \cdot I_{ab} + 2k_e \dot{S} = V_{ab} = (1-r) \cdot V = u \cdot V \quad (4)$$

為了控制回充電流產生的方式及大小，需針對馬達系統設計電流控制器。採用 PI 控制方法設計控制器，已知馬達電氣系統的

動態方程式，利用狀態回授設計， I^* 為電流指令值，其控制律為

$$u = k_p \cdot (I^* - I_{ab}) + k_i \int_0^t (I^* - I_{ab}) d\tau \quad (5)$$

得到系統轉移函數：

$$G(s) = \frac{I_{ab}(s)}{I^*(s)} = \frac{k_p s + k_i}{L_s s^2 + (R + k_p)s + k_i} \quad (6)$$

指定特徵方程式的阻尼係數 ζ 與自然頻率 $\tilde{\omega}_n$ 後，可得到控制器增益值：

$$k_p = L_s \cdot 2 \zeta \tilde{\omega}_n - R \quad (7)$$

$$k_i = L_s \cdot \tilde{\omega}_n^2 \quad (8)$$

其控制律可寫成：

$$V_{ab} = 2k_e \tilde{\omega}_n + k_p \cdot (I^* - I_{ab}) + k_i \int_0^t (I^* - I_{ab}) d\tau \quad (9)$$

煞車回充控制時，利用電流感知器取得 I_{ab} 訊號，利用控制器得到 PWM 週期內之平均電壓 V_{ab} ，由此可求得功率開關切換之 duty ratio r 為

$$r = (1 - u) = (1 - \frac{V_{ab}}{V}) \quad (10)$$

換相時，可以同樣方式控制其他區間之功率開關，以控制回充電流。

3.3 直流無刷馬達使用光學編碼器之再生煞車回充分析與控制器設計

若反應電動勢為弦波，則直流無刷馬達之數學模型將與永磁式同步馬達相同。馬達之數學模型為：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R/L & 0 & 0 \\ 0 & R/L & 0 \\ 0 & 0 & R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} + \frac{KN}{L} \tilde{\omega} \begin{bmatrix} \sin(N\theta) \\ \sin(N\theta - 2\pi/3) \\ \sin(N\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (11)$$

利用座標轉換 (Park Transform)，可將定子上馬達動態方程式轉換到轉子 $d-q$ 座標。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & N\tilde{\omega} \\ -N\tilde{\omega} & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \frac{KN}{L} \tilde{\omega} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

利用非線性狀態回授 (nonlinear state feedback) 可將系統線性化， I^* 為電流指令值，則控制律為

$$u_d = k_{pd} \cdot (i_d^* - i_d) + k_{id} \int_0^t (i_d^* - i_d) d\tau \quad (13)$$

$$u_q = k_{pq} \cdot (i_q^* - i_q) + k_{iq} \int_0^t (i_q^* - i_q) d\tau \quad (14)$$

得到系統轉移函數：

$$G_d(s) = \frac{i_d(s)}{i_d^*(s)} = \frac{k_{pd}s + k_{id}}{Ls^2 + (R + k_{pd})s + k_{id}} \quad (15)$$

$$G_q(s) = \frac{i_q(s)}{i_q^*(s)} = \frac{k_{pq}s + k_{iq}}{Ls^2 + (R + k_{pq})s + k_{iq}} \quad (16)$$

指定特徵方程式的阻尼係數 ζ 與自然頻率 $\tilde{\omega}_n$ 後，可得到控制器增益值：

$$k_{pd} = k_{pq} = k_p = L \cdot 2 \zeta \tilde{\omega}_n - R \quad (17)$$

$$k_{id} = k_{iq} = k_i = L \cdot \tilde{\omega}_n^2 \quad (18)$$

其控制律可寫成：

$$V_d = -LN\tilde{\omega} \cdot i_q + k_p \cdot (i_d^* - i_d) + k_i \int_0^t (i_d^* - i_d) d\tau \quad (19)$$

$$V_q = KN\tilde{\omega} + LN\tilde{\omega} \cdot i_d + k_p \cdot (i_q^* - i_q) + k_i \int_0^t (i_q^* - i_q) d\tau \quad (20)$$

煞車回充控制時，我們希望控制後級驅動電路下臂的三個功率開關以得到回充電流，由於使用對稱之 SVPWM 訊號在切換時不易產生足夠之回充電流，故使用非對稱之 PWM 訊號，以產生電壓空間向量。

四、結果與討論

1. 由煞車模擬與實驗可知，此 Simulink 模型除了反映出電動機車真實的特性狀況，在馬達控制器加入煞車回充控制器後，也能模擬出煞車回充的特性狀況。因此，可有效輔助於電動機車的研發模擬，並節省研發經費與時間。
2. 在計劃中提出使用 Hall sensor 或是 Encoder 以得到轉速與位置的煞車回充控制之兩種方法，均可以依照回充電流命令控制回充電流的產生。
3. 由模擬與實驗可知使用霍爾感測器得到轉速與位置的煞車回充控制方式，在三相切換控制時容易造成電流漣波變化

增大的現象。而使用 Encoder 得到轉速與位置的煞車回充方法能降低漣波之產生，得到較穩定之回充電流。

4. 將電動機車的驅動控制器與我們所設計之 PI 電流控制器結合，可以使馬達在驅動時依照油門命令加速，同時也能依照煞車訊號之回充電流命令產生煞車力與穩定之回充電流，僅需在控制電路略作設計修改，而不用增加太多的硬體成本。

五、計畫成果自評

無論使用 Hall sensor 或是 Encoder 以得到轉速與位置的煞車回充控制兩種方法，均可以依照回充電流命令控制回充電流的產生。藉由電子式煞車，可將車輛動能小部份消耗於摩擦損失，將大部分回充為可用能源，以增加電動機車之續航力。本研究結果與計畫書之規劃相同，控制方法為參考文獻所未見，具學術發表價值。

六、參考文獻

- [1] 何金滿及林法正，*電動機車能源效率及操作特性之分析*，工業技術研究院委託學術機構研究報告，1994
- [2] 林昆民，*電動機車整體性能之動態模擬分析*，國立清華大學動機所碩士論文，2000
- [3] 劉宗祺，*電動機車之建模分析與控制器設計*，國立台灣大學電機所碩士論文，2000
- [4] 游恭豪，*電動機車動力系統之電腦模擬與參數設計*，國立台灣大學機械所碩士論文，1999
- [5] F. Caricchi, F. Crescimbin, F. Giulii Capponi, and L. Solero, "Study of Bi-Directional Buck-Boost Converter Topologies for Application in Electrical Vehicle Motor Drives," *Conference Proceedings of the Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '98.*, Volume: 1, 1998 p.287 -293 vol.1
- [6] 潘佳憶，*再生式煞車煞車力之控制*，國

立清華大學動機所碩士論文，1998

- [7] 洪新堯，*電動機車煞車回充電系統設計與研究*，國立台灣大學機械所碩士論文，2000
- [8] J. Paterson and M. Ramsay, "Electric vehicle braking by fuzzy logic control," *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1993.*, Vol.3 ,p.2200-2204
- [9] P. Mattavelli, L. Rossetto, G. Spiazzi, and P. Tenti, "General Purpose Fuzzy Controller for DC-DC Converters," *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol.12, No.1, Jan. 1997
- [10] R. C. Becerra, T. M. Jahns and M. Ehsani, "Four-Quadrant Brushless ECM Drive with Integrated Current Regulation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28 Issue: 4, July-Aug. 1992 p.833 -841
- [11] G. K. Dubey, *Power Semiconductor Controlled Drives*, Prentice-Hall, 1999