

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

總計畫：高性能感應馬達驅動系統之研製(3/3)

子計畫五：感應馬達最佳效率控制

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC 90 - 2213 - E - 032 - 021 -

執行期間： 90年 8月 1日至 91年 7月 31日

計畫主持人：楊勝明 副教授 淡江大學機電系

共同主持人：

計畫參與人員：林逢傑 淡江大學機電系博士班

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位： 淡江大學

中 華 民 國 91年 10月 25日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

總計畫：高性能感應馬達驅動系統之研製(3/3) 子計畫五：感應馬達最佳效率控制

Optimal Efficiency Control of Induction Motor Drives

計畫編號：NSC 90-2213-E-032-021

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：楊勝明 副教授 淡江大學機電系

計畫參與人員：林逢傑 淡江大學機電系博士班

一、中文摘要

因為向量控制感應馬達的激磁電流與力矩電流可以分別控制，因此若控制轉子磁通使其隨著負載而調整以減少馬達的損失，則可使控制的馬達隨時在最佳效率點運作。本計畫的目的即是針對向量控制架構下的感應馬達控制系統，探討以功因為控制參數的最佳效率控制技術。由第一年的研究證實功因控制器本身相當容易可以實現，且具有很好的穩定性，但最佳功因命令計算不易，因此第二年度的研究重點放在最佳功因命令之產生之方法，此方法經實驗驗證可得到很接近正確值的結果，但是仍有些微的誤差，因此本年度提出一線上修正最佳功因之方法，利用最佳電流比值之原理對誤差之功因加以線上修正，此方法經模擬證實可得到很接近正確值的結果，並可以在馬達空轉時進行，故可包含在馬達參數自動量測之過程中。

關鍵詞：最佳效率、向量控制、感應馬達、功率因數

Abstract - Since the field and the torque of a vector controlled induction motor drive can be controlled independently, it is inherently simple for implementation of an optimal efficiency regulator to achieve optimal efficiency operation of the motor drive. The objective of this project is to develop an optimal efficiency control strategy that use power factor as its main control variable for vector controlled induction motor drives. It was found in the first year's research that the power factor controller can be implemented easily, however, generation of the optimal efficiency power factor command is rather difficult. An optimal power factor generation scheme was proposed in the second year's research. In this year, an on-line adjustment was added to the optimal

power factor generation to improve its accuracy.

Keyword: induction motor, vector control, optimal efficiency, power factor

二、緣由與目的

感應馬達在低載運轉時若激磁電流未隨著負載調整則其運轉效率會變差，而在向量控制下，馬達的激磁與力矩電流可以分別控制，因此藉由控制馬達的激磁電流可以大幅的提昇低載運轉時的效率。又感應馬達之效率控制可以完全以控制程式實現，並不需在系統加上任何硬體，因此對感應馬達驅動系統而言，為一低成本、但附加價值高的產品。

關於感應馬達最佳效率控制的研究，至今已有多篇論文發表，主要的方法大概可分成以下三類：1) 搜尋控制[1-5]，2) 損失模式控制[6-10]，3) 功因控制[11-12]。本計畫主要採用功因控制的方法。第一年度研究功因與效率的關係及功因控制器的設計，又因為最佳效率功因命令與轉速之函數關係相當複雜，計算不易，因此計畫的第二年度我們提出一以模糊邏輯補償最佳功因之命令產生方法，此方法不需用到馬達等效電路參數，且不論馬達的大小，皆可產生一近似的最佳功因命令曲線。但是由此方法產生之最佳功因命令仍有誤差存在，因此本年度的研究重點在設計一線上修正功因命令的方法，以進一步提升最佳效率控制器的性能。

首先，第三節針對不同的最佳效率控制方法做一簡要的整理說明，以供將來的研究參考。接著第四、五節分別說明整個功因最佳效率控制的原理及驗證結果，最後綜合討論本計畫的研究成果。

三、最佳效率控制方法整理

一般的最佳效率控制方法都可以用圖 1 的方塊圖表示，首先根據使用的控制法則以決定最佳效率的命令值，因為有些控制法則可直接由回授量計算出所需的命令值，因此此方塊並不一定所有控制法則都有。接著利用馬達控制系統具有的感測裝置量測輸入量，以計算所需的效率控制的回授，之後使用最佳效率控制法則判斷或計算適當的修正量，使回授量得以追隨最佳效率命令或達到最小損失之目的。

圖 1 只是約略地描述最佳效率控制如何執行，接下來我們利用此方塊圖來輔助說明已知的主要最佳效率控制法則的運作原理，這些方法可分大致分為搜尋法、損失模式法、與最佳功因法等三種。

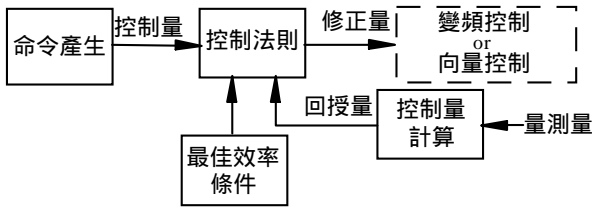


圖 1 最佳效率控制方塊圖

3.1 搜尋法

此法以尋找輸入功率的最小值為其控制目標，如對應圖 1 之架構，回授量為馬達的功率，控制法則使用最小損失為最佳效率點的條件，修正量一般為馬達的激磁電流 i_{ds}^e ，而通常沒有命令產生的部分。馬達的功率可以有以下算法：a) 量測驅動器的直流電壓與電流以計算輸入功率 (P_{dc})，b) 量測馬達的端電壓與電流，然後計算馬達之輸入功率 (P_{in})。 P_{dc} 與 P_{in} 之不同點在於有、無包括驅動器的損失。一般計算時會以平均的方式求輸入功率以避免控制上發生不穩定的現象，然後有些控制會加上濾波器緩和輸入功率的變化。

當驅動器有向量控制時，尋找輸入功率的最小值的方法可以有許多變化，例如用 P_{dc} 與轉速變化量 $\Delta\omega_r$ 為判斷條件，經過一黃金選擇法則以選擇最佳的輸出激磁電流 i_{ds}^e 使輸入功率快速趨近最小[1]。此外，亦可使用

P_{dc} 、電流頻率 ω_e 與力矩命令 T_e^* 為類神經模糊控制之輸入，以產生轉子磁通的修正量 $\Delta\lambda_{dr}^e$ 來搜尋最小輸入功率[2]。或是，以 ΔP_{dc} 與 Δi_{ds}^e 為輸入，然後用模糊控制為效率控制計算激磁電流得修正量 Δi_{ds}^{e*} 亦可搜尋最小輸入功率[3]。反之，在變頻器的場合，則需以 V/f 比例作為系統的修正量，例如用 P_{dc} 、 ΔP_{dc} 與 $\Delta(V/f)$ 為模糊控制的輸入，產生一 $\Delta(V/f)$ 的修正量來搜尋最小輸入功率[4]。此外亦可以 P_{dc} 與 $\Delta\omega_r$ 為輸入，使用適應控制法則計算 (V/f) 的比例[5]。

3.2 損失模式法

損失模式控制主要是在控制器內建一馬達損失的模式或已知之最小損失所對應之激磁電流方程式、轉子磁通方程式或滑差方程式等作為最佳效率控制法則，藉著量測的馬達電壓、電流與其他物理量，之後帶入這些控制法則，計算修正量後用以改變馬達激磁、轉子磁通或滑差量以達到最佳效率控制的目的，而在此架構下一般沒有命令產生的部分，或命令為一定值由修正量修改之。

馬達的損失模式[12]，經過簡化後可以用下式表示：

$$W = \frac{r_s^2}{L_m^2} \lambda_{dr}^{e^2} + \left(\frac{r_s L_r^2}{L_m^2} \right) T_e^2 \lambda_{dr}^{e-2} + r_r T_e^2 \lambda_{dr}^{e-2} \quad (1)$$

因為上式需用到力矩，因此控制器量測 q、d 軸之電流以估測 λ_{dr}^e 與 T_e ，之後再計算馬達損失，最後利用遺傳演算法計算最佳效率之轉子磁通命令[6]。另外，[7]利用 W_q 等於 W_d 原理，量測 q、d 軸電流回授分別計算 W_q 與 W_d ，再經由一 PI 控制器修正 i_{ds}^e 以達成最佳效率控制。[8]則採用最佳 q、d 軸電流比值方程式計算不同轉速與負載下之電流命令，其所使用之方程式如下

$$\frac{i_{ds}^e}{i_{qs}^e} = \sqrt{\frac{r_s(r_c + r_r) + r_c r_r}{r_s(r_c + r_r) + L_d \omega_r^2}} \quad (2)$$

其中 r_c 為鐵損阻抗值， L_d 為 d 軸電感值。用式(2)只需要輸入馬達之轉速即可計算最佳電流比值，然後依據此值修正 i_{ds}^e 。又最佳轉子磁通量為[9]：

$$\lambda_{dr}^{e*} = \sqrt[4]{\frac{r_s(L_r^2 + r_m/\omega_e)^2 + i_r r_m + r_r(L_m^2 + r_m/\omega_e)^2}{r_s + r_m}} T_e^{0.5} \quad (3)$$

此式必需計算 T_e 與 ω_e 方能求得最佳轉子磁通量。此外，亦可計算最佳的滑差量來做最佳效率控制[10]，

$$S = \pm \sqrt{\frac{k_{fe} L_m^2 \omega_e^2 + (3/2)r_s}{(3/2)r_s + (3/2)(L_m/L_r)^2 r_r}} \frac{L_m r_r}{2\pi\omega_e L_r L_s} \quad (4)$$

其中 k_{fe} 為鐵損值， s 為頻率之函數。

3.3 最佳功因法

由[12]知當馬達在定速時，不論其負載為何，最佳效率點的功因也是定值，即只要知道最佳效率點的功因與轉速之間的函數關係，便可藉著功因控制激磁使馬達維持在最佳效率的狀態下運轉。因此，此方法需事先以量測或計算方法求得最佳效率功因命令，控制時測量馬達的電壓與電流以計算功因做為回授量，接著將最佳功因命令與功因回授經由一控制器後，藉著修正激磁電流使馬達的功因能維持在其最佳值。

此方法最困難的地方在於最佳功因命令的計算不易，因此通常必需簡化或以量測的方法取得。如[11]提出以二次曲線近似最佳功因命令。此外，[12]則提出一利用自動量測的方法求取所需要的最佳功因命令的方法。

以上這一節針對主要的最佳效率控制方法做一簡要的回顧，最後，我們亦將文獻[1-12]與圖1之方塊圖做一對照，結果如下表所示以供參考。

四、研究方法與成果

本計畫探討以功因為控制量的最佳效率控制方法之理論分析、控制法則設計、建立實驗系統、與實驗結果印證。以下簡要敘述第一、二年的研究，然後再詳細說明這一年度的研究成果。

4.1 第一年

本年度的重點在研究功因與運轉效率的關係、功因控制器的設計、及建立實驗系統[13]。設計的控制系統方塊圖如圖2所示，最佳功因命令為一轉速的函數，由實測得到

並建表作為控制器之命令，控制時則利用馬達的電壓與電流計算功因做為回授，經由一PI控制器用以修正激磁電流，以使得馬達在最佳效率下運轉。

實驗系統以一 TMS320C240 DSP 為核心控制一 1 HP 之感應馬達，並透過動力計加載。實驗結果顯示當負載明顯低於其額定值時，此控制方法可以有效地降低馬達的運轉損失，並具有穩定的暫態響應。

表 1 各種最佳效率控制方法對照表

| 參考文獻 | 最佳效率條件 | 量測量 | 回授量、控制量 | 控制法則 | 修正量 |
|------|----------------|------------------------|---------------------------|---------|------------------------|
| [1] | 輸入功率 | V_{BUS}, I_{BUS} | $P_{dc}, \Delta\omega_r$ | 黃金選擇法 | i_{ds}^{e*} |
| [2] | 輸入功率 | V_{BUS}, I_{BUS} | $P_{dc}, \omega_e T_e^*$ | 類神經模糊控制 | $\Delta\lambda_{dr}^e$ |
| [3] | 輸入功率 | V_{BUS}, I_{BUS} | $P_{dc}, \Delta i_{ds}^e$ | 模糊控制 | Δi_{ds}^{e*} |
| [4] | 輸入功率 | V_{BUS}, I_{BUS} | $P_{dc}, \Delta(V/f)$ | 模糊控制 | (V/f) |
| [5] | 輸入功率 | V_{BUS}, I_{BUS} | $P_{dc}, \Delta\omega_r$ | 適應控制 | (V/f) |
| [6] | 損失 | i_{qds}^e | $\lambda_{dr}^e T_e$ | 式(1) | λ_{dr}^{e*} |
| [7] | W_q 等於 W_d | i_{qds}^e | $W_q W_d$ | PI | λ_{dr}^{e*} |
| [8] | qd 電流比值 | ω_r | i_{qds}^e | 式(2) | i_{ds}^{e*} |
| [9] | 損失 | i_{qds}^e | $\omega_e T_e$ | 式(3) | λ_{dr}^{e*} |
| [10] | 滑差 | ω_r, i_{qds}^e | ω_e | 式(4) | S |
| [11] | 功因 | V_{qds}^e, i_{qds}^e | PF | PI | (V/f) |
| [12] | 功因 | V_{qds}^e, i_{qds}^e | PF | PI | i_{ds}^{e*} |

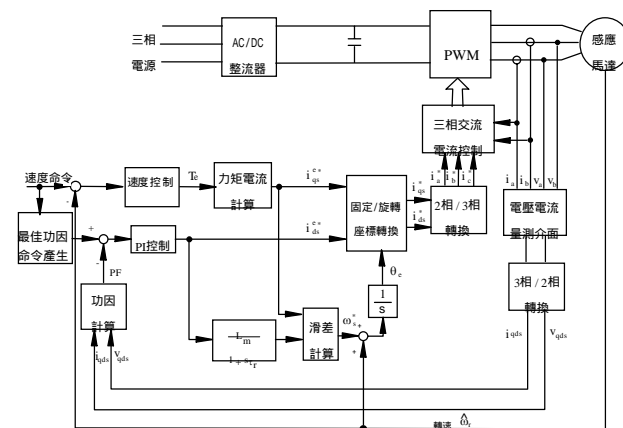


圖 2 控制系統方塊圖

4.2 第二年

由前面的研究結果知道功因控制器本身相當容易可以實現，且具有很好的穩定性，但因為最佳功因命令為一轉速的函數，若要以理論計算的方法求得除了必須要知道馬達

等效電路的參數外，還要知道渦電流與磁滯損失係數(K_e 與 K_h)，並不容易求得，因此第二年度的研究重點放在最佳功因命令產生之方法[14]。

我們提出一結合量測與模糊邏輯的方法以求得最佳功因命令，命令產生之方塊圖如圖 3 所示。 PF_d 為以量測得到的最佳效率功因原始值， PF_c 為利用模糊邏輯計算之補償量，此二者合成最佳效率功因 PF_o 。

為了驗證提出的方法，我們針對典型的 1-50 馬力伺服感應馬達調整整個功因命令產生法則，計算分析的結果如圖 4 所示，以此方法產生的值與理論之最佳功因命令值之間的誤差都在 0.03 以內。同時，實驗的結果亦顯示此功因控制方法的確可以明顯地改善馬達在低負載時的運轉效率。又此方法綜合馬達測試、計算，所需的執行時間很短，且可以在馬達空轉時進行，故可包含在馬達參數自動量測之過程中。

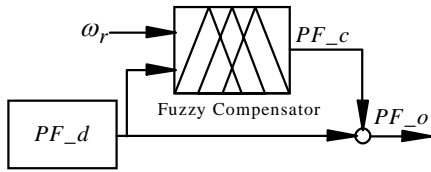


圖 3 模糊邏輯功因補償器控制方塊圖

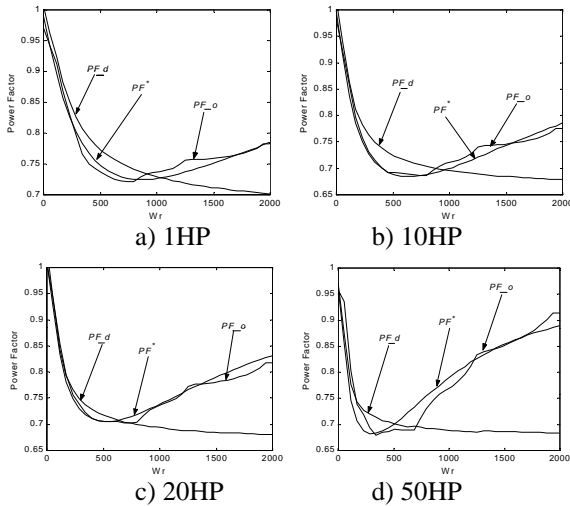


圖 4 不同馬力馬達之最佳功因與補償後之功因曲線

4.3 第三年

因為第二年度提出的最佳功因命令產生方法在補償後仍有一些誤差存在，且此誤差並無明顯的規律，如圖四所示，所以本年度研究探討在功因控制器加入一線上調整的機

制以進一步將此誤差降低，使整個最佳效率控制系統更完善，線上調整的原理說明如下。

最佳電流比值

前面提過馬達的運轉損失模式可以式(1)表示，若將同一轉速但不同負載下的損失劃出可得圖 5a)所示之結果。又若將式(1)之 λ_{dr}^e 與 T_e 以電流代替，則可以得到以下的表示式[12]：

$$W = \frac{3}{2} \left[\left(i_{qs}^e{}^2 + i_{ds}^e{}^2 \right) r_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} i_{qs}^e{}^2 r_r + \left(K_h \omega_e + K_e \omega_e^2 \right) \left(\frac{L_{lr}^2 L_m^2}{L_r^2} i_{qs}^e{}^2 + L_m^2 i_{ds}^e{}^2 \right) \right] \quad (5)$$

針對上式，等號兩邊若同時除以 $i_{qs}^e i_{ds}^e$ ，並令 $A = i_{qs}^e / i_{ds}^e$ ，視 A 為獨立的變數，則對 A 取微分並令其結果為零，可求得損失為最小時之電流關係式，最後再將 A 分解開來可以得到下式：

$$\left[r_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} r_r + (K_h \omega_e + K_e \omega_e^2) \frac{L_{lr}^2 L_m^2}{L_r^2} \right] i_{qs}^e{}^2 = \left[r_s + (K_h \omega_e + K_e \omega_e^2) L_m^2 \right] i_{ds}^e{}^2 \quad (6)$$

令 q 軸與 d 軸的損失分別為 W_q 與 W_d ，則由上式可發現當運轉損失為最小時 $W_q = W_d$ 。觀察圖 5b)所示之 W_q 、 W_d 的結果可發現當 i_{ds}^e 增加時 W_q 逐漸下降而 W_d 則逐漸增加，而圖中之'o'點顯示當 W_q 等於 W_d 時的位置。比較圖 5a)與圖 5b)之'o'點可以發現 $W_q = W_d$ 時之 i_{ds}^e 與圖 5a)中之最小損失點相同。由式(6)可求得運轉損失為最小時之 A 值為

$$A^2 = \frac{L_m^2 K_e \omega_e^2 + L_m^2 K_h \omega_e + r_s}{\frac{L_{lr}^2 L_m^2}{L_r^2} (K_e \omega_e^2 + K_h \omega_e) + \frac{L_m^2}{L_r^2} r_r + r_s} \quad (7)$$

圖 5c)顯示同轉速但不同負載下的 A 值對 i_{ds}^e 的結果，觀察此圖可證實在同一轉速下無論負載如何變化其最小損失點之 A 值為一固定值。又若將不同轉速下的最佳的 A 值算出則如圖 6 所示之曲線。

線上功因調整法則：

由[15]知，計算感應馬達之損失時可假設其 K_e 、 K_h 值相同對結果影響很小。因此，若令二者皆為 K ，則重新整理式(7)可得

$$K = \frac{r_s(l - A^2) - \frac{L_m^2}{L_r^2} r_r A^2}{\frac{L_{lr}^2 L_m^2}{L_r^2} (\omega_e^2 + \omega_e) A^2 - L_m^2 (\omega_e^2 + \omega_e)} \quad (8)$$

亦即 K 為 A 與 ω_e 的函數，因此利用 A 與 ω_e 可以求得 K 值，而且此式只有當馬達在最佳效率狀況下運轉時才成立，其餘狀況不成立。也就是說若馬達在最佳效率功因運轉，則不論轉速與負載為何，其 K 值應該都相同；反之，若在不同轉速或負載下得到的 K 值不同，則表示馬達並非都在最佳效率功因運轉。

根據以上說明的原理可以設計一個線上調整最佳功因命令的控制器，如圖 7 所示。因為若馬達在最佳效率功因運轉則不同轉速計算出的 K 應該相同，所以控制器會讓馬達在兩種轉速下切換運轉，接著利用式 (8) 計算出此二轉速之 K 值，然後取其誤差量再經過一 PI 控制器後，將修正量加入功因命令，使 K 之誤差逐漸降為零。

又以上的控制動作，求 K 值之變化量相當於對 K 微分，而微分之結果再經過一 PI 控制，整個過程相當於對 K 做 PD 控制的運算。所以圖 7 顯示的線上調整最佳功因命令的控制方塊圖為一 PD 控制器，其中 PF_t 為最佳功因命令線上調整之輸出量。注意，因為 PF_o 已經相當接近最佳值，因此 PF_t 應該很小，只是對 PF_o 做微細的調整。

五、模擬及實驗結果

針對以上說明的最佳功因命令線上調整法則，我們以一 1Hp 之馬達為對象利用 Simulink 做模擬，馬達的轉速設定在 1000rpm 與 1500rpm 兩種轉速切換運轉。模擬時馬達參數皆設為正確值，但最佳功因命令在開始模擬時有大約 0.1 的誤差存在。模擬結果如圖 8 所示，在線上調整的機制下，可以發現在兩個轉速下初始之 K 值約分別為 0 與 0.0005，經過一段時間後 K 逐漸收斂到其正確值，而不同轉速的功因命令也收斂到其最佳值。注意因為線上調整需在不同轉速下進行，因此所需的時間亦較長。

六、結論

本計畫研究以馬達功率因數為控制量的最佳效率控制方法，控制系統包括回授控制

與最佳效率命令產生兩部分。第一年度探討了控制器的設計，第二年度研究以模糊邏輯方法產生最佳的功因命令，以此方法得到的命令值相當接近理論的最佳值。本年度則提出一線上修正的方法以持續修正功因命令，使馬達能隨時維持在最佳效率狀態下運轉。

功因控制器與模糊邏輯最佳的功因命令產生皆有經過實驗的驗證，與理論分析的結果相符。這一年度提出的線上修正方法則經模擬結果證實其可行性。最佳效率命令產生的過程雖然必須在馬達運轉於不同轉速下方能完成，但可以在無載時進行，因此即便整個過程較複雜，但應該還是可以應用在工業用的感應馬達驅動器。

七、由本計畫產生之重要論文

- ◆ Sheng-Ming Yang and Chen-Haur Lee, "Digital Current Control of Field Oriented Induction Motor Drives", *IEEE Transactions on Power Electronics*, VOL.17, NO.5, September 2002, pp.772-778.
- ◆ Sheng-Ming Yang and Feng-Chieh Lin, "A Digital Current Control Technique for Voltage-Fed Induction Motor Drives", accepted to publish in *International Journal of Electronics*.
- ◆ Sheng-Ming Yang and Feng-Chieh Lin, "Loss-Minimization Control of Vector-Controlled Induction Motor Drives", accepted to publish in *Journal of the Chinese Institute of Engineers*.
- ◆ 參考文獻[12]
- ◆ 林逢傑、楊勝明，"感應馬達最佳效率控制法則分析"，第二十三屆電力工程研討會。

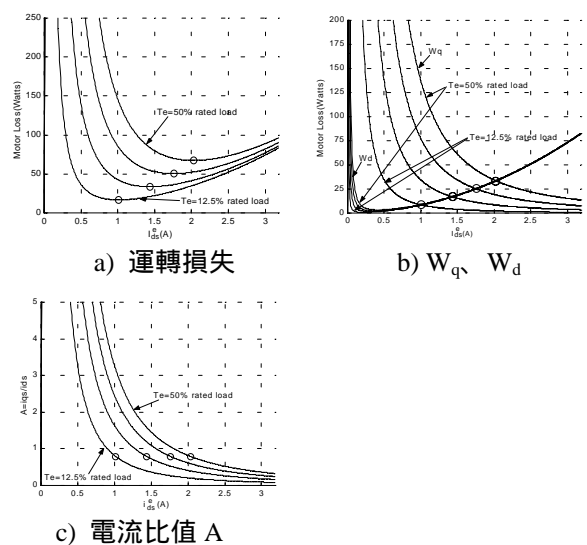


圖 5 i_{ds}^e 分別與運轉損失、 W_q 、 W_d 和電流比值 A ，在不同的輸出力矩時的關係圖，‘o’為最低損失點

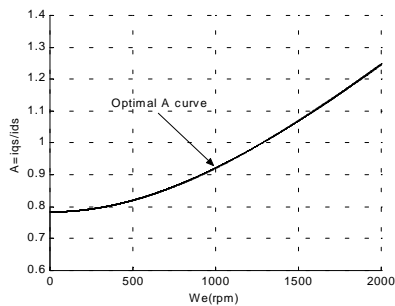


圖 6 最佳效率時之 A 與轉速之間關係圖

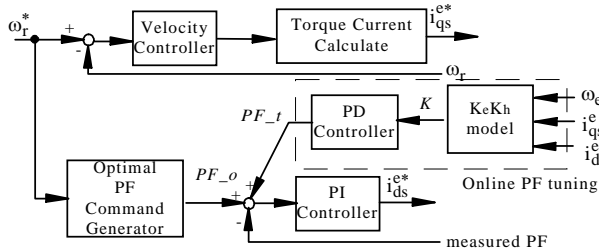


圖 7 最佳功因命令線上調整控制方塊圖

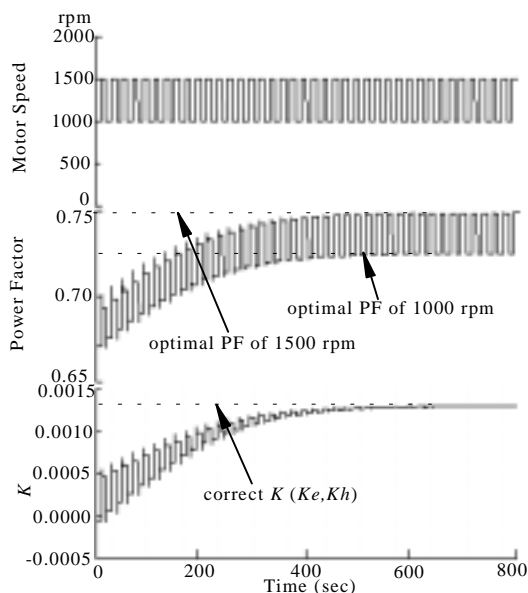


圖 8 最佳功因命令線上調整控制模擬結果

參考文獻

[1] C. M. Ta, Y. Hori, "Convergence Improvement of Efficiency-Optimization Control of Induction Motor Drives", IEEE Transactions on IAS, Vol. 37, 2001, pp. 1746-1753.

[2] B. K. Bose, N. R. Patel, K. Rajashekar, "A Neuro-fuzzy-based On-line Efficiency Optimization Control of a Stator Flux-oriented Direct Vector-controlled Induction Motor Drive", IEEE Transactions on IE, Vol. 44, April 1997, pp. 270-273.

[3] G. C. D. Sousa, B. K. Bose, J. G. Cleland, "Fuzzy Logic Based On-line Efficiency Optimization Control of an Indirect Vector-controlled Induction

Motor Drive", IEEE Transactions on IE, Vol. 42, April 1995, pp. 192-198.

[4] T. C. Huang, M. A. El-Sharkawi, "Induction Motor Efficiency Maximizer Using Multi-layer Fuzzy Control", Intelligent Systems Applications to Power Systems, Proceedings, ISAP '96, 1996, pp.109-113.

[5] F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, "An Integrated High Power Factor Three-phase AC-DC-AC Converter for AC-machines Implemented in one Microcontroller", Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 1993, pp.285-292.

[6] E. Poirier, M. Ghribi, A. Kaddouri, "Loss Minimization Control of Induction Motor Drives Based on Genetic Algorithms", Electric Machines and Drives Conference, IEEE International, 2001, pp.475-478.

[7] H. R. Anderson, J. K. Pedersen, "On the Energy Optimized Control of Standard and High-Efficiency Induction Motors in CT and HVAC Applications", Conference Record of the 1997 IEEE IAS Annual Meeting, pp.621-628.

[8] F. Fernandez-Bernal, A. Garcia-Cerrada, R. Faure, "Model-based Loss Minimization for DC and AC Vector-Controlled Motors Including Core Saturation", IEEE Transactions on IAS, Vol. 36, No.3, May/June 2000, pp.755-763.

[9] S. Taniguchi, T. Yoshizumi, K. Matsuse, "A Method of Speed Sensorless Control of Direct-field-oriented Induction Motor Operating at High Efficiency with Core Loss Consideration", Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 2, 1999, pp. 1244-1250.

[10] X. Lu, H. Wu, "Maximum Efficiency Control Strategy for Induction Machine", Electrical Machines and Systems, Vol. 1, 2001, pp. 98-101.

[11] H. R. Anderson, J. K. Pedersen, "Low Cost Energy Optimized Control Strategy for a Variable Speed Three-phase Induction Motor", Proceedings of the 1996 IEEE-PESC, Vol. 1, pp. 920-924.

[12] S.M. Yang and F.C. Lin, "Loss-Minimization Control of Vector-Controlled Induction Motor Drives", The 4th International Conference on Power Electronics and Power Systems (PEDS), Bali, Indonesia, Oct. 2001, pp.182-187.

[13] 高性能感應馬達電力系統研製子計畫五:感應馬達之最佳效率控制 (1/3), 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告, NSC 89-2213-E-032-028.

[14] 高性能感應馬達電力系統研製子計畫五:感應馬達之最佳效率控制 (2/3), 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告, NSC 89-2213-E-032-041.

[15] D. Kirschen, D. W. Novotny, and W. Suwanwisoot, "Minimizing induction Motor Losses by Excitation Control in Variable Frequency Drives", IEEE Transactions on IAS, Vol. 20, 1984, pp.1244-1250.