內藏式永磁同步馬達定力矩與定功率控制之開發

Development of Constant-torque and Constant-power Controller for Internal Permanent Magnet Synchronous Motors

許煜亮 [1]、周柏寰 [2*]、楊士進 [3]、陳俊佑 [4]、劉乃文 [4]

[1] 逢甲大學 自動控制工程學系 副教授

[2] 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合部 資深研究員

[3] 國立台灣大學 機械工程學系 副教授

[4] 國立台灣大學 機械工程學系 博士生

摘要：本論文研究內藏式永磁同步馬達在全速度操作域最大效能之輸出控制開發，在額定轉速內使用最大力矩控制產生最大定力矩輸出，在額定轉速外使用弱磁控制產生最大定功率輸出。針對最大力矩控制，本論文推出定 45 度 m-t 軸最大力矩控制方法，可簡化一般參數型的根號計算，讓系統能有相同最大力矩輸出的前提下也能有更少的計算時間。針對弱磁控制，本論文將比較前饋型弱磁控制以及回授型弱磁控制的暫態與穩態響應，並針對其需要的參數設定以及弱磁控制器設定加以優化，讓這兩種弱磁控制都能實現相近的最大定功率輸出。

Abstract：This paper develops an internal permanent magnet synchronous motor (IPMSM) controller to maximize the drive performance under the same energy usage. Maximum torque per ampere (MTPA) control is used to maximize the torque output below rated speed. Flux-weakening (FW) control is implemented to maximize the power output beyond rated speed. From the perspective of MTPA, a fixed m-t axis current control is proposed during the constant torque region at low speed. Conventional MTPA control requires the differentiation of nonlinear torque equation to obtain corresponding d- and q-axis current, leading to complicated nonlinear mathematical calculation. Under this effect, conventional MTPA results in considerable controller memory and calculation time. From the perspective of FW, both feedforward and feedback control methods are compared to identify a suited FW controller. It is shown that the feedforward FW control results in fast dynamic responses; however, the parameter sensitivity is the primary control issue.

關鍵詞：內藏式永磁同步馬達、最大力矩控制、弱磁控制

Keywords：IPMSM, MTPA control, FW control

前言

二十一世紀以來，科技進步，從以前的土法煉鋼、蒸氣技術、電力的大規模應用，一直到現在的工業自動化時代，許許多多的工具機、機器人，都需要共同的核心來達成，那就是馬達，而永磁同步馬達 (Permanent Magnet Synchronous Motor , PMSM) 更是受到許多學界跟業界的注目眼光，因為它有著體積小、高效率、高功率密度的優點 [1]，比起有刷直流馬達，它更不用做定期維修碳刷的工作，變速範圍也比較廣。

處在現今的年代，能源並非取之不盡、用之不竭，經過文獻統計 [2]，約 65% 的工業電力能源皆用在馬達之上，就像當我們使用永磁無刷馬達時，也必須盡量提高使用的效率，像是在一定轉

矩下降低電流的使用，不僅能夠降低總功率的使用，還能降低瞬間電流過大以導致短路的可能性，或者是在一定電流限制下，最大化力矩或功率的輸出 [3, 4]。

降低使用電壓也是另外一種提高馬達效率使用的方法，一般如果必須將馬達轉速提高到額定轉速以上的話，通常都需要提高電壓，有些馬達甚至需要提供它數百伏特以上的電壓才能讓它在兩三倍的額定轉速下能穩定運轉不失控，因此如果在額定轉速以上能降低電壓使用的弱磁控制技術 [5]，甚至能夠在一定電壓限制的情況下，就能夠把馬達轉速提升上去。

本篇論文主要目標為研究額定速度內及額定速度外的兩種不同控制方法，主要研究內容包含 : A. 實現定 45 度 m-t 軸 MTPA 控制並與一般 MTPA 控制方法比較其計算時間及力矩輸出；B. 比較前饋型弱磁控制及回授型弱磁控制方法的暫態及穩態響應。

MTPA 及弱磁控制

圖 1(a) 解釋具有 MTPA 控制的速度閉迴路訊號流程圖，是整個 MTPA 控制的演算核心，將速度控制器的輸出，即力矩命令送給 MTPA 演算法控制裡，然後在線算出 i^*_d, i^*_q 組合給電流控制器使總電流最小化，達到 MTPA 控制的目的。**圖 1(b)** 是具有弱磁控制的速度迴路流程圖，經由速度控制器的輸出告訴控制器需要多少的力矩，再跟目前的速度回授跟電壓命令的需要一起送入弱磁控制的演算法，計算需要給出多少的 id,iq 到電流控制器，才能在超過額定速度之上然後加載的情況下穩定運轉在馬達的定功率區間，成功達到弱磁控制的目的。

1. 定 45 度 m-t 軸 MTPA 控制

本論文馬達研究對象將採取內藏式永磁同步馬達 (IPMSM)，因為 IPMSM 本身磁通分布原因讓 $L_d < L_q$，有電磁轉矩跟磁阻轉矩這兩項力矩輸出，如 (1) 式，是非常適合實現 MTPA 控制的特點，所以希望在額定電流源的限制下，找到一組最佳的 (i_d, i_q) 組合，讓力矩輸出能夠最大，提升馬達的效率。

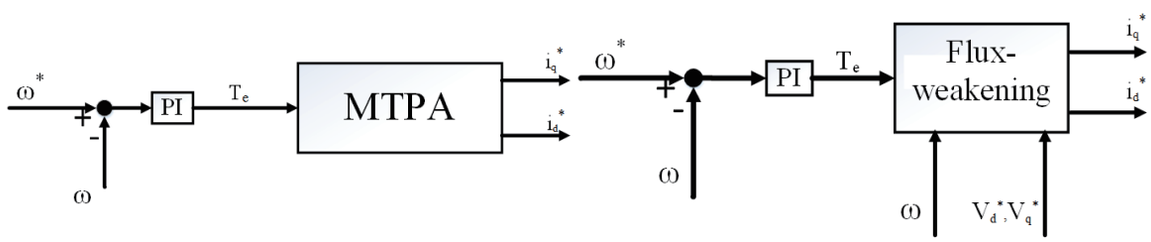
$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left[{}_m i_q + \left(L_d - L_q\right) i_d i_q\right] \tag{1}$$

其中 T_e 為輸出力矩、i_d 為 d 軸電流、i_q 為 q 軸電流、L_d 為 d 軸電感、L_q 為 q 軸電感、λ_m 為轉子磁鐵磁通、P 為極數。而一般參數型的 MTPA 控制就是將 (1) 式對角度作微分，即可取得一個最佳的 id 與 iq 之間的角度，所以經由微分後可以推出一個參數型 (需要 d-q 軸電感 , 磁通) 的 MTPA 公式，如 (2) 式。

$$i_d = \frac{{}_m}{2\left(L_q - L_d\right)} - \sqrt{\frac{{}_m^2}{4\left(L_q - L_d\right)} + {}_q^2} \tag{2}$$

用 (2) 式就能夠模擬出 MTPA 的曲線，只需要知道 d-q 軸電感跟磁通就可以模擬出 id, iq 之間的關係，不需要先畫出每條定力矩線，就能由 MTPA 曲線直接得知每個 id 對應下的 iq 搭配，如**圖 2(a)** 所示。

上述的一般參數法 MTPA 是一個非常常見的控制方法，如 (2) 式，但公式裡面含有除法跟開根號計算，這兩種計算比起加法跟乘法而言需要更



(a) (b)

圖 1 (a) 具有 MTPA 之速度閉迴路控制流程圖 (b) 弱磁控制流程圖

更完整的內容

詳見 ▌機械工業雜誌 ▌ • 434 期 • 108 年 5 月號

機械工業雜誌·每期 220 元·一年 12 期 2200 元

線上訂購網址：https://www.automan.tw/magazine/orderMag.aspx

▌付款方式▌

1. 郵局劃撥─戶名：財團法人工業技術研究院機械所　帳號：07188562
   請於劃撥單的通訊欄寫明：購買期數、金額等
2. 匯款資料─兆豐國際商業銀行新竹分行(代號 017)
   帳號：203-07-02288-0　戶名：財團法人工業技術研究院
3. 信 用 卡─請填寫信用卡訂購單

麻煩您將**繳款收執**或**信用卡刷卡單**傳真至(03)582-2011，我們會盡快處理您的訂單並開通權限，再次感謝您的支持與愛護。

訂書專線：03-591-9339　　傳　真：03-582-2011

機械工業雜誌·官方網站：www.automan.tw　機械工業雜誌·信箱：jmi@itri.org.tw

機械工業雜誌 優/惠/訂/購/單

訂閱一年 12 期

$ 2200 / 續訂戶 $ 2000

好禮二選一

A 史欽泰墨寶帆布袋

B 工研院機械所無人車USB (8G)

訂閱紙本+電子雜誌

$ 3000 ~~原價 $ 4400~~

一年12期

贈送

A 史欽泰墨寶帆布袋

訂閱二年 24 期

$ 4000 / 續訂戶 $ 3600

好禮四選二

A 史欽泰墨寶帆布袋

B 工研院機械所無人車USB (8G)

C 工具機叢書任一本

D 智慧機械人叢書任一本

限量專屬精品送給您

A

B

C

D