



同步磁阻馬達之單位電流最大轉矩控制器設計

The Design for Maximum Torque per Ampere Control of Synchronous-Reluctance Motors

¹蔡明發 / ²曾仲熙 / ³陳俊漢 / ⁴楊竣翔

¹明新科技大學 電機工程系 助理教授

²明新科技大學 電機工程系 教授

³工研院機械所 節能機械系統部

⁴工研院機械所 節能機械系統部 經理

摘要：同步磁阻馬達是一種同步機，比感應馬達有較高的能源轉換效率，它的轉子不像一般的永磁同步馬達安裝磁鐵，故不會有馬達因經年累月運轉造成轉子磁鐵磁性減弱的問題，它的轉子材料是如矽鋼片的導磁材料，藉由轉子凸極現象造成磁阻的不均勻，來產生力矩而轉動，故其構造簡單，具有堅固的特性，近年來吸引著工業界的注目。精確的馬達模型及控制器設計，使其性能優化是非常重要的。

本文設計同步磁阻馬達的單位電流最大轉矩(maximum torque per ampere, MTPA)控制器，是向量控制器設計的延伸，得出 d 軸電流參考命令與 q 軸電流參考命令的關係，MTPA 控制的 q 軸電流命令是由轉速控制器產生； d 軸電流命令是 q 軸電流命令的負值，如此可得到最佳化的設計，提高效率。模擬結果顯示在相同的轉速命令與負載轉矩之下，在 MTPA 控制情況下，可得最小定子電流大小的值，因此是最佳化的設計，在加載情況下，對給予的轉速命令有理想的轉速與電流響應。

Abstract : The synchronous reluctance motor (SynRM) is one kind of synchronous machines. Its energy efficiency is higher than the induction motors. The SynRM is unlike the permanent magnet synchronous motor (PMSM), in which the rotor is equipped with permanent magnets and the magnetism will decrease after long-time rotation. The rotor material of SynRM is high-permeability material such as silicon steel. The torque generation for rotation of the SynRM is by means of the reluctance unbalance due to the salient pole effect. Recently, with the features of simple and rugged construction, the SynRM has received a lot of attention in the industry. So, it is important for both the modeling of the SynRM motor and the control design for optimizing the motor performance.

This paper presents the design for the maximum torque per ampere (MTPA) control of synchronous reluctance motors. The design is the extension of vector control design. In the MTPA control design, the relationship between the d -axis current command and the q -axis current command can be obtained. The q -axis current command of the MTPA control is generated from the speed controller output. The d -axis current command is the negative of the q -axis current command. In this case, the design is optimized and hence the efficiency is increased. The simulation results demonstrate that under the same speed command and load torque, and with the MTPA control, the least magnitude of the current can be obtained; and therefore an optimized design is achieved. For a given speed command and load torque, the simulation also shows good speed and current dynamic responses.



關鍵詞：同步磁阻馬達、向量控制、單位電流最大轉矩控制

Keywords : Synchronous Reluctance Motor, Vector Control, Maximum Torque per Ampere (MTPA)

前言

近年來因為全球暖化問題相當嚴重，節能減碳是世界各國重視的課題，如何提高能源使用效率，成為專家學者們努力的目標。馬達是工業應用與製造產品的主要能量傳動與轉換關鍵零組件，其運轉效率成為節能減碳考量的主要因素。國內於 2012 年 3 月 26 日公告了新版 CNS14400 高效率馬達標準，參考歐美各國的標準與時程，將納入超高效率 IE3 等級，訂定民國 104 年全國馬達提升至 IE2 級，且於民國 106 年提升至 IE3 等級。國內馬達開發廠商除大同與東元外，僅少數中小企業廠商同樣具備 IE3 等級的開發能量，為配合經濟部推廣的「高效率馬達示範推廣補助計畫」，協助國內廠商建立自上、中、下游各端技術能量，針對馬達關鍵零組件導入創新材料的設計能量，開發創新材料馬達製造技術，並結合高效驅動器技術與能效參數化驗測研究，提升馬達能源使用效率與用電品質，協助國內業者生產符合 IE3 高效率馬達與設備[1]。

同步磁阻馬達是一種同步機[2, 3]，比感應馬達有較高的能源轉換效率，但其轉子不像一般同步機需要在轉子繞線或裝置永久磁鐵以產生激磁，它的轉子材料是如矽鋼片的高導磁材料，藉由轉子凸極現象產生磁阻的不均勻，反應在定子電感的不同來產生力矩而轉動；它也不像永磁同步馬達的轉子磁鐵經年累月運轉後會產生磁性減弱的問題。其構造簡單，具有堅固的特性，近年來吸引工業界注目，例如可應用在電動車、軌道車與電動船等。精確的馬達模型及控制器設計使其性能優化是非常重要的。

關於同步磁阻馬達相變數模型的建構[4]以及其向量控制器設計[1, 5-11]，本雜誌第 392 期也已有報導[12]，該文描述一個同步磁阻馬達之相變數

模型之建構，以電磁、機電與機械三部份來推導馬達的數學方程式，並利用 PSIM 模擬軟體工具建立其相變數模型，仿如一實際的馬達操作，模型的三相輸入端是電阻、電感與相依電壓源的電路元件，可以和馬達變頻驅動電路連接，以便做馬達驅動控制的整合模擬；且負載轉矩輸入端是以數學函數元件建立的，可用數學函數的形式加入負載轉矩。除此，該文亦推導同步磁阻馬達在同步旋轉座標系之 $d-q$ 模型，以轉子的角度做為 $d-q$ 軸同步旋轉座標的角度，並將轉子角度定在 d 軸，設計其向量控制器，可得到抵抗負載轉矩瞬間變化的轉速響應。

然而，前述設計並沒有說明如何給予 d 軸電流參考命令值，只任意給予一個常數值，並非是最佳化的設計，本文提出該向量控制器的延伸，得出 d 軸電流參考命令與 q 軸電流參考命令的關係，如此可得到最佳化的設計，提高效率。並以 PSIM 模擬軟體模擬驗證。

同步磁阻馬達之 $d-q$ 模型

一個同步磁阻馬達在同步旋轉座標之電壓方程式、反電動勢、馬達產生的轉矩方程式與運動方程式分別為(1)~(4)式，其中、 v_{ds} 、 v_{qs} 分別為定子電壓在 $d-q$ 軸的分量； R_s 為定子電阻； i_{ds} 、 i_{qs} 分別為定子電流在 $d-q$ 軸的分量； e_{ds} 、 e_{qs} 分別為反電動勢在 $d-q$ 軸的分量； P 為馬達的極數； ω_e 為馬達電氣轉速； ω_m 為馬達機械轉速； L_d 、 L_q 分別為定子之 $d-q$ 軸的電感； J 為馬達轉動慣量； B 為馬達與負載之總等效黏性摩擦係數； T_L 為負載轉矩； T_e 為馬達產生的轉矩。依此四個方程式畫出 $d-q$ 模型轉移函數方塊圖如圖 1，可看出定子電流在 d 軸與 q 軸有互相耦合之關係存在。比較此模型和永磁同步馬達 $d-q$ 模型的區別，可知同步磁阻馬達 $d-q$ 模型沒有

更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】415 期・106 年 10 月號

每期 220 元・一年 12 期 2200 元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

訂書專線：03-591-9342

傳真訂購：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