



軸向磁通永磁馬達 之模型建構 與向量控制設計

Modeling and Vector Control Design
of an Axial-Flux Permanent Magnet Motor

蔡明發

明新科技大學
電機工程系
助理教授

李迪章

明新科技大學
電機工程系
教授

曾仲熙

明新科技大學
電機工程系
教授兼系主任

陳譽元

工研院機械所
先進機械技術組
先進馬達技術部

林正軒

工研院機械所
先進機械技術組
先進馬達技術部

彭文陽

工研院機械所
先進機械技術組
先進馬達技術部
經理

關鍵詞(Keywords)

- 軸向磁通永磁馬達
Axial-Flux Permanent Magnet Motor (AFPM)
- 模型建構 Modeling
- 向量控制 Vector Control

摘要(Abstract)

近幾年來，軸向磁通永磁馬達(Axial-Flux Permanent Magnet Motor, AFPM)因具有高效率、緊密結構與高轉矩密度等特性，吸引著工業界的注目，並已廣泛應用在電動車與飛輪儲能等系統上。在這些應用中，需要馬達平穩的運轉，以避免震動與噪音干擾，因此，精確的馬達模型與其

控制器設計，使其性能優化是非常重要的。本文建立一個軸向磁通永磁馬達之模型並設計其向量控制器，首先推導此軸向磁通永磁馬達在三相靜止座標之數學模型，其中電磁轉矩方程式具有頓轉矩漣波，再利用 PSIM 模擬軟體所具備的電路元件、數學運算與轉移函數等功能來建構與驗證此模型，此模型具有三相電壓輸入端與負載轉矩輸入端，可以很方便直接地將此模型方塊連接到整體馬達驅動器的 PWM 變頻器；並做負載轉矩與馬達參數不準度和變化等整體馬達驅動器性能的評估與模擬，轉矩響應模擬結果並與利用 ANSYS Maxwell 有限元素分析法之結果做比較，以驗證其正確性。之後，進一步推導在同步旋轉座標之 d-q 軸模型，依此軸模型設計以轉子磁場為導向的向量控制器，包含 PI 解耦電流控制器與二自由度轉速控制器，模擬結果顯示所設計的控



制器對轉速命令與負載轉矩的瞬間加入皆有理想的轉速響應，並且馬達轉動慣量參數在 $\pm 60\%$ 的不準度時，仍有穩定的轉速響應，但在低轉速時可看出轉速響應上有明顯的漣波，是頓轉矩所造成，有待進一步設計更高階的控制器來消除此頓轉矩漣波效應。

In recent years, Axial-Flux Permanent Magnet Motor (AFPM) motors have received increased attention due to their high efficiency, compact construction, and high torque density. They have been utilized in a wide range of applications such as electrical vehicles and flywheel energy storage systems. Most of these applications require smooth motor running in order to avoid vibration and acoustic noise. Thus, an accurate model for controller design to optimize the performance of the AFPM motors is very important. This paper presents the modeling and vector control design of an axial-flux permanent magnet (AFPM) motor. Firstly, the mathematic model of the AFPM motor in the three-phase stationary frame is derived, in which the electro-magnetic torque of the motor has cogging torque ripple. The model block was constructed and verified in PSIM which contains circuit components, mathematic operation components, and transfer function blocks. The constructed model has three-phase voltage and load torque input ports which facilitate the coupling of the model to the PWM inverter and the load torque input for integrated performance evaluation and simulation of the motor drives. The model has also been verified

by comparing the torque response with the simulation result using ANSYS Maxwell finite element analysis. In addition, the model of the motor in the d-q synchronously rotating frame is derived, based on which the rotor-flux oriented vector controller is then designed. This controller contains PI-decoupling current controllers and a two-degree-of-freedom speed controller. Simulation results show that the proposed controller provides good speed response to the speed reference, sudden change of the load torque, and still provides good response at $\pm 60\%$ moment inertia uncertainty, respectively. However, at low speeds, ripples are apparent in the response due to the cogging torque. The authors are encouraged to design more advanced controllers to reduce the cogging torque ripple effect in the near future.

1. 前言

近幾年來，軸向磁通永磁馬達(Axial-Flux Permanent Magnet Motor, AFPM)因具有高效率、緊密結構與高轉矩密度等特性，吸引著工業界的注目，並已廣泛應用在電動車與飛輪儲能等系統上[1,2]。在這些應用中，需要馬達平穩的運轉，以避免震動與噪音干擾，這些干擾往往是馬達轉動時其轉子與定子間的磁力吸引所產生的週期性頓轉矩漣波所造成的[3]。因此，精確的馬達模型與其控制器設計，使其性能優化是非常重要的。

在文獻上有許多關於永磁馬達建模的報導

更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】367期・102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