

海爾貝克排列應用於軸向永磁發電機模擬探討分析

陳宥任

南臺科技大學機械工程系

uzchen0809@stust.edu.tw

摘要

當前再生能源技術快速發展之背景下，發電機作為能源轉換系統中最核心關鍵組件之一，其性能直接影響整體發電效率。隨著直驅技術與低轉高扭市場需求之增加趨勢，軸向無鐵芯永磁發電機憑藉高效能、低製造成本及輕量化設計逐漸受到業界重視。本文目標研發一款額定功率為一千瓦軸向無鐵芯海爾貝克永磁發電機，並利用海爾貝克排列方式，透過分析軟體對轉子與定子間之磁場分佈進行模擬，計算磁通密度及均勻分佈磁場，進一步提升發電效率與輸出穩定性。此外，無鐵芯結構設計有效消除了傳統鐵芯所引致之磁滯損失與渦流損失，從而顯著降低整機重量及提高運行效率。軟體模擬結果顯示，通過調整轉子磁場方向排列方式，能夠顯著減少磁場波動，同時結合極數、背鐵結構、繞組線圈數及線徑等重要設計參數，提升發電機整體效能。與傳統軸流式永磁發電機相比，本文所開發之海爾貝克發電機於發電量上可提升超過 10%，且運行效率穩定維持在 90% 以上。綜上所述，本研究透過海爾貝克排列應用於軸向無鐵芯永磁發電機之設計，可為低轉高扭之再生能源環境系統下，提供高效能之發電操作範圍。

關鍵詞：海爾貝克排列、無鐵芯、低轉高扭、軸流永磁發電機、再生能源

Simulation Analysis and Investigation of Halbach Array Application in Axial Flux Permanent Magnet Generators

Yu Jen Chen

Department of Mechanic Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

In the current era of rapid development in renewable energy technology, generators serve as one of the most critical components in energy conversion systems, with their performance directly impacting overall generation efficiency. With the increasing demand for direct-drive technology and low-speed/high-torque markets, axial flux, ironless permanent magnet generators are gaining significant attention in the industry due to their high performance, low manufacturing costs, and lightweight design. This study aims to develop a one-kilowatt rated axial flux ironless permanent magnet generator by employing the Halbach arrangement. Simulation software is employed to analyze the magnetic field distribution between the rotor and stator, calculate the magnetic flux density, and ensure a uniform field distribution, enhancing both generation efficiency and output stability. Moreover, the ironless structure effectively eliminates the hysteresis and eddy current losses associated with traditional iron cores, significantly reducing the overall weight and improving operational efficiency. Simulation results indicate that adjusting the rotor's magnetic field directional arrangement can significantly reduce magnetic field fluctuations. In addition, integrating key design parameters—including the number of poles, back iron structure, winding coil count, and wire diameter—further enhances the overall performance of the generator. Compared with conventional axial flux permanent magnet generators, the Halbach generator developed in this study achieves over a 10% increase in power output while maintaining an operational efficiency above 90%. In

Received: Mar. 10, 2025; first revised: Apr. 6, 2025; accepted: Apr. 2025.

Corresponding author: Y. J. Chen, Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan 710301, Taiwan

summary, the application of the Halbach arrangement in the design of axial flux ironless permanent magnet generators provides a highly efficient power generation solution for low-speed/high-torque renewable energy systems.

Keywords: Halbach array, Coreless, Low-speed high-torque, Generator, Renewable energy

壹、前言

一、現有技術與理論

(一) 軸向永磁發電機設計分析與性能探討

由於全球再生能源發電技術（尤其是風能與水力）之迅速發展，對於輕量化且高效能發電機需求正不斷攀升，於此背景下，無鐵芯軸向永磁發電機於此類應用領域中引起了極大關注。根據發電機磁通方向路徑之不同，可將永磁發電機分為兩種類型：徑向永磁發電機（radial flux permanent magnetic, RFPM）和軸向永磁發電機（axial flux permanent magnetic, AFPM）。當系統需求強調高扭矩與高效率時，AFPM 發電機通常已被視為首選。根據相關文獻比較，對於固定極數之 AFPM 與 RFPM 發電機而言，AFPM 於扭矩密度上具有顯著優勢；此外，AFPM 發電機軸向長度較短，使其整體結構更為緊湊，並且更容易實現無鐵芯設計，這些特性及性能，使得 AFPM 發電機於高扭矩與高效率應用中展現出極高之競爭力 [1]。在軸向磁通永磁（AFPM）發電機技術發展中，無鐵芯結構 AFPM 發電機因其卓越的性能表現逐漸受到研究關注。相較於傳統 AFPM 發電機，無鐵芯 AFPM 發電機在多方面展現出顯著優勢，包括更高的功率密度與扭矩密度、更低的齒槽轉矩、轉子與定子間吸引力的最佳化配置，以及更具彈性的線圈設計，避免傳統定子槽齒結構所帶來之限制 [2], [3]。無鐵芯 AFPM 發電機核心關鍵在於其定子取消鐵芯之設計，而轉子仍採用背鐵之結構，以維持磁場導向與轉矩輸出 [4]，藉由取消定子鐵芯，其設計消除了包括原先定子復膜鐵（laminated steel）在內的所有鐵芯材料，從而避免因渦電流引起磁滯損失，大幅降低齒槽轉矩，使無鐵芯 AFPM 發電機能夠比傳統 AFPM 發電機以更高效率運行 [5]，然而，由於缺少鐵芯，無鐵芯 AFPM 發電機的氣隙磁通密度相對較低，影響其輸出功率與動態特性，因此如何透過優化磁場分佈來提升磁通密度，將成為研究關鍵課題之一，近年來，研究者提出多種針對無鐵芯 AFPM 發電機建模與分析方法，以精確評估其電磁行為並進行性能優化。例如，文獻 [6] 提出三維有限元素分析（3D-FEA）模型計算方法，能夠快速且準確地計算無鐵芯定子繞組渦流損耗，並針對直流電流損耗與利茲線渦流損耗進行綜合權衡，以最佳化發電機整體運行效率。此外，文獻 [7]，研究一種創新無鐵芯 AFPM 發電機結構，該設計透過將磁鐵嵌入轉子芯中，有效縮短軸向磁通長度，從而提高氣隙磁通密度與功率密度，使發電機在較小結構尺寸下，仍能保持較佳之能量轉換效率。基於上述研究成果，無鐵芯 AFPM 發電機於高功率密度、高扭矩密度應用領域展現極具潛力發展方向。然而，由於其磁場分佈特性與傳統 AFPM 發電機存在顯著差異，進一步研究仍需關注磁通密度最佳化、繞組結構設計、散熱管理及材料選擇等方面，以提升無鐵芯 AFPM 發電機在實際應用中，整體效能、可靠性及耐久性。

無鐵芯發電機之結構，因其輕量化特性，可顯著降低整體機構重量，使其在便攜式應用中展現出極大之優勢[2]，例如文獻中所提到採用直接搜尋法 [8]（direct search methods）對小型便攜式 AFPM 發電機進行設計最佳化，優化後結果顯示發電機重量減輕了 11.1%，同時效率從 86.1% 提升至 88.4%，證明了無鐵芯設計，於提升能效與減輕機械負擔方面之可行性，有其優勢。此外，無鐵芯 AFPM 發電機在高功率與高扭矩密度應用中逐漸受到重視，特別是在直驅式（direct-drive）之系統，無鐵芯設計使其具備更寬廣運行操作範圍，使其適用於飛輪儲能系統、風力機及水力發電、電動汽車及航空領域等多種應用 [9], [10]。其中，於風力發電之領域中，隨著風力發電機趨向小型化並適應城市環境佈局 [11]，無鐵芯 AFPM 發電機因具備其較低啟動轉矩之特性，特別適用於無頓轉扭力之都市低風速環境中 [12]，進一步促使無鐵芯設計成為小型風力發電機之理想選擇 [13]，依據文獻提出了一種可應用於小型風力發電機之無鐵芯 AFPM 發電機新型設計，其採用三層繞組結構 [12]，並配置 Y 形定子與三相三層扁平繞組線圈組。透過

多層繞組設計，使其具備更大線圈佔槽比，提高了電磁耦合效率，其設計之發電量比傳統 AFPM 發電機提升了 26.5%，顯示出無鐵芯技術之應用，於低風速應用顯著優勢，實現較高發電效能，為未來小型風力發電技術發展提供新研究方向。整體而言，無鐵芯 AFPM 發電機之輕量化設計、高效率與低啟動轉矩特性，使其在便攜式發電與低風速直驅風力發電轉換系統中，展現極大應用潛力，未來優化可進一步探討其繞組拓撲結構、氣隙磁通最佳化及材料選擇，以提升再生能源系統實際應用價值。

（二）海爾貝克模擬與物理場模擬分析之應用

無鐵芯軸向永磁發電機 (AFPM) 雖具備輕量化、高效率與低齒槽轉矩等優勢，但相較於傳統有鐵芯結構，其氣隙磁通密度 (air gap flux density) 與功率密度通常較低，因此如何提高氣隙磁通密度並降低繞組損耗已成為無鐵芯 AFPM 發電機核心研究議題 [6]，此外，永磁發電機幾何結構對氣隙磁場分佈與高階空間諧波 (high space harmonics) 含量具有直接影響，因此 AFPM 發電機輸出電壓品質與電動勢波形均受其幾何設計及磁鐵排列方式之影響 [14]，轉子磁鐵排列方式可大致分為兩類：(1) 傳統排列，即將磁鐵沿徑向或切向方向以南北極交替排列；(2) Halbach 排列，透過徑向與切向磁場之組合來強化陣列單側磁場，同時削弱另一側之磁通，使得氣隙磁通密度顯著提升。相較於傳統排列方式，Halbach 陣列不僅能夠有效提高氣隙磁通密度，還能改善磁場分佈之正弦性，從而優化發電機輸出性能 [2]。M. Vatani 提出一種適用於直驅式海上風力發電機之雙面 Halbach 陣列轉子無鐵芯 AFPM 發電機 [15]，並利用二維與三維有限元素法 (2D/3D finite element method, FEM) 進行模擬分析，以探討 Halbach 陣列於不同轉子極數與磁鐵間隔條件下對氣隙磁通密度與輸出功率之影響。研究結果顯示，與傳統僅在轉子表面安裝磁鐵之設計相比，採用 Halbach 陣列可顯著提升氣隙磁通密度，並減少對背鐵之需求，進一步降低發電機總體重量與磁滯損耗。J. Zhu 設計了一款 MW 級半直驅 AFPM 發電機 [16]，利用 Halbach 陣列降低電壓波形的總諧波失真 (total harmonic distortion, THD)。該研究通過 NSGA-II 遺傳演算法優化發電機設計參數，並利用有限元素法進行驗證，結果顯示，該設計可使 THD 從 2.27% 顯著降低至 0.46%，有效提升輸出電壓品質並減少高次諧波干擾。在其他應用領域，K. Liu 研究 Halbach 陣列與轉子背鐵結構結合外轉子無鐵芯無刷直流發電機 (BLDC) [17]，並分析氣隙磁場分佈與磁鐵陣列之相互影響。該設計不僅提高氣隙磁通密度，還成功提升飛輪儲能系統慣性特性，使其在高效能儲能裝置中展現潛力。另一方面，Z. Yuxiang 探討 Halbach 陣列在波浪能轉換器 (wave energy converter, WEC) 之應用 [18]，研究團隊建立 WEC 等效磁路模型，並利用 COMSOL Multiphysics 軟體對靜磁場進行建模與結構參數最佳化。模擬結果顯示，Halbach 磁鐵陣列結構能夠顯著增強 WEC 波浪能收集能力，提高能量轉換效率，進一步證明 Halbach 排列技術在不同再生能源領域的廣泛適用性。綜合而言，無鐵芯 AFPM 發電機雖然面臨氣隙磁通密度較低與諧波影響較大，但透過 Halbach 排列之設計應用，可顯著改善磁場分佈，提升氣隙磁通密度，並減少諧波影響，進而提升發電機效率與輸出功率。未來研究可進一步探索 Halbach 排列最佳化設計，並針對不同應用場景進行磁場強化與結構優化，以提升無鐵芯 AFPM 發電機在風能、海洋能與儲能系統之廣泛應用。

二、軸流式永磁發電機技術挑戰與未來發展趨勢

對於無鐵芯 AFPM 發電機來說，最關鍵之部分為無鐵芯之定子製造，儘管定子因無鐵芯而消除鐵芯損耗，然另一方面，無鐵芯定子之線圈直接暴露於時變磁場，導致定子會產生渦流損耗，從而降低發電機之效率，目前有文獻指出可採用由利茲線製成之線圈繞組來減少循環電流以抑制渦流效應 [19]。另一方面，氣隙長度亦為無鐵芯 AFPM 發電機之重要參數，由於無鐵芯定子其有效氣隙長度較大，需要更多永磁材料來維持氣隙中之磁場，導致無鐵芯 AFPM 發電機成本提高 [20]，因此，無鐵芯 AFPM 發電機之經濟優化設計成為重要研究主題，最後如前所述，無鐵芯之發電機通常會面臨氣隙磁通較低之問題，進而影響扭矩產生，為彌補此弱點，需要更大體積之永磁材料以產生足夠氣隙磁通量，抑或是通過提高發電機之電流密度與轉速，提高無鐵芯 AFPM 發電機之扭矩密度，然而此方案可能導致銅損增加並降低電力之耐久性，同時，為了應對高負載，需要使用高強度之轉子結構，進一步增加整體製造成本 [21]，

為此可通過 Halbach 陣列將磁通量集中於氣隙之中 [22]，同時改善定子磁鏈問題 [23]。除此之外，為了獲取更高地扭矩與功率，AFPM 發電機可以串聯形式存在，如多定子多轉子（multi-stator multi-rotor，MSMR）配置，多定子多轉子配置被認為不僅效率高，同時可以與不增加發電機直徑之情況下產生高機械強度與高功率密度 [24]，其磁通路徑與單級結構相同，尤其為串聯式無鐵芯 AFPM 發電機於需要高功率/扭矩密度之應用中越來越受歡迎 [2]，目前越來越多船舶推進、飛機推進、泵浦、風力發電、低速和高速永磁發電機傾向採取多定子多轉子之 AFPM 發電機之應用 [25]。除此之外，單定子雙轉子（single stator double rotor，SSDR）由單一定子和兩個轉子組成，其結構非常適合整合於 Halbach 陣列 [3]，展現更少之齒槽轉矩與更低之轉矩脈動之特性，該特性使其適合應用於電動車，有助於提升電動車能量轉換，SSDR 亦適合應用於包括小型風力發電、微型水力發電、太陽能汽車等再生能源，對於未來發展再生能源以及儲能系統，提供相當多元且深具潛力。

貳、發電機設計與模擬分析方法

一、發電機規格與內部機構設計

無鐵芯軸向磁通永磁發電機（AFPM）因其獨特結構設計，展現出諸多技術優勢，包括高功率密度與高扭矩密度、低齒槽轉矩，以及定子無槽無鐵芯設計所帶來靈活線圈之排列與高效能運行[2,3]。這些特性使其在直驅系統、低速高扭矩應用及再生能源轉換領域展現廣泛應用潛力，圖 1 為本文所設計之軸向磁通無鐵芯永磁發電機外觀組合圖，該設計以軸流式永磁發電機之架構，採用無槽無鐵芯定子結構，相較於傳統有鐵芯 AFPM 發電機，本設計大幅降低機構組裝難度，並顯著減輕發電機總體重量。此外，由於無槽設計完全消除定子槽齒效應，發電機頓轉扭矩（cogging torque）亦被有效抑制，使得啟動性能得到顯著提升，特別適用於低風速或變速運行的應用場合，如小型風力發電與便攜式發電裝置。為進一步優化氣隙磁場分佈並降低軸向吸引力，本文所設計選用雙氣隙雙轉子結構。該結構能夠均衡轉子與定子間之磁場作用力，有效降低發電機於運行過程中產生不穩定之軸向吸力，進一步提升運行穩定性。

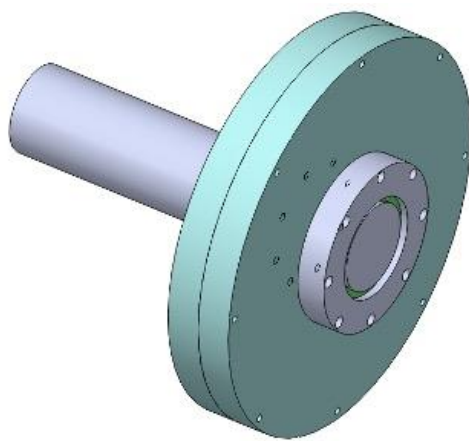


圖 1 本文 1000 瓦軸向磁通無鐵芯永磁發電機（外觀設計圖）

圖 2 為本文所研究開發之軸向磁通無鐵芯永磁發電機內部原型設計。該發電機轉子磁場方向為軸向，定子位於發電機中心，並由兩個轉子夾持。轉子由導磁背鐵與磁鐵組成，磁鐵採用梯形磁鐵，並以圓周方式均勻附著於磁軛上。磁軛主要功能是固定磁鐵並提供磁通傳導通路，以確保磁場穩定分佈與最小化磁通損耗。此外，雙轉子結構能夠有效增加氣隙磁通密度，進一步提升發電機功率輸出與效率，於定子設計方面，本文發電機採用無槽無鐵芯結構，即完全取消了傳統鐵芯材料，以減少磁滯損耗與渦電流損耗。線圈部分採用梯形繞線方式，透過特殊密封技術對繞組進行包覆，以提升碟盤結構機械應力強度與穩定性，其設計除提高發電機耐久度與抗機械應力能力外，也能有效改善散熱性能，降低繞組運行時之溫升，從而提高整體運行效率與壽命。

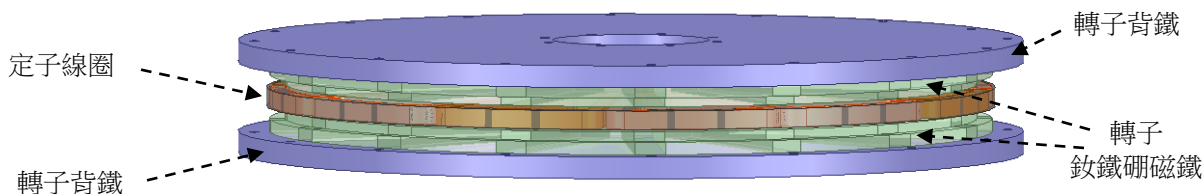


圖2 本文 AFPM 發電機內部結構設計

在軸向磁通永磁發電機設計中，運行時之噪音抑制與振動控制是影響發電機性能重要因素，本研究針對發電機運行時，所產生之電磁噪音與機械振動，採用三相繞組結構作為對策，這種拓撲結構不僅對於發電機運行穩定性至關重要，同時也降低噪音與提升系統可靠性方面發揮關鍵作用。三相繞組結構最大優勢，在於其能夠平衡磁場分佈，減少因磁場不平衡所引起之電磁力脈動，進而降低運轉過程中所產生之振動與噪音。此外，三相 AFPM 發電機透過適當配置磁鐵與繞組，可優化氣隙磁場，減少氣隙中磁阻變化，從而進一步降低噪音與機械震動。由於三相系統之相位相互抵消部分及磁場不均勻性，該結構特別適用於大功率應用，能夠確保穩定輸出特性並提升系統之整體運行效率。本研究目標開發一款額定功率為 1000 瓦無鐵芯 AFPM 發電機，三相繞組技術在此設計中扮演關鍵角色，透過合理相數設計，不僅能夠提升發電機輸出功率密度，還能顯著降低運行時之電磁噪音，使其更適用於戶外高穩定性要求之應用場景，如低風速風力發電機、小水力發電系統及波浪發電。

本文研究採用無鐵芯 (coreless) 定子繞線技術，此設計不僅避免鐵芯結構所帶來之磁滯與渦流損耗，還進一步減少電磁振動與噪音。於無鐵芯結構中，線圈不會重疊，如圖 4 所示，此設計確保線圈間隙均勻分佈，有助於磁場均衡化，藉以提高發電機整體效能。此外，由於該設計完全免除帶磁材料 (如鐵芯)，使得氣隙磁通密度得以最大化，進一步增強發電機功率輸出與穩定性，進而提升轉換效率。為確保繞組設計與磁極配置可以有效發電，本研究針對不同線圈數與極數組合進行配置，如表 1 所示，表中列出各種可行之繞組與磁極組合，並標記可以配置之極數配組合，提供 AFPM 發電機設計參考，並於設計階段，考慮不同相數與極數比對氣隙磁場之影響，確保磁場分佈均勻，減少漏磁現象，確保效率提升。本文所研究開發之 AFPM 發電機，採用雙轉子-單定子 (double rotor-single stator, DRSS) 結構，並進一步優化轉子磁場配置，以確保磁通密度均勻分佈。發電機的線圈與轉子磁極配置詳見圖 5，該圖為發電機線圈爆炸視圖，以上下視角呈現發電機線組與外殼的組合方式。本文設計之轉子磁極幾何尺寸為外徑 $D1 = 220\text{mm}$ ，內徑 $D2 = 80\text{mm}$ ，轉子直徑平均數 = 150mm ，如圖 6 所示，其幾何尺寸選擇是基於 1kW 運行之轉速進行設計，以確保發電機於低速運行時之氣隙磁場分佈均勻，及達到額定功率，此外，轉子磁極採用梯形磁鐵 (trapezoidal magnet)，其形狀及排列方式能使磁場集中效應最大化，提升氣隙磁通密度，進而提高功率輸出與效率。

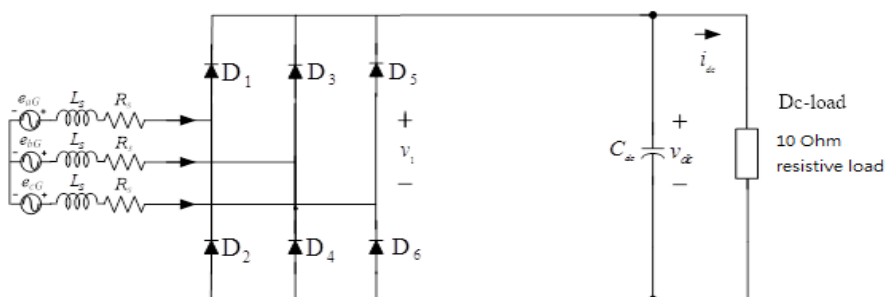


圖3 發電機三相電路圖

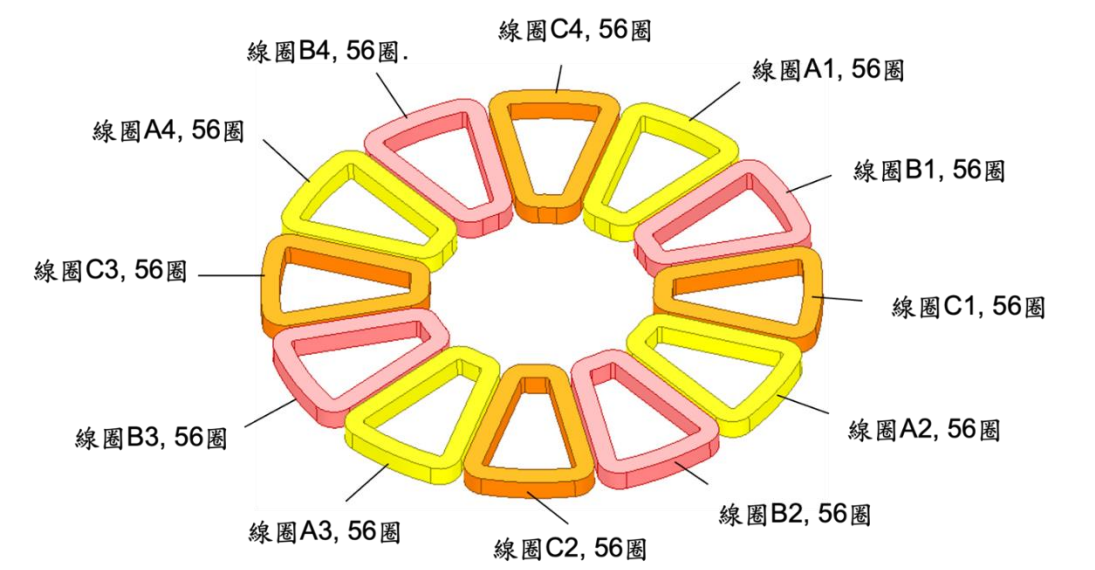


圖 4 線圈排列圖

表 1 發電機極數與線圈數組合

極數 圈數	12	16	20	24	28	32	36	40
9	V							
12		V						
15			V					
18				V				
21					V			
24						V		
27							V	
30								V

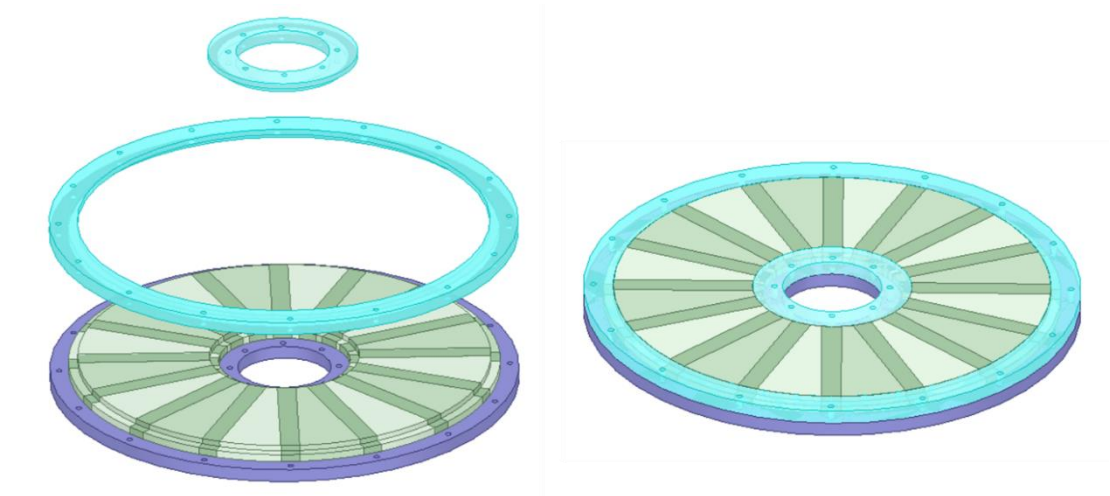


圖 5 轉子線圈爆炸圖 (合併)

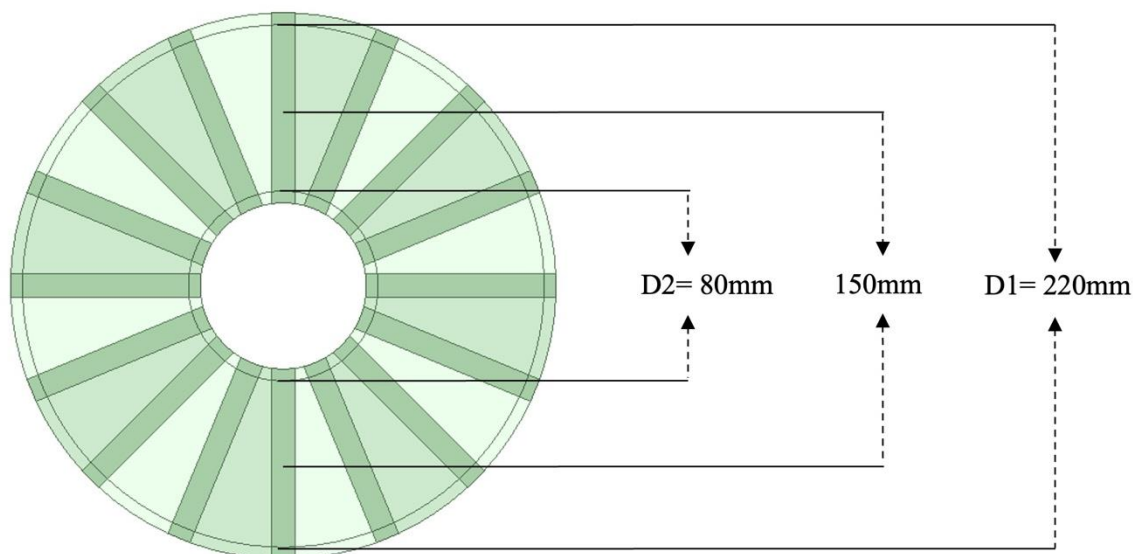


圖6 海爾貝克排列磁環的轉子尺寸

二、模擬軟體建模與分析計算

(一) 海爾貝克排列軸流式永磁發電機模擬

為了驗證所設計之海爾貝克排列軸向磁通永磁同步發電機 (Halbach array axial flux permanent magnet synchronous generator, AFPM) 的電磁性能與設計優化，本研究利用 Ansys Maxwell 3D 進行模擬建模與分析。該軟體提供了高精度的有限元素分析 (finite element analysis, FEA) 功能，能夠準確模擬發電機內部磁場行為，並評估不同幾何結構與材料特性對發電機整體性能的影響。透過此模擬工具，得以針對發電機磁通密度、磁場分佈、電磁力特性及損耗進行深入探討，於模擬軟體之環境中，建立完整三維發電機模組，並透過有限元素網格劃分技術，以確保模擬結果精度與收斂性。藉由該模擬模型，分析不同操作條件下氣隙磁通密度 (Air Gap Flux Density)，其分佈情形如圖7所示，通過詳細模型分析，能精確模擬各部件幾何和材料特性對總體性能之影響，於不同操作條件下磁場分佈，這將是優化發電機效率之關鍵。此外，磁路分析 (圖8) 有助於理解和改進磁力路徑，從而減少能量損耗，提高整體效能，其中轉子極數對氣隙磁通分佈之影響，以較高極數之設計，可提高單位體積內磁場變化率，但過高極數將可能導致磁飽和現象與渦流損耗增加，影響發電機效率，為進一步優化發電機的設計，探討磁場路徑的流動特性與能量損耗機制。磁路分析結果顯示海爾貝克陣列有效縮短磁通路徑，提升磁通在主工作區域的集中度，並減少背鐵磁場飽和的影響，使得發電機能夠在較高效能下運行，透過調整磁鐵與定子線圈的相對位置，本研究改善了磁場耦合效應，使得線圈在不同運行條件下皆能獲得穩定的磁通輸入，進一步提升輸出功率穩定性。

於永磁發電機運行過程中，齒槽扭矩 (cogging torque) 為噪音與振動主要來源之一，特別是在低速運行時，齒槽效應可能會顯著影響發電機動態性能與機械穩定性。齒槽扭矩之產生主要來自於轉子磁場與定子槽齒之相互作用，當轉子磁極經過定子時，磁場會發生週期性變化，導致轉子運行時產生週期性阻力與脈動扭矩，這種現象不僅會降低發電機運行平穩性，還可能導致額外機械振動與電磁噪聲。本研究透過模擬分析軟體進行齒槽扭矩分析，以評估不同設計條件下扭矩脈動特性。圖9為模擬之齒槽扭矩時序圖，該圖詳細展示發電機運行過程中齒槽扭矩的生成與分佈情形，透過有限元素法分析齒槽扭矩影響因素，並針對其降低策略進行優化設計。

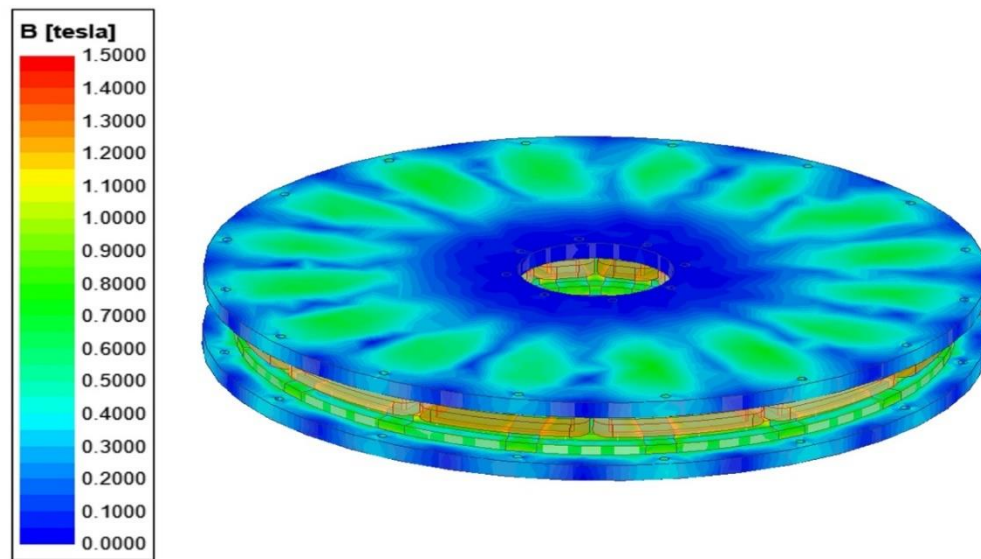


圖7 模擬軟體之磁通密度分析（海爾貝克排列）

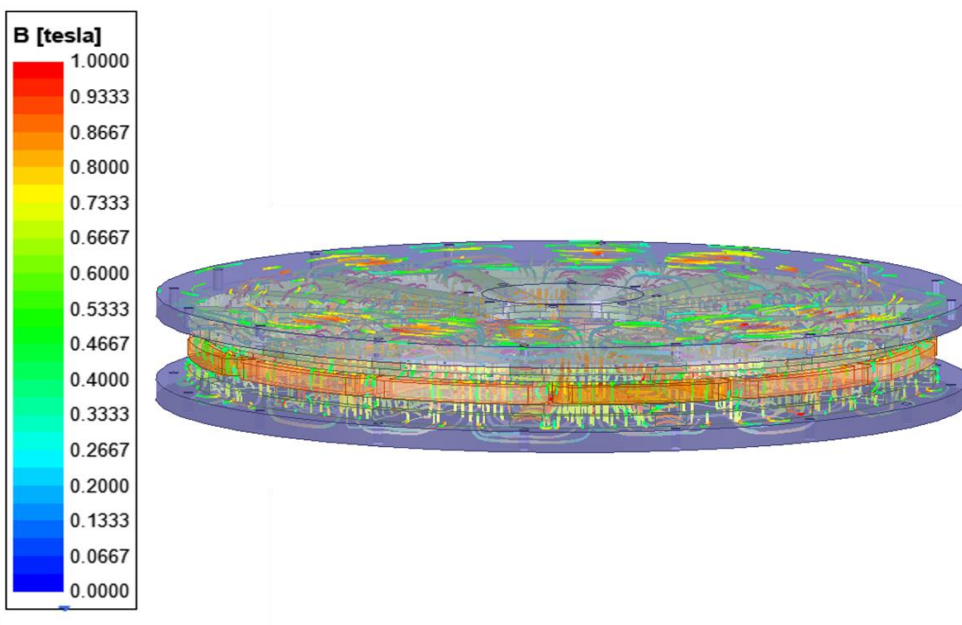


圖8 模擬軟體之磁路分析（海爾貝克排列）

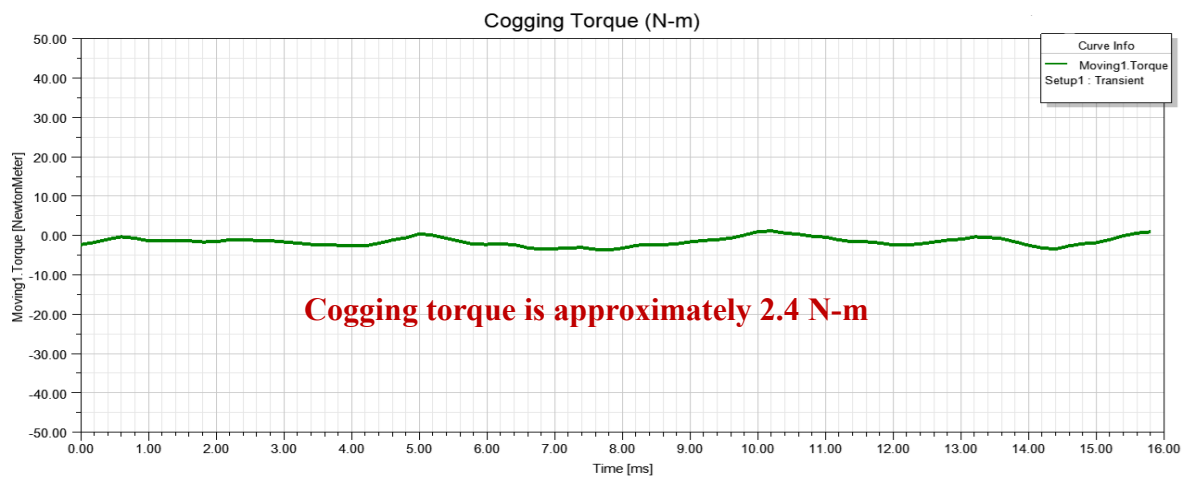


圖9 發電機齒槽扭矩表（海爾貝克排列）

（二）非海爾貝克排列軸流式永磁發電機模擬

為對比與海爾貝克排列軸流式永磁發電機模型發電量之差異，本文建構一個相同尺寸之軸流式永磁發電機模型（圖10）進行兩邊模擬對比分析。圖 11 為分析軟體模擬之磁通密度分析，圖 12 為本文研究之轉子磁路分析，其齒槽扭矩於圖13顯示。

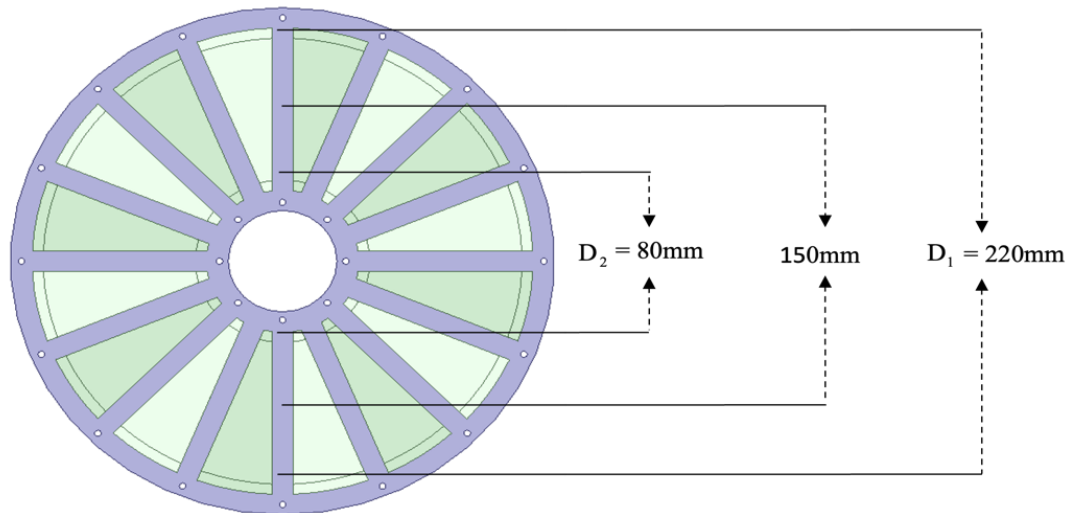


圖10 非海爾貝克排列磁環的轉子尺寸

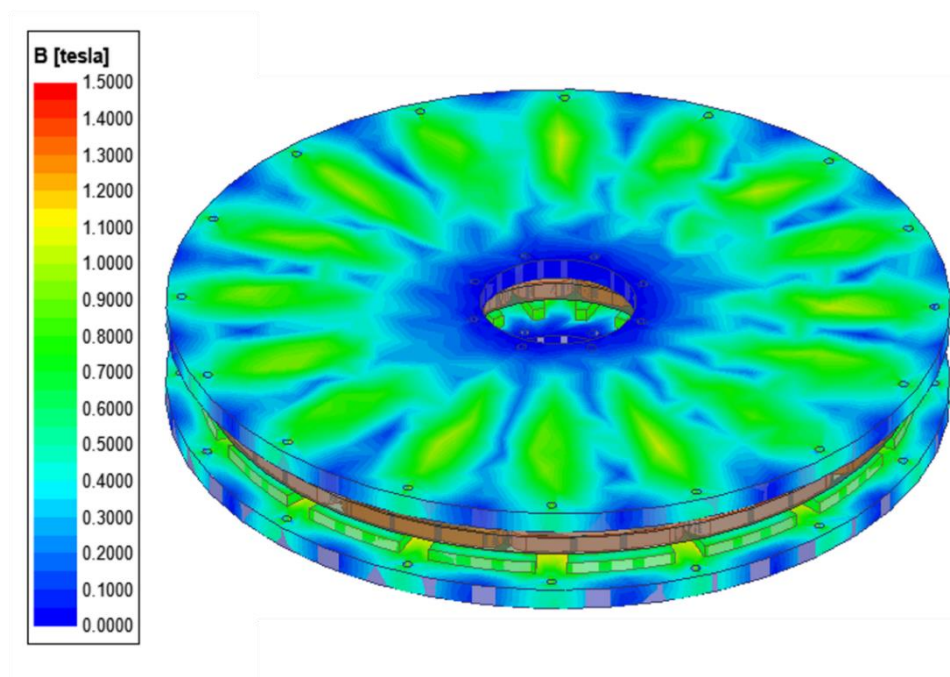


圖11 模擬軟體之磁通密度分析（非海爾貝克排列）

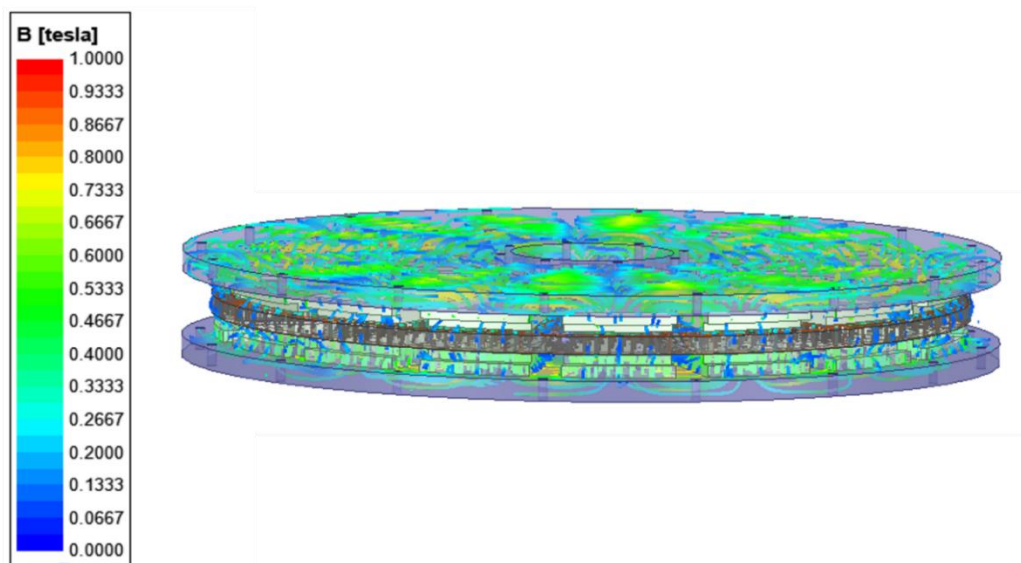


圖12 模擬軟體之磁路分析（非海爾貝克排列）

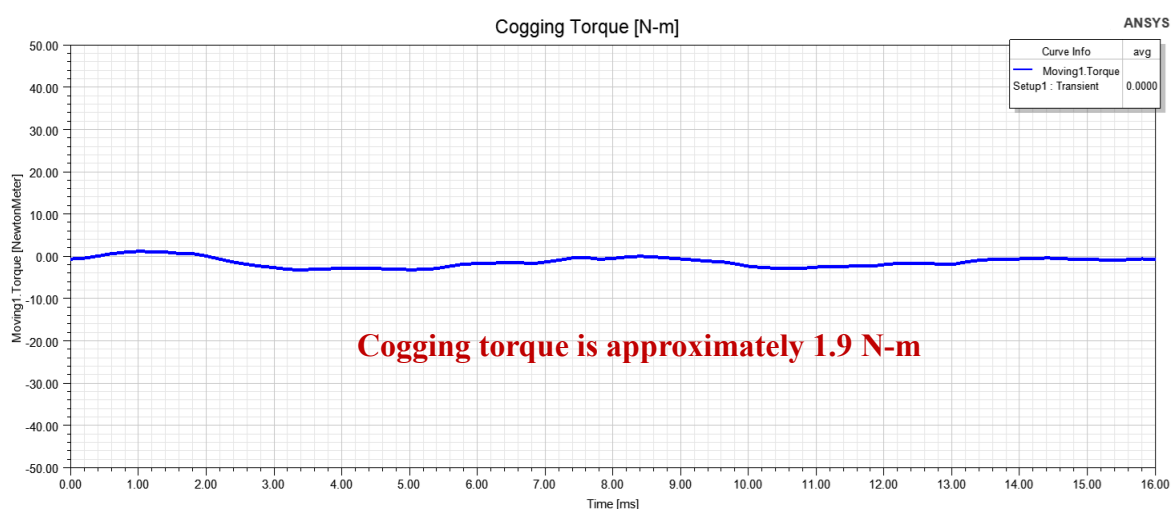


圖13 發電機齒槽扭矩表（非海爾貝克排列）

參、發電機模擬結果與分析

一、一般軸流式永磁發電機模擬結果

圖 14-16 所示，當轉速達 300 rpm 時，輸入扭力約 26.11 N-m，根據公式（1），計算出輸入功率約為 820 W，其輸出直流電壓約為 86.15 V，而直流電流約為 8.61 A。以公式（2）計算，得出輸出功率約為 741 W。透過公式（3），得出發電機的效率於 300 轉/分鐘時落在 90.43 %。以此方式，可計算並分析此發電機於不同轉速下之特性，如圖 17 及表 2 所示。

$$P_{in} = \frac{2\pi \cdot n_s}{60} \times T \text{ (W)} \quad (1)$$

$$P_{out} = V_{dc} \cdot I_{dc} \text{ (W)} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \text{ (%) } \quad (3)$$

T : 輸入扭力 (N-m); n_s : 轉速 (rpm); P_{in} : 輸入功率 (W); P_{out} : 輸出功率 (W); V_{dc} : 輸出直流電壓 (V); I_{dc} : 輸出直流電流 (A); η : 效率 (%)

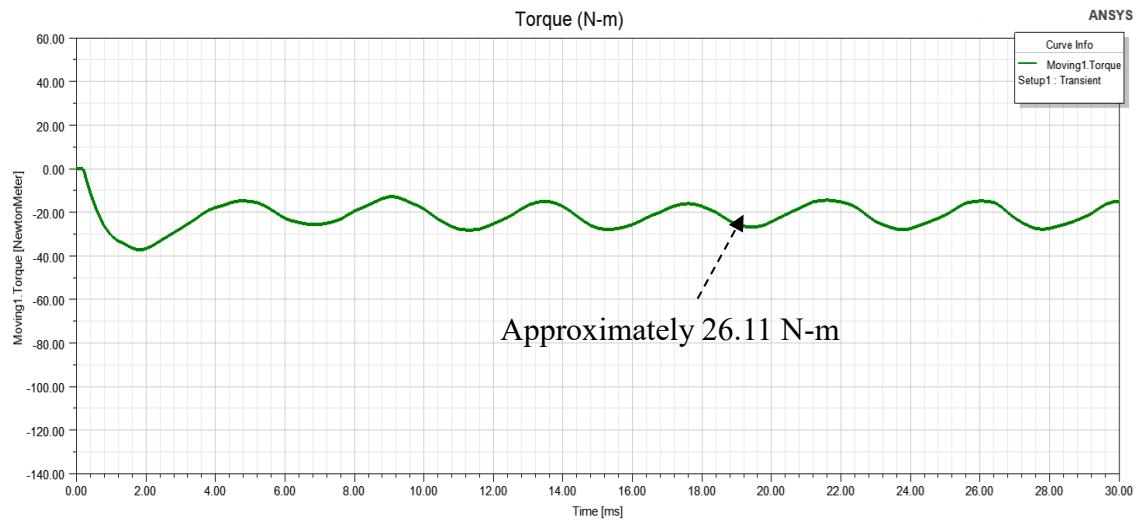


圖 14 扭力值分析 (非海爾貝克排列)

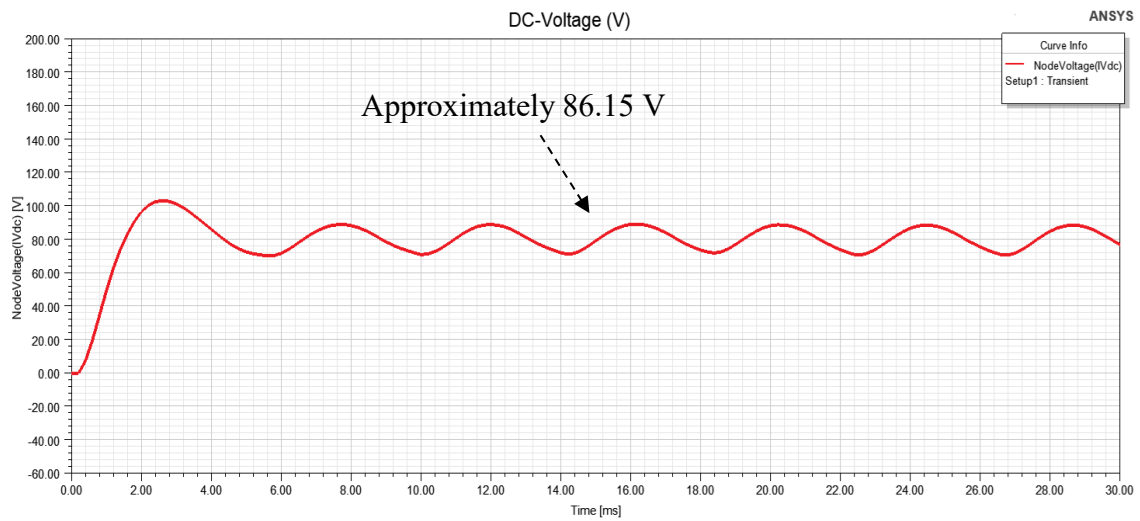


圖 15 整流後直流電壓 (V) 輸出 (非海爾貝克排列)

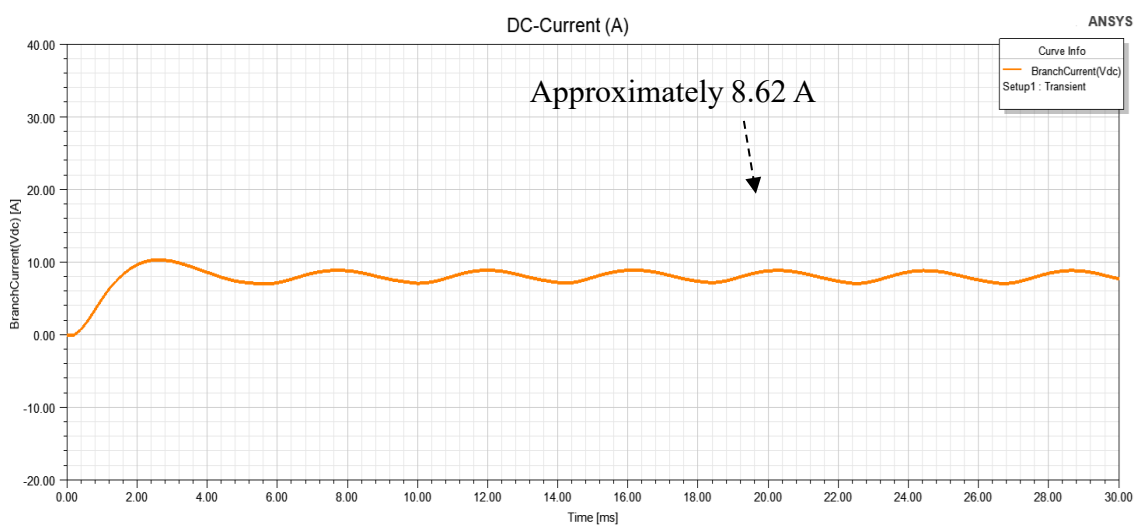


圖 16 整流後直流電流 (A) 輸出 (非海爾貝克排列)

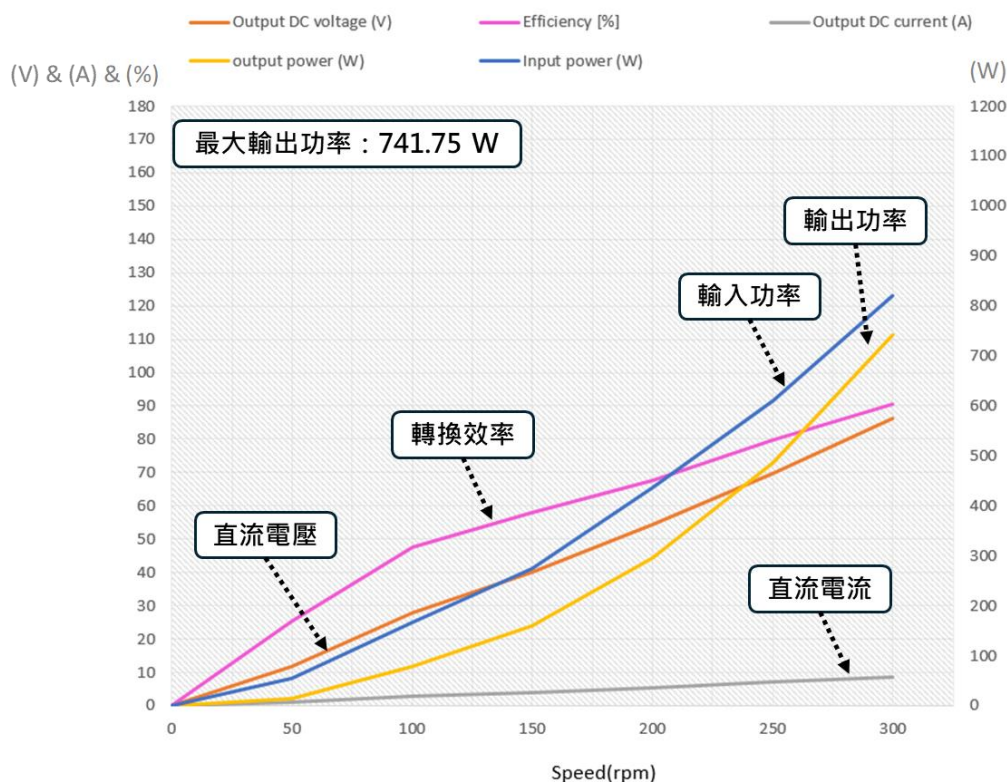


圖 17 AFPM 發電機之性能曲線（非海爾貝克排列）

表 2 非海爾貝克排列發電機之計算分析結果數據表

扭力 [N·m]	轉速 (rpm)	輸出電流 (V)	輸出電壓 (A)	輸入功率 (W)	輸出功率 (W)	效率 [%]
0	0	0	0	0	0	0.00
10.36	50	11.70	1.17	54.24	13.69	25.24
15.87	100	28.05	2.81	166.19	78.82	47.43
17.52	150	39.91	3.99	275.20	159.24	57.86
20.82	200	54.33	5.43	436.05	295.01	67.66
23.37	250	69.82	6.98	611.82	487.34	79.65
26.11	300	86.15	8.61	820.27	741.75	90.43

二、海爾貝克無鐵芯軸流式永磁發電機模擬結果

圖 18-20 所示，當轉速達 300 rpm 時，輸入扭力約 34.8 N·m，根據公式（1），計算出輸入功率約為 1095 W，其輸出直流電壓約為 100.9 V，而直流電流約為 10.09 A。以公式（2）計算，得出輸出功率約為 1018 W。透過公式（3），得出發電機的效率於 300 轉/分鐘時落在 92.9%。以此方式，我們可以計算並分析此發電機於不同轉速下之特性，如圖 21 及表 3 所示。

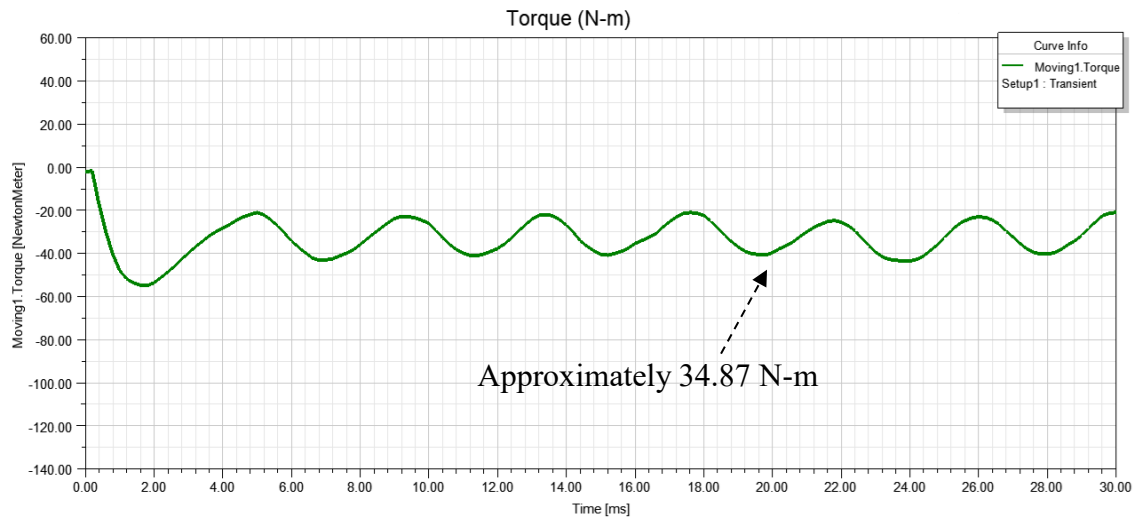


圖 18 扭力值分析（海爾貝克排列）

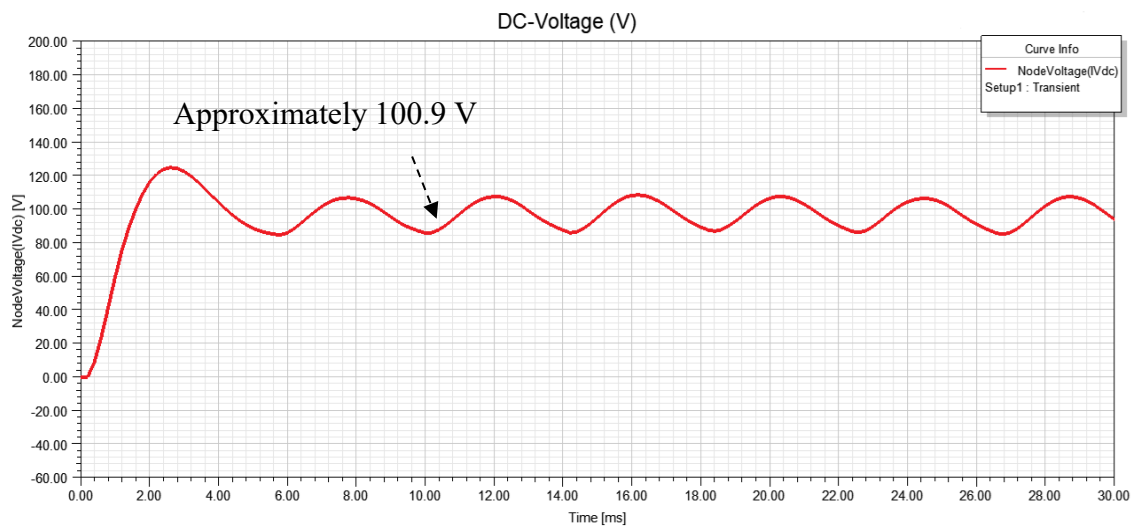


圖 19 整流後直流電壓（V）輸出（海爾貝克排列）

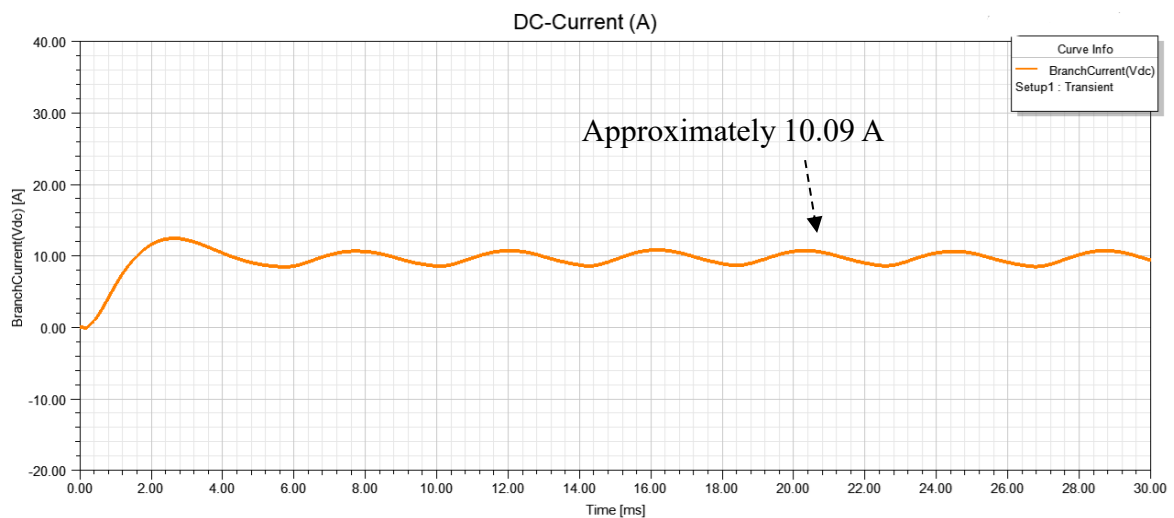
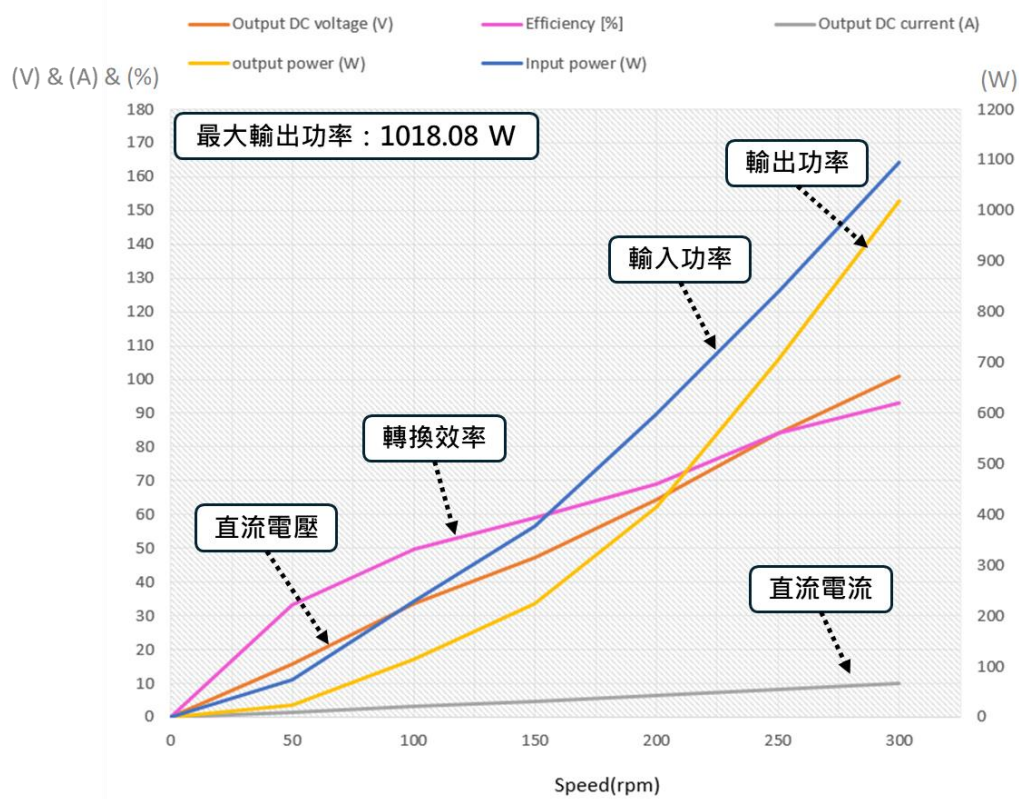


圖 20 整流後直流電流（A）輸出（海爾貝克排列）

表 3 海爾貝克排列發電機之計算分析結果數據表

扭力 [N·m]	轉速 (rpm)	輸出電流 (V)	輸出電壓 (A)	輸入功率 (W)	輸出功率 (W)	效率 [%]
0	0	0	0	0	0	0.00
14.23	50	15.75	1.57	74.51	24.73	33.19
21.80	100	33.68	3.37	228.29	113.50	49.72
24.06	150	47.27	4.72	377.93	223.11	59.04
28.60	200	64.37	6.43	599.00	413.90	69.10
32.10	250	83.98	8.40	840.38	705.43	83.94
34.87	300	100.90	10.09	1095.47	1018.08	92.94

圖 21 Halbach AFPM 發電機性能曲線（海爾貝克排列）



肆、結果與討論

從圖 17 之性能曲線圖可觀察，非海爾貝克排列發電機雖運轉於 300 轉/分鐘情況下，轉換效率可高達 90%，然本文研究模擬分析結果顯示，於不同運行條件下，採用海爾貝克排列之發電機系統，於扭力、電壓及電流等輸出項目，其數值皆有顯著提升，特別是在 300 rpm 之運行條件下，採用海爾貝克排列之功率能夠輸出達到 1018.08 W，相較於傳統磁鐵排列方式，轉換效率雖僅提高 2.5%，但於一樣幾何設計之下，其系統發電總功率提高超過 25%，海爾貝克陣列透過磁場強化與相消機制，可得知透過有效增強氣隙磁通密度，並減少漏磁現象，進一步提升系統電磁耦合效應，因此藉由磁場優化機制，可使得發電機系統於相同轉速（rpm）下能夠提供更高之扭矩輸出，進而提高整體系統之發電總量。此結果進一步驗證海爾貝克陣列能夠優化磁通路徑，降低磁阻效應，並提升磁場均勻性，從而有效提升發電機的能量轉換效率。

從模擬結果可觀察及得知轉子以海爾貝克排列方式進行設計及應用，對發電機整體性能之影響，主要通過以下幾個機制來提升效能

- (一) 提高氣隙磁通密度：海爾貝克排列透過將磁場集中於氣隙區域，同時削弱非工作區域磁場強度，使得轉子與定子間的磁通耦合更為高效，從而增強發電機的電磁感應能力。
- (二) 降低磁阻 (reluctance) 與能量損耗：傳統磁鐵排列方式會導致磁場分佈不均勻，使磁路中存在較高之磁阻，而海爾貝克排列則能夠有效降低磁阻，減少能量耗散，提高發電機之總電能輸出。
- (三) 提升輸出功率與穩定性：本研究之結果表明，於相同轉速下，採用海爾貝克陣列之發電機能夠提供更高輸出功率，並且電壓與電流之波形更加穩定，有助於減少輸出功率之脈動，提高發電機運轉時之可靠性。
- (四) 減少機械結構磨損與振動：由於海爾貝克排列能夠使磁場分佈更均勻，發電機於運行過程中之電磁力變化更為平滑，因此能夠顯著降低機械結構應力集中，減少轉子與定子之間軸向吸引力，從而降低機械磨耗與振動噪音，延長發電機使用壽命。

綜合本研究模擬與測試數據，顯示海爾貝克排列的軸向磁通永磁發電機在提高發電效率、降低能量損耗與提升穩定性方面具有顯著優勢。這使得此技術特別適用於高效能輸出需求之應用場景，例如：低風速風力發電機，可在較低轉速下維持高效率運行；直驅式發電系統，減少傳動機構，提高能量轉換效率；電動車輛與飛輪儲能系統，提供穩定的能量輸出並延長設備使用壽命。本研究初步成果，可為發電機之設計與優化提供工程參考，並為未來高效永磁發電機技術發展提供研究及應用方向。

參考文獻

- [1] A. Cavagnino, M. Lazzari, F. Profumo, and A. Tenconi, "A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 6, pp. 1517–1524, Dec 2002.
- [2] A. Habib, H. S. Che, N. Abd Rahim, M. Tousizadeh, and E. Sulaiman, "A fully coreless Multi-Stator Multi-Rotor (MSMR) AFPM generator with combination of conventional and Halbach magnet arrays," *Alex. Eng. J.*, vol. 59, no. 2, pp. 589–600, Apr 2020.
- [3] T. Alsuwian *et al.*, "Prototype development of a fully coreless multi-stage axial-flux permanent-magnet machine (AFPM) through the performance comparison between single-stator double-rotor (SSDR) and double-stator single-rotor (DSSR) configurations," *Alex. Eng. J.*, vol. 92, pp. 283–293, Apr 2024.
- [4] M. R. Minaz and M. Çelebi, "Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators," *Results Phys.*, vol. 7, pp. 183–188, Jan 2017.
- [5] S. Javadi and M. Mirsalim, "A coreless axial-flux permanent-magnet generator for automotive applications," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 12, pp. 4591–4598, Dec 2008.
- [6] W. Geng and Z. Zhang, "Analysis and Implementation of New Ironless Stator Axial-Flux Permanent Magnet Machine With Concentrated Nonoverlapping Windings," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, no. 3, pp. 1274–1284, Sep 2018.
- [7] M. Alamdar Yazdi, S. A. Saied, and S. M. Mirimani, "Design and construction of new axial-flux permanent magnet motor," *Electr. Power Appl.*, vol. 14, no. 12, pp. 2389–2394, Oct 2020.
- [8] H. Saneie, A. Daniar, and Z. Nasiri-Gheidari, "Design optimization of a low-speed small-scale modular axial flux permanent magnet synchronous generator for urban wind turbine application," (in en), *Sci. Iran.*, vol. 29, no. 6, pp. 3326–3337, 2022.
- [9] D.-W. Chung and Y. Yongmin, "Design and performance analysis of coreless axial-flux permanent-magnet

- generator for small wind turbines," *J. Magn.*, vol. 19, pp. 273–281, Sep 2014.
- [10] R. Huzlik and C. Ondrusek, "Design of axial coreless permanent magnet generator for small hydro power plant," in *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 1539–1544.
- [11] A. Kc, J. Whale, and T. Urmee, "Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review," *Renew. Energy*, vol. 131, pp. 268–283, Feb 2019.
- [12] W.-S. Yao, M.-T. Cheng, and J.-C. Yu, "Novel design of a coreless axial-flux permanent-magnet generator with three-layer winding coil for small wind turbines," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, no. 15, pp. 2924–2932, Nov 2020.
- [13] E. Spooner, P. Gordon, J. Bumby, and C. French, "Lightweight ironless-stator PM generators for direct-drive wind turbines," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 152, no. 1, pp. 17–26, Jan 2005.
- [14] J. F. Gieras, R.-J. Wang, and M. J. Kamper, "AFPM machines without stator cores," in *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2008, pp. 153–192.
- [15] M. Vatani, A. Mohammadi, D. Lewis, J. F. Eastham, and D. M. Ionel, "Coreless Axial Flux Halbach Array Permanent Magnet Generator Concept for Direct-Drive Wind Turbine," in *2023 12th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2023, pp. 612–617.
- [16] J. Zhu, H. Nan, X. Guo, P. Liu, S. Du, and M. Yang, "Design and Optimization of a New Half Direct-Driven MW-Scale Axial Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbine," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 18, no. 5, pp. 3671–3680, Sep 2023.
- [17] K. Liu, M. Yin, W. Hua, Z. Ma, M. Lin, and Y. Kong, "Design and Analysis of Halbach Ironless Flywheel BLDC Motor/Generators," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 11, pp. 1–5, Nov 2018.
- [18] Z. Yuxiang, C. Renwen, and L. Chuan, "Design of a wave energy converter based on Halbach magnetic array," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 64, pp. 1227–1236, Dec 2020.
- [19] M. G. Kesgin, P. Han, N. Taran, D. Lawhorn, D. Lewis, and D. M. Ionel, "Design Optimization of Coreless Axial-flux PM Machines with Litz Wire and PCB Stator Windings," in *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2020, pp. 22–26.
- [20] W. Wang *et al.*, "Sensitivity analysis and optimal design of a stator coreless axial flux permanent magnet synchronous generator," *Sustainability*, vol. 11, no. 5, p. 1414, Mar 2019.
- [21] C. Huang, B. Kou, X. Zhao, X. Niu, and L. Zhang, "Multi-Objective Optimization Design of a Stator Coreless Multidisc Axial Flux Permanent Magnet Motor," *Energies*, vol. 15, no. 13, p. 4810, 2022.
- [22] T. D. Batzel, A. M. Skraba, and R. D. Massi, "Design and test of an ironless axial flux permanent magnet machine using a halbach array," *Int. J. Eng.*, vol. 52, 2014.
- [23] S. Neethu, S. P. Nikam, S. Singh, S. Pal, A. K. Wankhede, and B. Fernandes, "High-speed coreless axial-flux permanent-magnet motor with printed circuit board winding," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 2, pp. 1954–1962, Sep 2018.
- [24] S. Kahourzade, A. Mahmoudi, H. W. Ping, and M. N. Uddin, "A comprehensive review of axial-flux permanent-magnet machines," *Can. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 37, no. 1, pp. 19–33, 2014.
- [25] F. Caricchi, F. Crescimbeni, and E. Santini, "Basic principle and design criteria of axial-flux PM machines having counter-rotating rotors," in *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1994, vol. 2, pp. 247–253: IEEE.