

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

永磁式發電機磁通量及散熱效率改進之研究

Permanent Magnet generator magnetic flux and Heat
Transfer research of the efficiency improvement

研 究 生：楊耀民

指導教授：金大仁 教授

中華民國九十九年八月

永磁式發電機磁通量及散熱效率改進之研究

**Permanent Magnet generator magnetic flux and Heat
Transfer research of the efficiency improvement**

研 究 生： 楊耀民

Student： Yao-min Yang

指導教授：金大仁 博士

Advisor： Tai-Yan Kam

國 立 交 通 大 學

機 械 工 程 學 系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

August 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年八月

永磁式發電機磁通量及散熱效率改進之研究

研究生:楊耀民

指導教授:金大仁 博士

國立交通大學機械工程學系

摘 要

本研究的目的是提高磁通量來增加永磁發電機的效率，並且改善發電機的傳熱性能以及降低了發電機的重量。在不改變永磁發電機的外部尺寸的情況下，透過設計發電機定子和轉子的結構，使磁通量將增加、工作溫度降低以及重量減輕。使用有限元方法執行上述分析和發電效率計算，以靜態和瞬態方法來研究其性能。透過瞬態分析證明改變矽鋼片幾何形狀可以增加磁通密度。透過挖孔的方式，除了增加散熱外表面積還可提升散熱速度。空心轉子與支撐肋條的設計可以減輕發電機重量，而且不會影響磁通量。

Magnetic flux and Heat Transfer Analyses of Permanent Magnet Generator for Efficiency Improvement

Student : Yao-min Yang

Advisor : Dr. Tai-Yan Kam

Department of Mechanical Engineering, National Chiao Tung University

ABSTRACT

This research aims to improve the efficiency of a permanent magnet generator by increasing the magnetic flux, modifying the heat transfer property, and reducing the weight of the generator. Without changing the outer dimensions of the permanent magnet generator, the structures of the rotor and stator are designed in such a way that the magnetic flux will be increased, the temperature lowered, and the weight reduced. The finite element method is used to perform the above analyses and the power generation efficiency is studied via static and transient approaches. It has been shown in the transient analysis the change of the geometry of silicon steel can increase the magnetic flux density. The creation of holes and addition of cooling fins on the outer surface of the stator can increase heat dissipation and cooling rate. The design of hollow rotor with supporting ribs can reduce weight without affecting the magnetic flux.

誌謝

碩士兩年的求學過程中，充滿各式各樣的難忘回憶，對我的人生影響重大，這都要感謝指導教授金大仁博士的細心、耐心指導，不僅在研究領域上不吝指教，對於求學態度和處世道理更是諄諄教誨，更感謝讓我能夠順利完成學業及論文。

感謝家人、朋友、同學的陪伴，有你們的支持讓我在求學過程中充滿力量，順利完成學業。感謝博士班學長昌毅、于昇、崧哥、欣翰、宗鴻、宏明的傾囊相授，在學業和生活上的協助；感謝畢業學長致翔、秉達、琮鐘、恩寶、奕樵的教導，在我遇到困難時，提供寶貴的意見。

最後感謝同窗好友立武、浩翔、正平、建順、志明兩年來的互相勉勵，在碩士生涯中不會孤單，一起努力完成學業；感謝學弟博聞、郁倫、達裕、竣維、峻嘉、柏毅、祖建讓我的生活充滿歡樂，使得求學過程更加豐富。並要謝謝一路上幫助過我的朋友們，僅以本文獻給所有關心我的人。

耀民 2010.8 于交大

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iii
目錄	v
表目錄	vi
圖目錄	vii
第一章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 文獻回顧	1
1-3 研究步驟與目的	2
第二章 發電機計算原理	4
2-1 發電機結構介紹	4
2-2 電磁分析原理	4
2-2.1 勞倫茲力(Lorentz force)	4
2-2.2 理想磁路	5
2-2.3 冷次定律	5
2-2.4 發電機磁阻扭矩	6
2-3 熱傳分析原理	7
2-3.1 電阻與溫度關係	7
2-3.2 熱傳導方程式	8
第三章 分析與設計方法	10
3-1 材料常數	10
3-2 發電機靜態分析	10
3-2.1 靜態磁分析假設	10
3-2.2 二維有限元素分析前處理	11

3-2.3 ANSYS 模型建立步驟	12
3-2.4 發電機模型	13
3-2.5 靜態磁分析結果	13
3-2.6 發電機效率改良	14
3-3 發電機暫態分析	14
3-3.1 Maxwell 模型建立步驟	14
3-3.2 發電機模型	15
3-4 發電機熱傳分析	15
3-4.1 熱傳分析假設	16
3-4.2 熱傳分析步驟	16
3-4.3 發電機模型	16
第四章 實驗驗證	17
4-1 發電機發電測試	17
4-1.1 小型永磁式馬達	17
4-1.2 磁力分析	17
4-1.3 發電機熱傳分析	18
4-2 發電機減重改善	18
4-3 發電機熱傳分析	19
4-3.1 暫態熱分析	19
第五章 結果與討論	21
5-1 研究結果	21
5-2 未來研究方向	23
5-3 設計建議	24
第七章 參考文獻	25

表格目錄

表 3.1 靜磁分析及量測數據比對	24
表 3.2 發電機規格	24
表 4.1. 發電機規格	24
表 4.2 發電機發電對應轉速	24
表 4.3 發電機發電電壓	24
表 4.4 熱傳分析與實驗數據比對	24
表 4.5 材料熱傳性質	25



圖片目錄

圖 2.1 發電機構造圖	31
圖 2.2 發電機爆炸圖	31
圖 2.3 冷次定律	32
圖 2.4 冷次定律應用在發電機	32
圖 2.5 平衡狀態的矽鋼片與磁鐵示意圖	33
圖 2.6 旋轉一角度狀態的矽鋼片與磁鐵示意圖	33
圖 2.7 旋轉後的向量關係	33
圖 3.1. 材料曲線	34
圖 3-2. Vect Quad 8node53 形狀	34
圖 3-3. Ansys 靜態磁力分析流程	35
圖 3.4 發電機照片	36
圖 3.5 發電機 2D 模型	36
圖 3.6 磁力線	37
圖 3.7 磁場強度	37
圖 3.8 磁通密度	38
圖 3.9 磁力線比較	38
圖 3.10 磁通密度比較	39
圖 3.11 Maxwell 暫態分析步驟	39
圖 3.12 小型永磁式發電機	40
圖 3.13 1kw 永磁式發電機	40
圖 3.14 plane55 元素	41
圖 3.15 熱傳分析求解步驟	41
圖 4.1. 發電機構造	42
圖 4.2. 氣隙與磁鐵和線圈的位置關係	42
圖 4.3 發電機定子改良	43

圖 4.4 扭力與時間關係	43
圖 4.5 電壓與時間關係	44
圖 4.6 發電機矽鋼片減重	44
圖 4.7 發電機中心為實體軸	45
圖 4.8 發電機中心為空氣	45
圖 4.9 發電機中心為矽鋼片支撐	46
圖 4.10 發電機中心為鋁合金支撐	46
圖 4.11 發電機定子減重	47
圖 4.12 發電機設計改良比較	48
圖 4.13 台科大設計的發電機	48
圖 4.14 輸入熱源與溫度關係圖	49
圖 5.1 旋轉不同角度的磁力線比較	49
圖 5.2 發電機挖孔峰值電壓比較	50
圖 5.3 發電機挖孔旋轉扭矩比較	50
圖 5.4 溫度探討區域	51
圖 5.5 溫度與時間關係	51
圖 5.6 第 250 秒溫度分佈	52
圖 5.7 熱梯度	52
圖 5.8 熱傳向量圖	53
圖 5.9 熱梯度向量圖	53
圖 5.10 單點溫度比較	54
圖 6.1 發電機建議設計圖	55

第一章 緒論

1-1 前言

風力發電的系統主要分成兩個部分：風力葉片及發電系統兩個部分，本研究著重於發電系統，而發電系統又可細分成四個部分：發電機、電源轉換器、電力控制系統及蓄電裝置。結合以上裝置將可發展一套完整的電力轉換系統，與設計的葉片結合，達到最佳的能源轉換效率。

目前有關發電機的研究已有不少，而且轉換效率都可以達到 98%，在感應電動機設計與製造一書中提及的發電機總效率為 87%，其耗損的主要原因來自於機械轉換損失及定子銅損，而定子銅損的電阻值設定其參數為常數，對於加上附載後發電機升溫後的影響並無詳細之研究，這樣效率的發電機因為成本及維護問題，在實際上應用時將會因為發電時所產生的廢熱無法排除，導致發電功率下降嚴重情況將導致發電機毀損，因此發電機若不將其散熱問題解決，將無法有效應用於風力發電系統，所以若是要解決目前發電機的問題，除了效率上的改善，更應考量其應用面，如何有效將使用時的溫度降低。並且針對發電機結構部分以複合材料取代原有之結構，在不影響結構強度之情況下，降低發電機的轉動慣量，使其發電效率提升。

1-2 文獻回顧

發電機的種類眾多，大致上可以分類為感應式和永磁式，而本研究主要針對永磁式發電機 (Permanent Magnet Generator, PM Generator) 進行效率研究，在研究發電機之前必須先了解發電機頓轉扭矩的大小，1997 年，Studer 提供出一套方法來計算內轉式的永磁式發電機的頓轉

扭矩[1]，車用發電機也有採用有限元素分析[2]，但車用發電機適用於高轉速[3]，若想讓永磁式發電機適用於低轉速的情況，必須先了解永磁式發電機在工業中的電磁設計原則[4]，但用於低轉速時有著無鐵心的盤式發電機[5]，盤式發電機的頓轉扭矩較小，但成本比一般的永磁式發電機高[6]，所以若要導入風力發電市場，一般的風力發電機佔有較大的優勢。

有限元素除了分析力學及電磁問題外，還可應用於結構和熱力方面[7]，所以我們採用文獻[8]所提到的有限元素方法計算發電機的熱傳導問題。

因目前有限元素分析軟體的耦合能力越來越強，所以透過熱電耦合的方式[9]，不但可以找出設計最佳化的方法，更可讓熱傳係數以變數的方式耦合到電磁分析的情況下，更能有效模擬出真實的發電機運轉情況。

透過以上文獻所提供的資料，發現過去並未有專門對於發電機散熱結構的研究，所以如果使用發電機的動態磁力分析配合散熱分析，將找出發電機在改善熱傳問題時又不影響發電效率的方法。

1-3 研究步驟與目的

本文主要是探討發電機的發電效率行為研究，討論在磁場及熱能下，發電機的磁通密度分佈、磁場強弱、以及因設計不良所產生的磁力線外露問題，此外透過發電機內部溫度不同來分析發電機的阻抗問題，進而推算發電機在不同情況下各點之溫度，透過散熱設計的改良來減低發電機內部溫度，進而提升發電機整體之效率。

在理論分析部份，本文以發電機 2D 結構為基礎，使用繪圖軟體建構模擬實體幾何外型之模型，將所產生之模型套入有限元素分析軟

體進行後處理分析，取得各種分析上的數據，以計算發電機的磁通密度分佈、磁場強弱。

在實驗部分，初期將以市面上可以取得之永磁式發電機，進行相關性能量測，磁力部分將以高斯計量測發電機的磁通密度，溫度部分將使用線性溫度感測器 AD590 及探針型測溫器，鑲埋在發電機各部位，將 AD590 所發出的電訊號由資料擷取器，讀入電腦後進行分析，之後將量測的數據與理論分析對照，並討論其差異與改良。

在比對後分析的模型正確性得到驗證後，使用這個模型進行改良，透過理論基礎決定模型的修改尺寸，在確定修改尺寸後，將修正過後的發電機模型套入有限元素分析軟體進行分析，確定改良之模型能提供最佳的效率。



第二章 發電機計算原理

2-1 發電機結構介紹

發電機與電動機在構造上沒有太大的差異，但發電機的目的在於產生電力，導線的電阻值使決定發電效率的主因，所以在選擇導線時發電機的導線直徑會比電動機粗，在分類上大致可以分類成有刷及無刷，內轉式無刷發電機的主要構造分成定子、轉子、線圈及外殼，而本文主要探的是無刷內轉式發電機。

2-2 電磁分析原理

2-2.1 勞侖茲力(Lorentz force)

當線圈通電流後會產生電磁力(Lorentz force)。若線圈的總長度為 L ，電流為 I ，則在磁場 B 中，線圈會受到一個垂直磁場方向與電流方向的力量 F 。三者關係式如下：


$$\vec{F} = \int (I \times \vec{B}) d\vec{l} \quad (2.1)$$

B 就是磁通密度，單位為 T (Tesla)； I 的單位為 A (安培)；力量 F 的單位為 N (牛頓)。三者的方向關係可用佛來明左手定則表示，中指為電流方向，食指為磁場方向，大拇指則為力量的方向。式(2.1)簡化為純量關係式：

$$F = BLI \quad (2.2)$$

求出的 F 為發電機在發電時線圈所產生的抵抗力。

2-2.2 理想磁路

透過理想磁路分析可以規劃出較好的發電機幾何模型，當一個包含氣隙磁路假設為理想磁路時，亦即不會產生漏磁的情況下，則空氣間隙裡的磁通量 Φ (flux) 與磁體中的磁通量必須相同。則可表示如下關係：

$$B_m A_m = B_g A_g \quad (2.3)$$

其中 B_m 與 A_m 表示磁體的磁通密度與磁體截面積， B_g 與 A_g 表示氣隙磁通密度與氣隙截面積。同時由於能量不減，氣隙裡的磁動力 (Magnetomotive force) 與磁體中的磁動力亦相同，表示如下：

$$H_m L_m = H_g L_g \quad (2.4)$$

其中 H_m 與 L_m 表示磁體的磁場強度與磁體長度， H_g 與 L_g 表示氣隙磁場強度與氣隙長度。

在實際的狀況下，漏磁是無法避免的，會與理想磁路的狀況有所差別，其差別在於並非所有磁體產生的磁力線都會通過氣隙，有些磁力線會從氣隙旁通過。因此我們定義出兩個修正係數來修正理想磁路的模型：

$$\begin{aligned} p &= \frac{\text{total_magnet_flux}}{\text{total_flux_in_the_air_gap}} \\ q &= \frac{\text{total_magnetomotive_force}}{\text{gap_magnetomotive_force}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

2-2.3 冷次定律

冷次定律是發電機在發電時主要原因，因磁場感應所生之電流，其所生的磁場恆抵抗原來的磁場變化方向(如圖 2.3)。其線圈感應電壓 e_{ind} (Electromagnetic induction)

$$e_{\text{ind}} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.6)$$

式中：

N = 線圈匝數

ϕ = 通過之磁通量(T)

但是由冷次定律並無法直接求出導線發電量，要計算發電量時，必定要使磁鐵與線圈產生相對運動，當線圈被磁場切割時由，假設線圈為長條型，並且磁鐵以一角速度 ω 轉動，透過理想磁路公式求得切割的磁通密度 B 式(2.3)，可得感應電動式 e (如圖 2.4)：

$$e = -B L d \omega \times \cos \omega t \quad (2.7)$$

2-2.4 發電機磁阻扭矩

磁阻扭矩是發電機在啟動時一定要克服的阻力，發電機在啟動前一直維持於平衡狀態，其磁鐵與矽鋼片的關係將以中心對其中心的方式排列（如圖 2.5），

但是啟動的瞬間因為磁鐵中心將不再對齊矽鋼片中心(如圖 2.6)，磁鐵與矽鋼片間的作用，將產生一磁阻扭矩。

實際分析時，因受限於磁路環圈的形成，導致發電機內部的磁場並非單一磁體的磁場強度，所以透過有限元素分析軟體計算磁場串連之後的磁場強度 H 和磁通密度 B ，其中 H 與 B 就是透過理想磁路公式求得，透過向量計算可得磁鐵對矽鋼片的吸力（如圖 2.7）。

$$F = B \times H \times A \quad (2.8)$$

$$T_b = F \times R \quad (2.9)$$

式中：

F = 磁鐵吸住鐵的吸力 (N)

H = 磁場強度 (A/m)

B = 磁通密度 (Tesla = N/(A-m))

A = 單位面積 (m²)

T_b = 磁阻扭矩 (N-m)

R = 半徑 (m)

發電機運轉時，線圈因感應電動勢而產生電壓，透過勞倫茲力式(2.2)與冷次定律式(2.6)，可以計算出線圈所產生的阻力 F_v ，加總後成上力臂即為發電時所產生的總電磁阻力。


$$T_v = \sum_{i=0}^n F_{v_i} \times (R + g)$$

(2.10)

式中：

F_v = 單一線圈所產生的阻力 (N)

n = 發電機槽數

R = 半徑 (m)

g = 發電機轉子與定子間氣隙 (m)

T_v = 發電時所產生的電磁阻力 (N-m)

2-3 熱傳分析原理

2-3.1 電阻與溫度關係

發電機中不考慮摩擦的情況下，熱源主要來自於發電線圈，而發電線圈的發電原因來自於導線電阻所產生，使用的公式及相關係數

為：

不考慮時間因素的電阻 R ：

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

(2.11)

式中：

ρ = 電阻率

L = 導線長度

A = 導線截面積

銅的電阻率 ρ ： $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

但電阻率會隨溫度變化，不同材質有不同變化情況，銅為溫度上升電阻率上升，半導體反之，金屬的電阻率 ρ 為

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha(T - T_0))$$

(2.12)

式中：

T = 發電機目前溫度

$T_0 = 20^\circ C$

銅的電阻率溫度係數 α ： $3.9 \times 10^{-3} ^\circ C^{-1}$

ρ_0 ：參考溫度下的電阻率，一般是 $20^\circ C$

由此公式可以推導出發電機線圈的溫度，而線圈溫度就是分析時所設定的熱源溫度。

2-3.2 熱傳導方程式

求解熱傳問題時使用的是熱傳導方程式，熱傳導在三維的等方向

均勻介質裡的傳遞方程式為

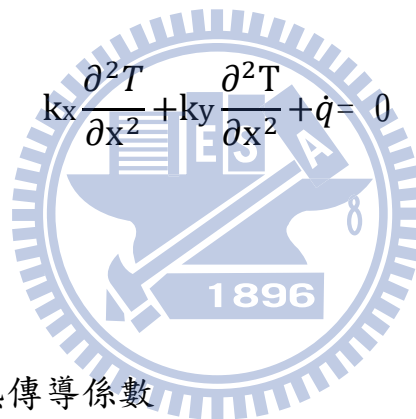
$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.13)$$

式中：

k 決定於材料的熱傳導率、密度與熱容

u = 溫度

此理論可以計算熱源產生的熱，要花多少時間才能擴散到其他地方，本文使用的是二維的熱傳分析，所以在有限元分析時會將公式改成


$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \dot{q} = 0 \quad (2.14)$$

式中：

k_x ：x 方向熱傳導係數

k_y ：y 方向熱傳導係數

T：溫度

\dot{q}' ：單位體積的熱產生量。

第三章 分析與設計方法

3-1 材料常數

發電機的磁路是由磁體與導磁體相互配合設計獲得，分析使用的材料有：(a)矽鋼片，(b)永久磁鐵(釹鐵硼)，(c)空氣，(d)銅四種。

分析時需要定義的材料參數有相對導磁係數(Relative Permeability μ_r)與矯頑磁力(Coercive Force H_c)。永久磁鐵本身具有固定的磁場方向，所以有非等向均勻的矯頑磁力外，其餘材料特性均為等向且均勻。但是在 Maxwell 中有更接近的實質的材料庫(如圖 3-1)。使用的材料性質直接影響分析結果，所以分析的誤差將有一部分來自於材料參數。

3-2 發電機靜態分析

發電機的靜磁分析是一項非常重要的過程，因為要做動態的磁力分析，一定要先求出靜態解，並且透過靜態分析與實際測量資料的比對，才有辦法驗證發電機的分析方法是否正確，所以發電機的第一步就是分析發電機的靜磁狀況。

3-2.1 靜態磁分析假設

整個靜態分析過程中，使用以下的假設：

- 1.由於探討的發電機磁場分析是屬於穩定靜態磁場，不包含線圈，所以沒有感應電流，故將線圈材料假設為空氣。因此符合真空中穩態磁場的狀況，方程式(2.11)的邊界條件亦適用。
- 2.探討的發電機皆訂為內轉式結構，選取發電機在發電時會貢獻磁通的部分進行分析。

3.永久磁鐵的磁極方向為徑方向（採用圓柱座標系統），磁體的排放依照一正一負的排法，磁體內部的磁力線平行磁極方向，且磁體皆為磁力均勻狀態。

3-2.2 二維有限元素分析前處理

發電機模型及邊界條件都已經決定之後，網格切割後元素的大小，影響著模擬的精確度。元素切割的越小，模擬所獲得的值越精確，但是分析值會有收斂性，因此為了減少模擬計算的時間，我們首先對 ANSYS 有限元素分析的收斂性進行探討。整個發電機模型可區分為幾個部分，內轉子、氣隙及發電部分。由於注重的是發電機內轉子和矽鋼片發電部分磁通密度，這兩部分的分析值達到收斂即可，所以在永久磁鐵及矽鋼片沒有提供發電部分採用較大的網格分割，減少運算時間。內轉子包含永久磁鐵、固定結構兩部分，固定結構就是我們降低轉動慣輻的目標。為了探討分析值的收斂範圍，將元素的大小分為 0.4 mm、0.2 mm、0.1 mm、0.05 mm 四種，可得分析的結果。發現在元素大小為 0.1 mm 時，氣隙磁場的分析值已達到收斂，因此未來的模擬中，發電機內轉子和矽鋼片發電部分的元素大小定為 0.1 mm。

發電機本身分為內部轉子和外部線圈，在設計邊界條件時要先考慮以下幾種接觸面問題：

- 1.是否左右對稱
- 2.是否有氣隙存在
- 3.轉子與定子的相對關係

使用 2D 分析元素為 Vect Quad 8node53(如圖 3-2)，使用這種元素的原因是，該元素只有在單一方向有 3 個節點，即只考慮平行方向，對於磁場而言，因磁場若分割到非常微小的情況下，其磁力線必定互

相平行，正好符合該元素特性，比起使用中間具有節點的元素在運算上將可減少許多時間。

3-2.3 ANSYS 模型建立步驟

前處理部分：

1. Preprocessor → Element type：選擇 Vect Quad 8node53。
2. Preprocessor → Material Props → Material Models：設定發電機材料。
3. Preprocessor → Modeling：由點、線、面建立揚聲板的模型外觀。
4. Preprocessor → MeshTool：選擇各面積之元素參數、材料性質、各元素之尺寸大小，並分割元素。
5. Preprocessor → Modeling → Create → Keypoints → on Node：逐一點選發電線圈圍繞的矽鋼片位置建立 Keypoints。
6. Preprocessor → MeshTool → Mesh：選擇全部面積。
7. Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Magnetic → Boundary → Vector Poten → Flux Par'l → On Lines：選擇發電機最外圈。

分析部分：

8. Solution → Solve → ElectromagnetStatic → Analysis → Opt&solv：點選後電腦會自行計算結果。
9. General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solu：底下有兩個部份都要進行比對 Magnetic Field Intensity(磁場強度)及 Magnetic Flux Density(磁通密度)。
10. General Postproc → Plot Results → Contour Plot → 2D Flux Lines：顯示磁力線。

11. General Postproc → Plot Results → Vector Plot → Predefined: 底下有兩個部份都要進行比對 Mag Field (磁場強度)及 Mag Flux Dens (磁通密度)。
12. General Postproc -> Path Operations -> Define Path -> By location 。
13. General Postproc -> Path Operations -> Plot Path Item -> On Graph 。
14. General Postproc -> Path Operations -> Plot Path Item -> List Path Items 。

3-2.4 發電機模型

發電機採用 3KW 的永磁式發電機(如圖 3-4)，其規格為 3 相 24 極 54 槽的永磁式發電機，發電機的徑深 100mm，使用此發電機的原因在於該發電機已經廣泛被運用在電梯的發電機上，在磁及數及尺寸上都比較接近真實狀況下風力發電所使用的發電機。在分析時將該發電機轉化成為 2D 模型(如圖 3-5)，因發電機為上下對稱，所以分析時採用 2D 模擬輸入發電機的軸向深度即可。

3-2.5 靜態磁分析結果

透過有線元素分析軟體分析上述 3KW 的永磁式發電機，可以找出該發電機的磁力線(圖 3.6)、磁場強度(圖 3.7)及磁通密度(圖 3.8)，其中發電機氣隙內的定點磁通密度量測平均值為 0.301T，與分析結果 0.3T 吻合，且誤差在 0.3% 左右(如表 3.1)，判定我們分析參數以及模型建立方式是正確的，藉此可以進一步透過分析軟體對發電機的設計進行改良。

3-2.6 發電機效率改良

因發電機原始設計的軸心為實心設計（圖 3.6），可以發現實心軸在軸心部分會有磁力線通過，但通過軸心的磁力線的磁通量非常小，並無法提供發電機有效的發電效率，所以若是減少軸心的矽鋼片，將實心的設計改為肋條的方式，將減少發電機在轉動時的轉動慣量，以及發電機製作時所需的材料，除此之外也可以減少軸心部分漏磁(如圖 3.9 及圖 3.10)，減少發電機軸心含磁的問題，使安裝的感量原件較不容易受到干擾，減少量測上的誤差。

3-3 發電機暫態分析

發電機的發電原理來自於永久磁鐵所造產生的電子移動，透過電子的移動，在導體的兩端形成電壓差，當導體形成迴路之後，變因電壓而產生電流，而且隨著發電機轉子的轉速不同，產生的電壓和電流也會有所不同。

透過暫態分析，將求得發電機在運轉時的發電效率，並且結合前靜態分析求的結果，找到發電機模型的效率改善方式。暫態分析時所使用有限元素軟體分析，透果耦合分析可以求到發電機的動態磁力分佈，並且得到發電機的頓轉扭矩及導線電壓。

3-3.1 Maxwell 模型建立步驟

Maxwell 跟 Ansys 的操作方法不同，採用的是直接在操作面建立分析的方式，故直接列出分析步驟(如圖 3.11)，模型建立使用尺寸參數直接輸入就可達成，但必須設定發電機的材質、導線的排列及相數、定義轉子位置及旋轉方向，此部分都定義完成後則須設定發電機切割

的網格密度，在後處理部分透過設定旋轉時間，分析軟體才會分析出動態的發電效率，並計算發電時所需的扭力大小。

3-3.2 發電機模型

在動態部分的分析採用兩種模型，一種式小型永磁式發電機(如圖 3.12)，另一種是由台灣科技大學設計的 1kw 永磁式發電機(如圖 3.13)，兩種發電機的規格如表 3.1 所示。使用小型永磁式發電機作為驗證對象，可藉由小型永磁式發電機已知的材料參數使分析時不會因為材料上的誤差而導致分析結果不吻合，並且透過配置好的轉速控制器，使小型永磁式發電機在驗證上更容易達成。

3-4 發電機熱傳分析

2D 熱傳分析所使用的元素為 plane55 (如圖 3.14)，因該元素具有對於溫度只具有一個自由度，故可以用於一個平面元素或軸對稱環單元的二維熱傳導能力使用。該元素是適用於二維，穩態或瞬態熱分析。該元素也可以彌補一般運輸熱流從一恆定速度場。如果模型包含的溫度也將元素結構分析，元素應改為由具有同等作用的結構元素（如 PLANE42）。類似的元素與 midside 節點能力 PLANE77。類似的軸對稱元素，接受非軸對稱荷載 PLANE75。

透過熱傳分析可以了解發電機在產生熱的時候，哪些位置較容易累積熱能，透過溫度分佈定義熱影響區域，並針對此區域的散熱找出較適合的降溫方式，進而保護發電機在過載時不會因為熱量無法散除而毀損。

3-4.1 熱傳分析假設

熱傳分析在設計條件要假設以下幾種問題：

1. 材料均質性
2. 熱傳導係數

材料的均質性在分析時可以使X及Y方向的熱傳導數相同，在發電機中因為主要的熱源是發電機的銅線，而銅線的外圍是矽鋼片，因此矽鋼片的材質將直接影響發電機的散熱效率。

3-4.2 熱傳分析步驟

熱傳分析求解是透過有限元素分析，將模型建立之後，定義材料參數及相關邊界條件，設定溫度加載的模式以及升溫時間，最後定義求解時的參數及後處理方式（如圖 3.15），熱傳分析時需注意分析物件的熱源加載情況，在有溫度加載的情況下時間的變動率不宜超過 1 秒，若是想要觀察冷卻時溫度分佈情形，在冷卻期間可以使用較大的時間變動率，減少分析所需時間。

3-4.3 發電機模型

在熱傳分析採用兩種模型，與暫態磁力分析的模型相同，一種式小型永磁式發電機，另一種是由台灣科技大學設計的 1kw 永磁式發電機。

驗證的部分以小型永磁式發電機進行，針對定點溫度逕行實際測量，之後與分析值做比對，驗證無誤後將使用該分析方法來改善發電機的設計。

第四章 實驗驗證

4-1 發電機發電測試

發電機發電測試主要用於量測實際發電機的發電輸出，並且做為之後驗證的比對參數，而且改良過後的發電機也必需求解其發電量，避免因改良後的設計誤差，導致發電機的發電效率下降。

4-1.1 小型永磁式馬達

本分析主要針對 2 極無槽式發電機(如圖 4.1)進行暫態的磁力分析，其中因發電機為無槽式的設計，所以在啟動時不會有頓轉扭矩產生，但是這並不代表發電機的線圈不能纏繞，因為小型發電機的半徑較小，所以線圈不一定要繞在矽鋼片上才会有最佳長度發電效率比，因為半徑較小，所以在設計時，只考量設計的矽鋼片是否可以容許磁鐵所產生的磁通，讓線圈分佈在矽鋼片和轉子間即可(如圖 4.2)，但是磁力大小與距離成反比，所以無槽式發電機的尺寸不宜過大，以免降低發電效率。

4-1.2 磁力分析

使用 2D 分析圖 4.1 中的發電機時，發電機軸向高度為 15.6mm，因為本發電機只有兩個極性，所以在應用時必須使用相當高的轉速（超過 10000 轉）發電效率才會接近工作值（如表 4.1）。且線圈有 3 組，每組有 2 個迴圈，每個迴圈內有 12 條導線，共繞 6 圈，總計發電時共有 864 條導線工作，透過串並連的方式使其電壓與電流達最大功率。

分析結與實際測試發電機的結果如表 4.2 及表 4.3 所示，藉此證

實發電機的效率與理論分析有吻合之處，所以之後的設計改良將使用本方法進行評估。

4-1.3 發電機熱傳分析

在發電機熱傳分析部分，透過小型發電機的實際運轉及導線施加電流之後的發熱現象，來判定分析是否吻合。

實驗及分析的邊界條件：

1. 周圍溫度的散熱率定為 50 W/m-K
2. 加熱模式為對導線輸入能量，實驗部分所能給定的最大能量輸入為 40A

透過熱傳的分析與實驗數據在趨勢及數值上吻合，藉此可以透過分析的方式找到較好的散熱模型。

4-2 發電機減重改善

透過理想磁路的公式，在設計減重時，可以先用面積與直通密度的概念，來設計發電機矽鋼片的厚度，而此方法應用在減重時將能有效節省設計所需之時間，透過已知的磁通密度大小，在計算時只須確定磁通密度與設計的面積參數不會超過材料容許係數，就能快速規劃出設計的尺寸範圍。

發電機在旋轉時所需的轉動慣量來自於轉子，所以對轉子減重可以直接改善轉動慣量，但在過去的分析中，發現發電機的磁損問題影響重大，所以設定目標為先求出發電機的基本發電曲線，透過幾何形狀的改變來增加發電機的發電量，並且考量重量效應，使設計的發電機不但輕發電效率也高，最後再利用該發電機設計散熱設計。

是發電機的改良研究使用的發電機（如圖 4.3）是 2 極式 6 組線

圈。透過增加定子矽鋼片上的凹槽，其結果顯示在挖孔半徑 0.7mm 時其發電效率下降不到 0.1%(如圖 4.4)，且頓轉扭矩最小(如圖 4.5)。藉由挖孔的矽鋼片減重其成效如圖 4.6 所示，發電機原始軸心設計為實心，但軸心只有少數磁力線通過，若減少軸心矽鋼片，將減少發電機的轉動慣量，此外亦可減少軸心漏磁，且發電機轉動時並非所有線圈都在工作，在設計肋條時，將肋條設計成 6 根，避免因減重而影響發電效率。

4-3 發電機熱傳分析

由先前分析出的結果顯示，發電機在定子上挖孔之後，其表面積增加，及散熱面積增大，針對此模型驗證該設計除了可以減輕發電機重量，亦對散熱具有貢獻價值，挖孔後的發電機在穩態下溫度分佈(如圖 4.12)具有較低的溫度，得證此凹孔能提升發電機散熱效率。

因熱傳分析必須先求出模型之穩態解才有辦法求解暫態部份，透過上述方法可以先求出發電機熱傳穩態解，之後便可將穩態分析的數值及設定套入暫態分析進行求解。

4-3.1 暫態熱分析

在暫態的熱傳分析對象使用小型發電機進行分析，其溫度加熱區域設定在線圈上，而散熱的邊界條件設定為 20°C 的空氣，且熱傳導率為 50 W/m-K，而加熱與時間的關係為加熱 20 秒後冷卻 230 秒，總計 250 秒(如圖 4.14)，所使用的材料為矽鋼片、銅及空氣，磁鐵的相關熱傳系數與矽鋼片相同(如表 4.4)，主要針對 27.6 及 32.8°C 兩種室溫進行分析，其分析與實際量測結果顯示，在 27.6°C 時的誤差在

0.3%，而 32.8°C 的誤差在 4.5%（如表 4.5），由實驗與分析比對知結果證實，分析方法無誤，之後將透過該分析方法來研究不同發電機之模型，由分析不同發電機之模型找出最適合發電機的散熱方式，進而提升發電機整體之效益。



第五章 結果與討論

5-1 研究結果

透過使用分析軟體搭配設計原理，結合前四章所得的改善方法，可以找出發電機提升效率的方法，透過改善磁通模型、轉動慣量和散熱效率將有助於發電機在實際運作時的整體效能提升，固將研究結果歸納成三個部分進行詳細的討論，分別為發電效率、減重、散熱，最後統合三項改良設計，定義出發電機的改良模型。

轉軸挖空後的發電機（圖 3.8 和 3.9），其挖空後矽鋼片的寬度在有效的範圍內對於磁通密度的影響非常的小，此時的設計可以先用理想磁路的方式訂出設計範圍，磁通密度部分只要不超過材料容許即可，而磁通密度對等影響到發電效率，所以針對發電機的轉軸改善其寬度將有助於減少轉動慣量，並且不會影響到發電效率，若發電機中心為實心結構，其磁力線會流到發電機中心轉軸部份產生漏磁（圖 4.11），而產生的漏磁對於量測用的感測器會造成不良之影響，因此透過分析可以找出該尺寸發電機內矽鋼片的最佳寬度，由分析結果顯示矽鋼片寬度在 12mm 到 15mm 間發電效率最佳，固之後的設計會引用此方法，先求出探討的發電機的矽鋼片最佳使用範圍，在進行散熱和減重分析。

透過分析軟體的磁力線分布圖可以發現發電機在平衡位置或是轉動一角度時，都會出現有幾處磁通特別小的現象（圖 5.1），這現象與發電機的極數和槽數有著相對的關係，因為選用的發電機模型為 24 極 54 槽，而最大公因數為 6，意味著每隔 6 個磁即將產生一個相

同的循環，所以先把磁鐵分成 6 組，而每一組在最外圈產生的磁力將會最小，因為磁力疊加效應，所以在各組交合的地方，該現象將被放大，導致部分磁通明顯低於其他位置。但是在轉子旋轉一角度(10/3 度)後，由於發電機內部磁力不是處在一穩定狀態，該磁通減小現象也會平緩化，磁通最小處由原本的一處變成左右對稱的分佈，這是因為磁鐵在此時與矽鋼片的位置已產生變化，所以在發電機轉動時並不是所有線圈都有在工作，因此在設計肋條時可以利用此現象作為基礎，將肋條設計成 6 根，材料上的使用可以分成兩種：

- 肋條為矽鋼片材質，透過複合材料包覆的方式，讓結構輕量化
- 完全使用複合材料做為肋條，可減少肋條上的漏磁，提升發電效率

採用肋條的設計會影響發電效率(圖 5.2 和 5.3)，其影響主要在於發電所需的扭矩，但透過分析所得數據使用不同的材質當肋條，所需的扭矩大小將會有著顯著之差異，以矽鋼片做為肋條之發電機在所需扭矩的最大值將比使用鋁材或是非肋條式設計減少 12.5%，所以將發電機轉子挖空設計成肋條，並且使用矽鋼片材質，能有效減少發電機啟動時的轉動慣量 8.3%，以及降低發電機轉子重量 73%。

透過分析求出的磁通密度和磁場強度，發電機在旋轉一角度後的恢復力(磁阻扭矩)大小，而分析出的 3KW 發電機，所需的最大磁阻扭矩為 24.6N-m，但此結果的計算是假設發生在靜磁分析下，降低磁阻扭矩的方法有兩種，一種是將上下磁極排列交錯一角度(理想角度在 2~3 度)，另一種方法是將矽鋼片整體排列旋轉一方向，此法能將磁阻轉矩更為均勻分散掉，旋轉的角度與發電機軸深有相對關係，

目前分析的 3KW 發電機採用後者方法。

在散熱部分，如果輸入能量時間在 7 秒以下，矽鋼片挖孔的散熱效率最高，但如果輸入能量時間超過 7 秒，有加散熱鰭片的散熱效率最高，但是在溫度下降的斜率部分，使用有挖孔且加上散熱鰭片的方式，將可得到最佳的降溫速度。而且由分析及量測結果（圖 5.4 至圖 5.10）得知，發電機在熱傳遞時，線圈所產生的熱，只有少部分會傳遞到轉子上，所以轉子不需加上散熱的改良。

藉前述結果我們可以歸納出發電機在設計矽鋼片時，應先針對發電機的有效磁通位置進行磁通量的最佳設計，讓發電機的磁通效率發揮到最高，而中心矽鋼挖空的半徑由發電機總磁通量決定。

發電機定子線圈是熱源，熱能在傳遞時如果需要變換界質，將會增加傳導所需的時間，所以發電機的轉子部份升溫速度會比定子線圈的矽鋼片慢，在散熱設計時就應先考慮定子線圈的散熱設計。

5-2 未來研究方向

由於現階段對發電機基本結構已有幾項重要的研究，如轉動慣量的減輕、漏磁的改善以及發電機的散熱效率問題，所以在未來研究的部份，將研究不同類型的發電機之發電效率及減重和散熱問題，並增加更多不同尺寸發電機的實驗，並把設計準則應用在各種發電機下，驗證並尋找其中關聯性，統整出發電機最佳設計規範，而在熱傳部分，將針對散熱時應以如何設計散熱鰭片，使發電機的散熱效率更為提升。

5-3 設計建議

由改良分析發電機定子部份所得出的結果顯示，使用挖孔增加散熱效率，可以增加發電機的散熱速度 $1/6$ ，而在減重部份則可使定子矽鋼片減輕 8%。若以生產為考量時，定子挖孔處可直接鑲嵌上散熱片，提升發電效率，由分析結果顯示挖孔處增加散熱片，將有助於散熱效果的提升，以台科大設計的發電機為例，將可減少整體定子溫度 10°C 以上。

發電機轉子部份，透過挖孔減重達 73%，並可降低旋轉時的轉動慣量，使該發電機應用於低轉速啟動時更加具有經濟效應，如：風力發電產業。

透過分析及驗證所得的發電機改善成效，以發電機轉子肋條減重設計、發電機定子散熱挖孔以及散熱鰭片的加裝最有成效，所以在往後發電機製作時可以加入此兩項作為設計參數，一方面可以提升發電機整體之效率，另一方面可以減少發電機生產時所需之材料成本。

第七章 參考文獻

- [1] Studer, C. and Sebastian, T., “Study of cogging torque in permanent magnet machines”, IEEE IAS Annual meeting, New Orleans, Louisiana, Oct. 1997.
- [2] Mihai Comanescu, A.K., and Min D., “Design and analysis of 42-V permanent-magnet generator for automotive applications”, IEEE Transactions on energy conversion, VOL. 18, NO. 1, Mar. 2003
- [3] Ion Boldea, L. T., and Cristian I. P., “PM-assisted reluctance synchronous motor/generator (PM-RSM) for mild hybrid vehicles: electromagnetic design”, IEEE Transactions on energy conversion, VOL. 40, NO. 2, Mar./Apr. 2004
- [4] Paolo D. B. and Maria E. M., “Industrial design with multiple criteria: shape optimization of a permanent-magnet generator”, IEEE Transaction on magnetics, VOL. 45, NO. 3, Mar. 2009
- [5] Zalan K., “Test results of a compact superconducting flywheel energy storage with disk-type, permanent magnet motor/generator unit”, IEEE Transactions on applied superconductivity, VOL. 19, NO. 3, Jun. 2009
- [6] Ion Boldea, C. X. W and Syed A. N., “Characterization of three phase flux reversal machine as an automotive generator”, IEEE Transactions on energy conversion, VOL. 16, NO. 1, Mar. 2001
- [7] Coz D’az J. J. D and Dom’nguez Herna’ndez ,A. S. S., “Thermal design optimization of lightweight concrete blocks for internal one-way spanning slabs floors by FEM”, Energy and buildings, Jun. 2009
- [8] Helmut Kock, V. K. and Christian Djelassi, M. G. D. P., “IR thermography and FEM simulation analysis of on-chip temperature during thermal-cycling power-metal reliability testing using in situ heated structures”, Microelectronics reliability, Mar. 2009
- [9] Preis, O. B. and Dyczij-Edlinger, K.R. R., “Application of FEM to coupled electric, thermal and mechanical problems”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 30. NO. 5, Sep. 1994
- [10] Eugeniusz K., “Analysis of Coupled Electric and Thermal Field Problems by Boundary-Element Method”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 38, NO. 2, Mar. 2002
- [11] Wilber, H. H. and, Jr. J. A. B., “Engineering electromagnetics”, Sixth edition, Mc Graw Hill, Jun. 2000.
- [12] 楊政瑜、蘇琨祥, “無刷電動機結構設計與特性分析”, 工程科技與教育學刊 第五卷 第三期 Sep. 2008
- [13] 王怡鈞, “電磁學”, 超級科技圖書, 1990.

[14]王以真, “實用磁路設計”,全華 ,1995.



表

表 3.1 靜磁分析及量測數據比對

	分析值(T)	量測數據(T)	誤差(%)
數值	0.3	0.301	0.3



表 3.2 發電機規格

	小型永磁式發電機	1kw 永磁式發電機
極數	2	32
槽數	6	30
相數	3	3

表 4.1.發電機規格

編 號	馬達型號	KV 值 (rpm/v)	電調 (A)	電壓範圍 (V)	空載電流 (A)	極限電流 (60/60S)	最大功率 (W/60S)
XYH-L-019	OK-B2835-C	2700	25	6-12	1.2	35	230



表 4.2 發電機發電對應轉速

	示波器	理論
轉速(rpm)	35999.9	36000

表 4.3 發電機發電電壓

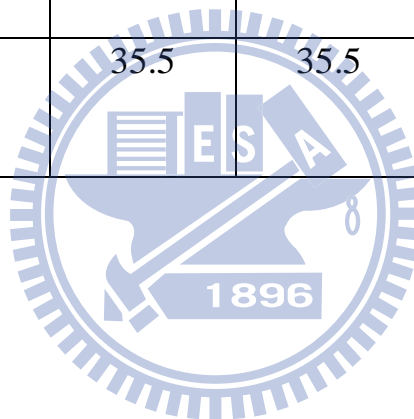
	電錶	理論
$V_{PP}(V)$	8.69	8.9 – 9.6

表 4.4 材料熱傳性質

材料	Density (kg/m ³)	Thermal Conductivity (W/m-K)	Specific Heat (J/kg-K)
矽鋼片	7871	59.5	481
空氣	1.205	0.0257	1005
銅	8940	401	385

表 4.5 熱傳分析與實驗數據比對

	分析值($^{\circ}\text{C}$)		量測數據($^{\circ}\text{C}$)		誤差 (%)
	20sec	250sec	20sec	250sec	
室溫 27.8°C	33	30.3	32.9	29.4	0.3
室溫 32.6°C	37	35.5	35.5	33.4	4.5



圖

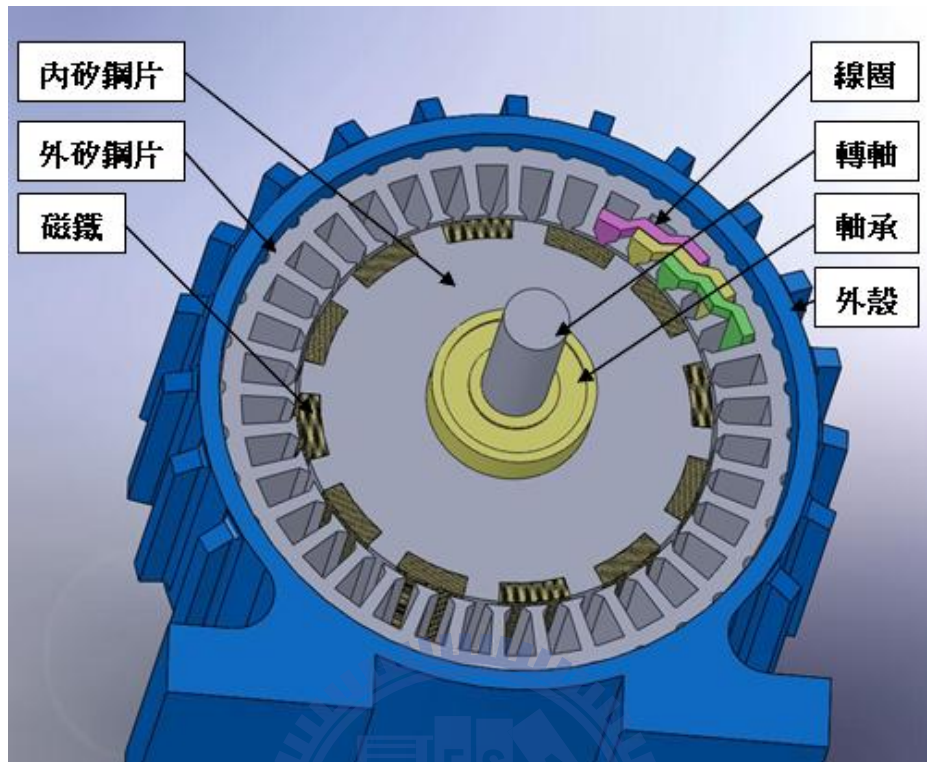


圖 2.1 發電機構造圖



圖 2.2 發電機爆炸圖

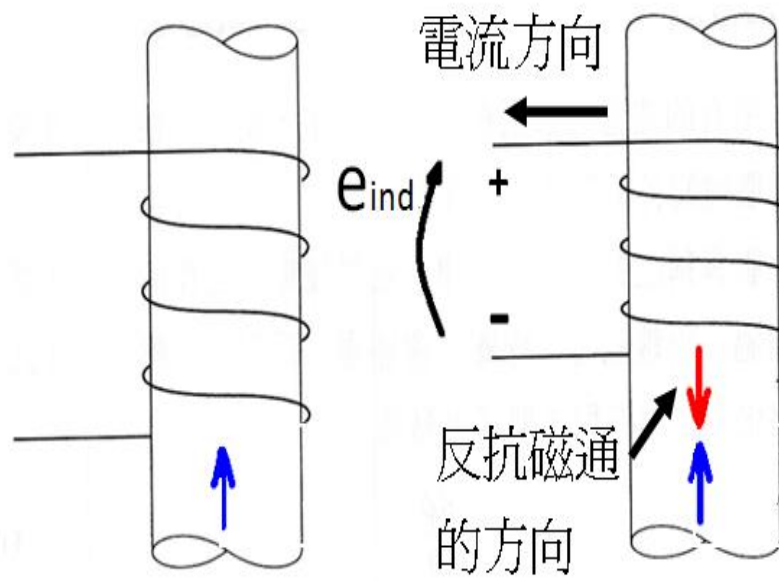


圖 2.3 冷次定律

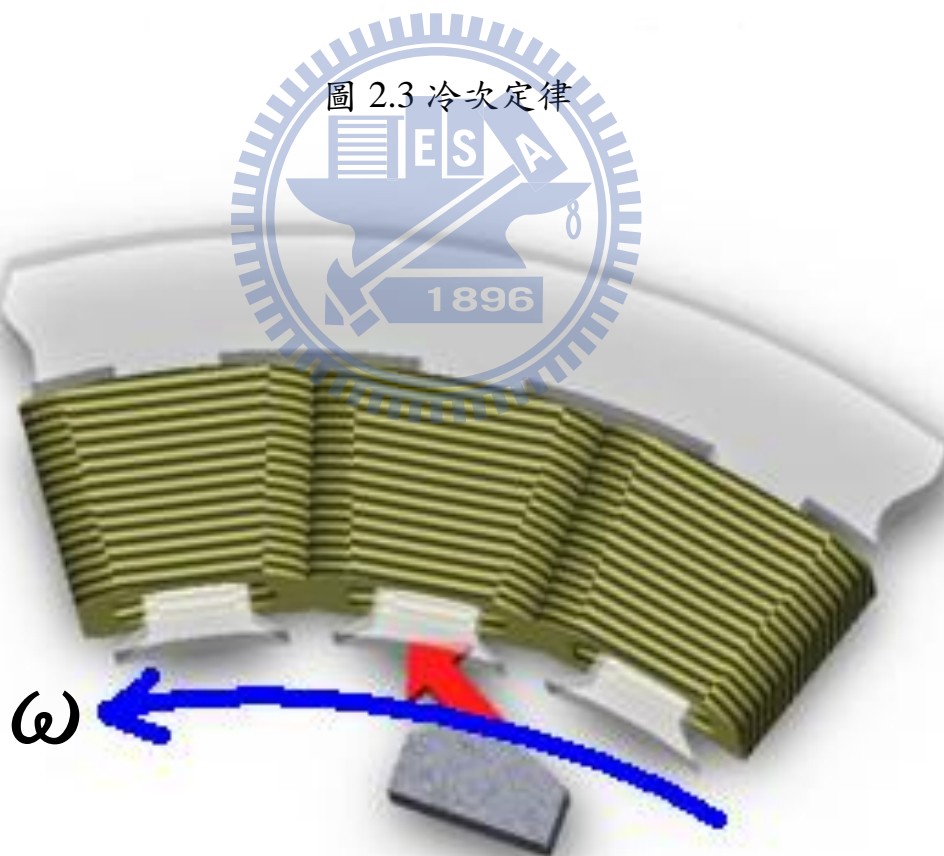


圖 2.4 冷次定律應用在發電機

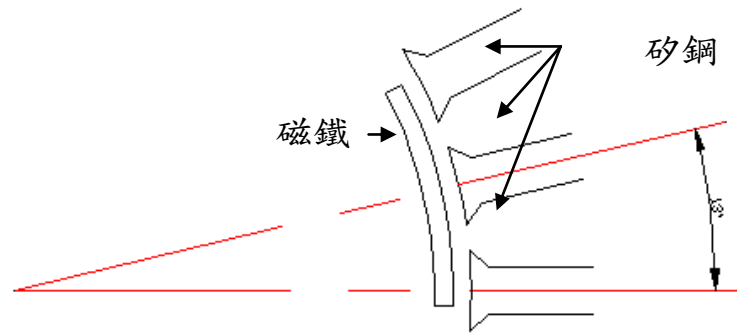


圖 2.5 平衡狀態的矽鋼片與磁鐵示意圖

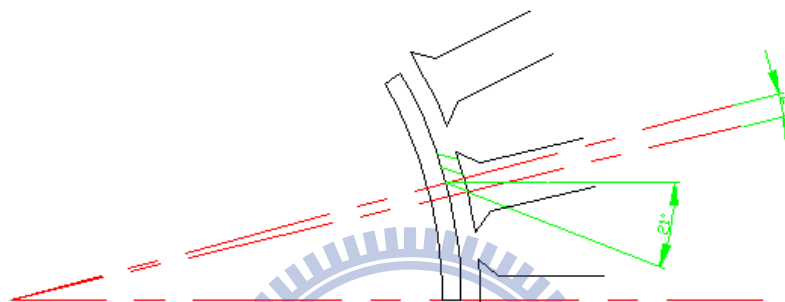


圖 2.6 旋轉一角度狀態的矽鋼片與磁鐵示意圖

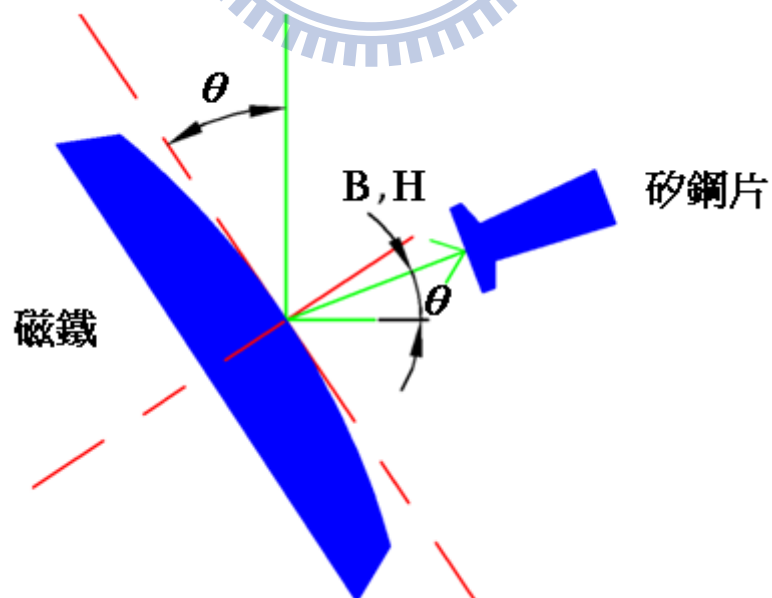


圖 2.7 旋轉後的向量關係

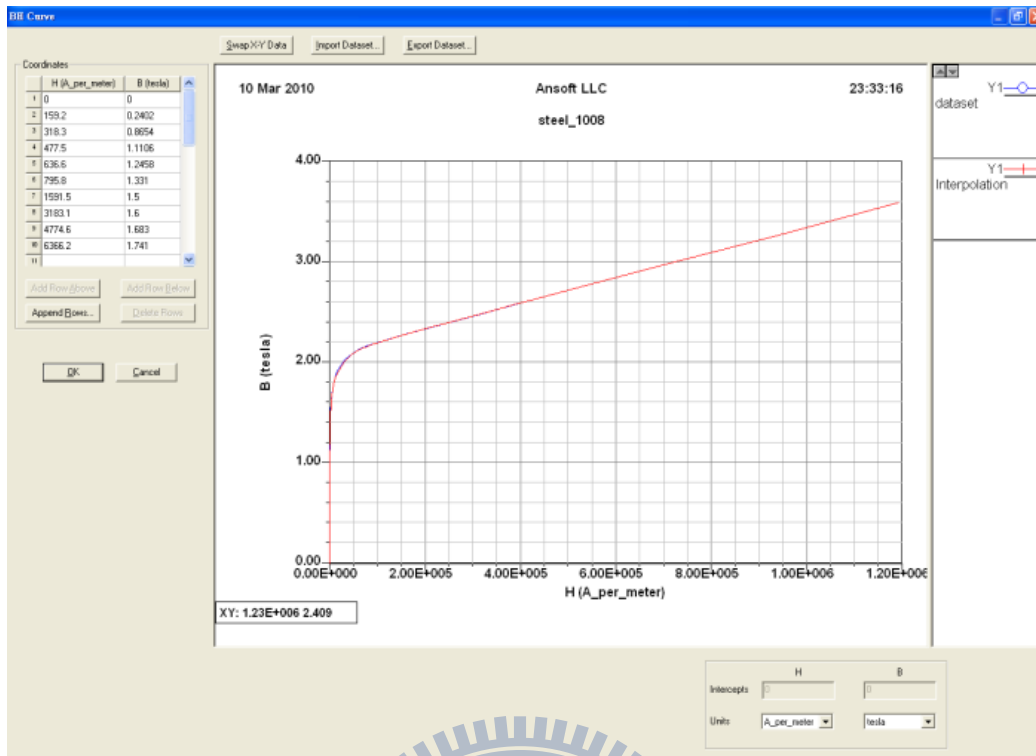


圖 3.1.材料曲線

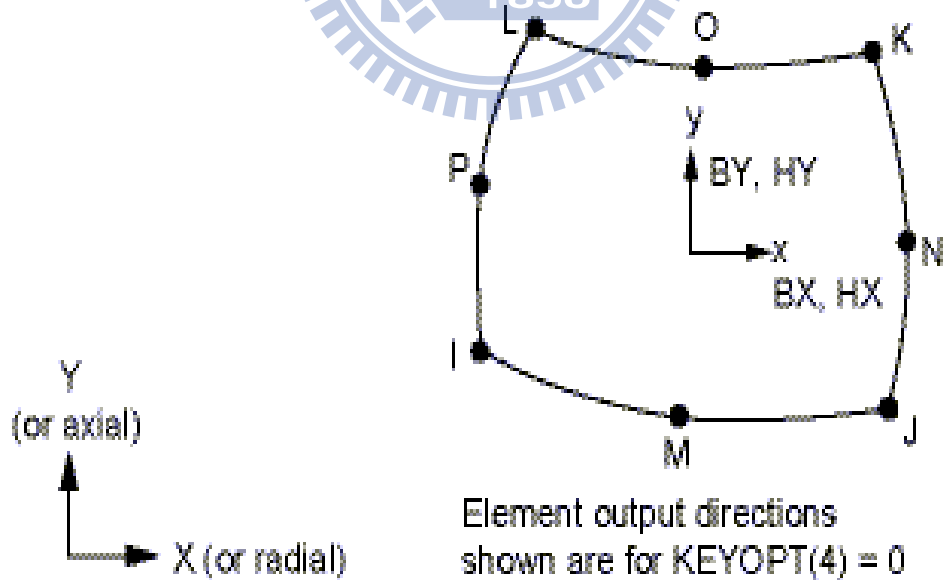


圖 3-2. Vect Quad 8node53 形狀

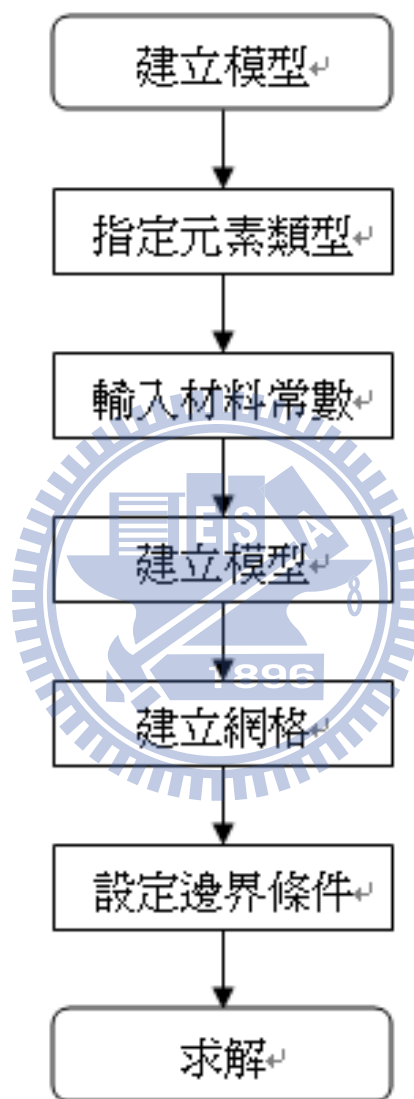


圖 3-3. Ansys 靜態磁力分析流程



圖 3.4 發電機照片

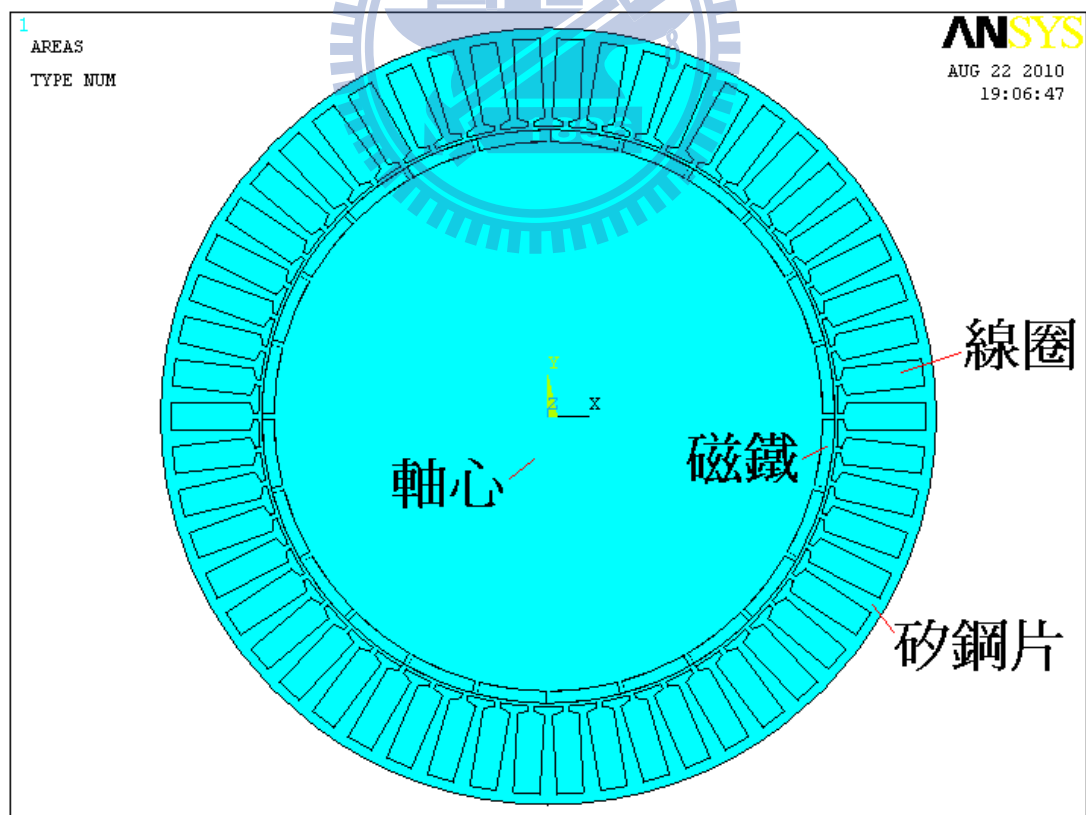


圖 3.5 發電機 2D 模型

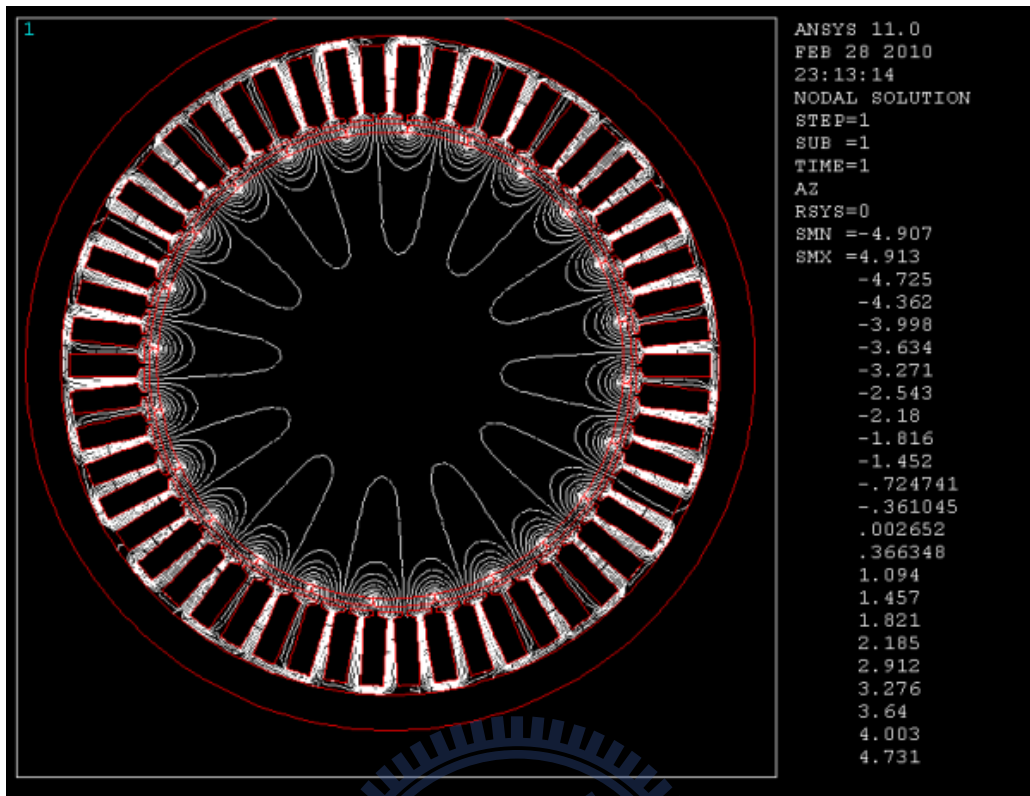


圖 3.6 磁力線

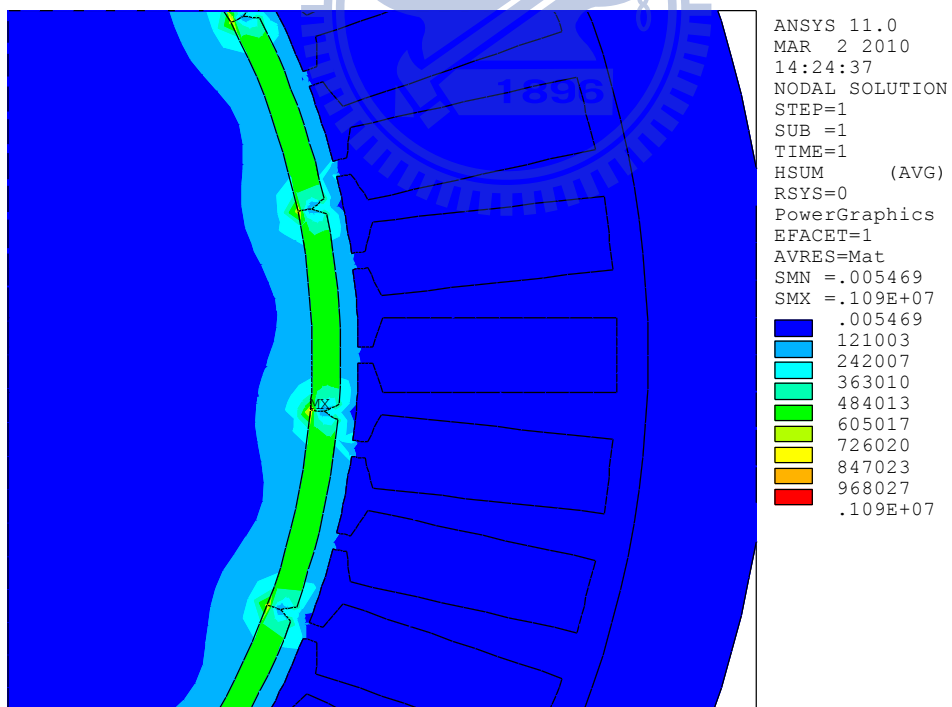


圖 3.7 磁場強度

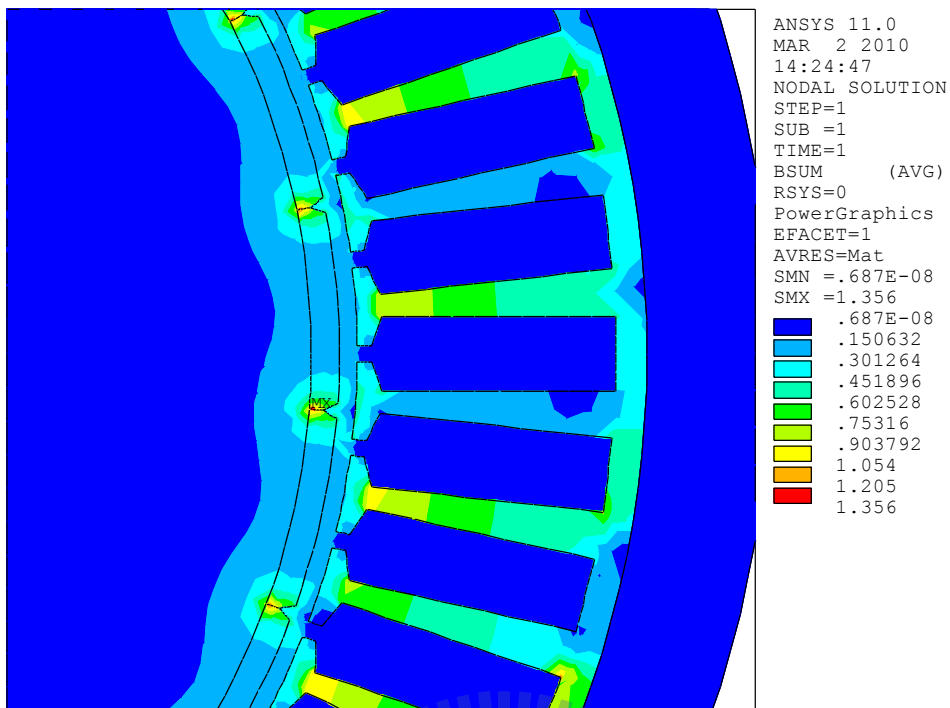


圖 3.8 磁通密度

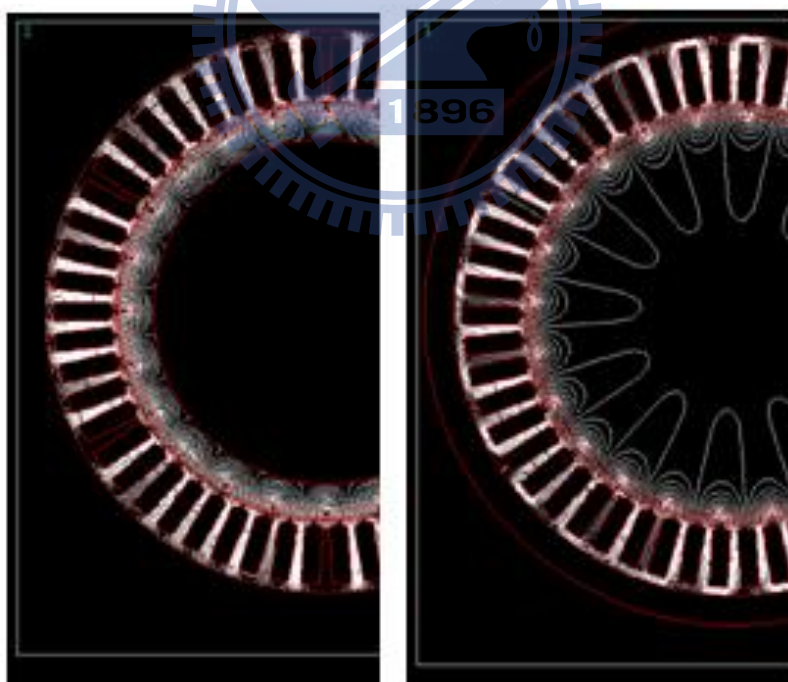


圖 3.9 磁力線比較

(左)將轉軸挖控制厚度剩下 15mm

(右)轉軸不挖空情況

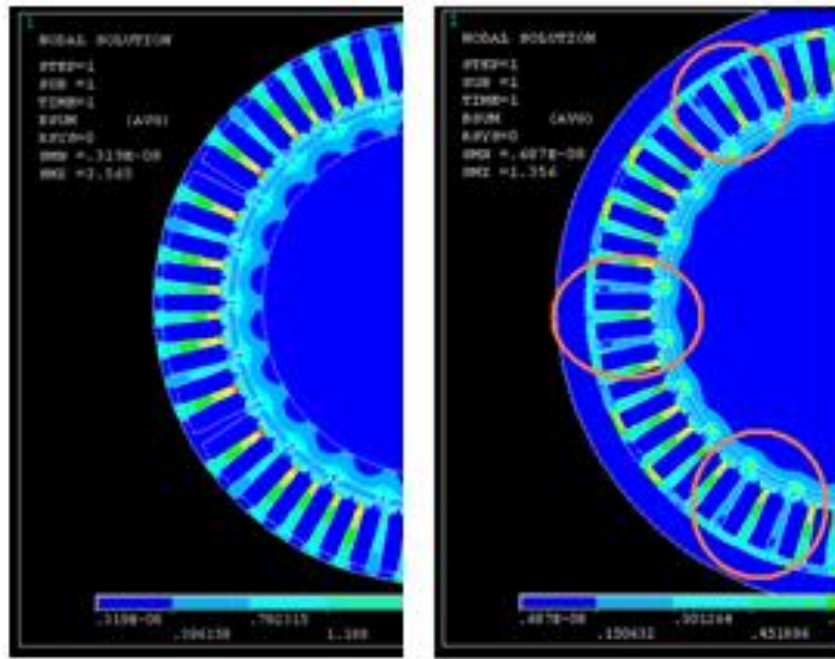


圖 3.10 磁通密度比較

(左)將轉軸挖控制厚度剩下 15mm

(右)轉軸不挖空情況

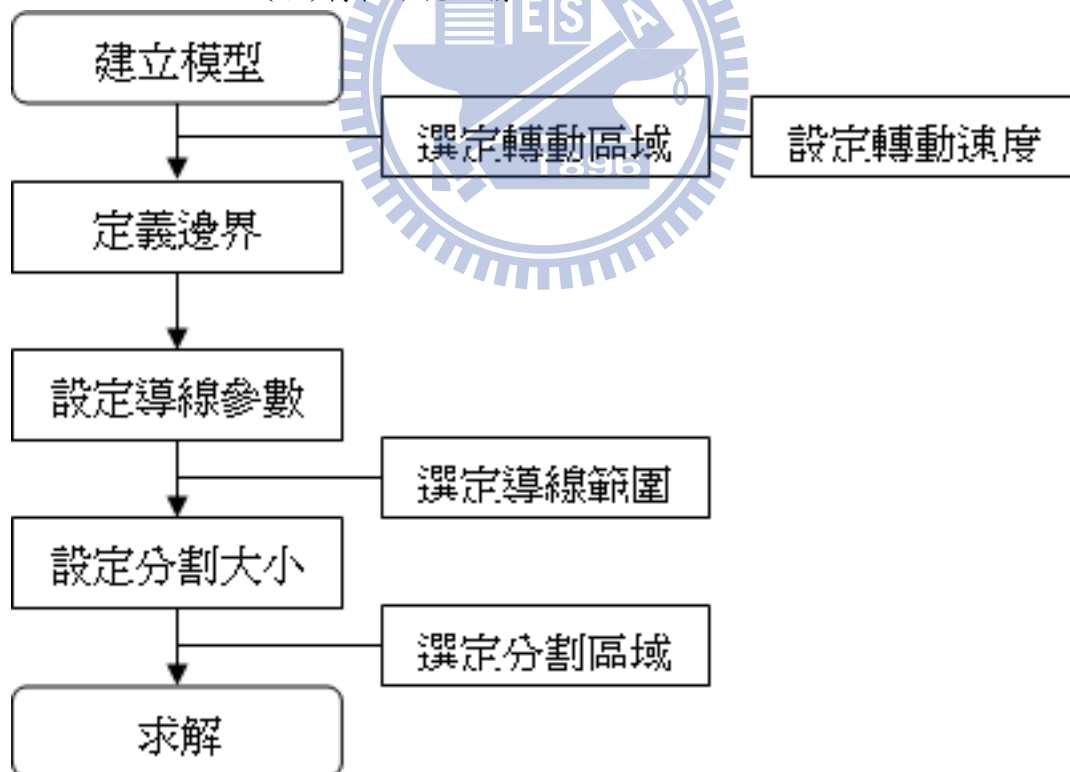


圖 3.11 Maxwell 暫態分析步驟

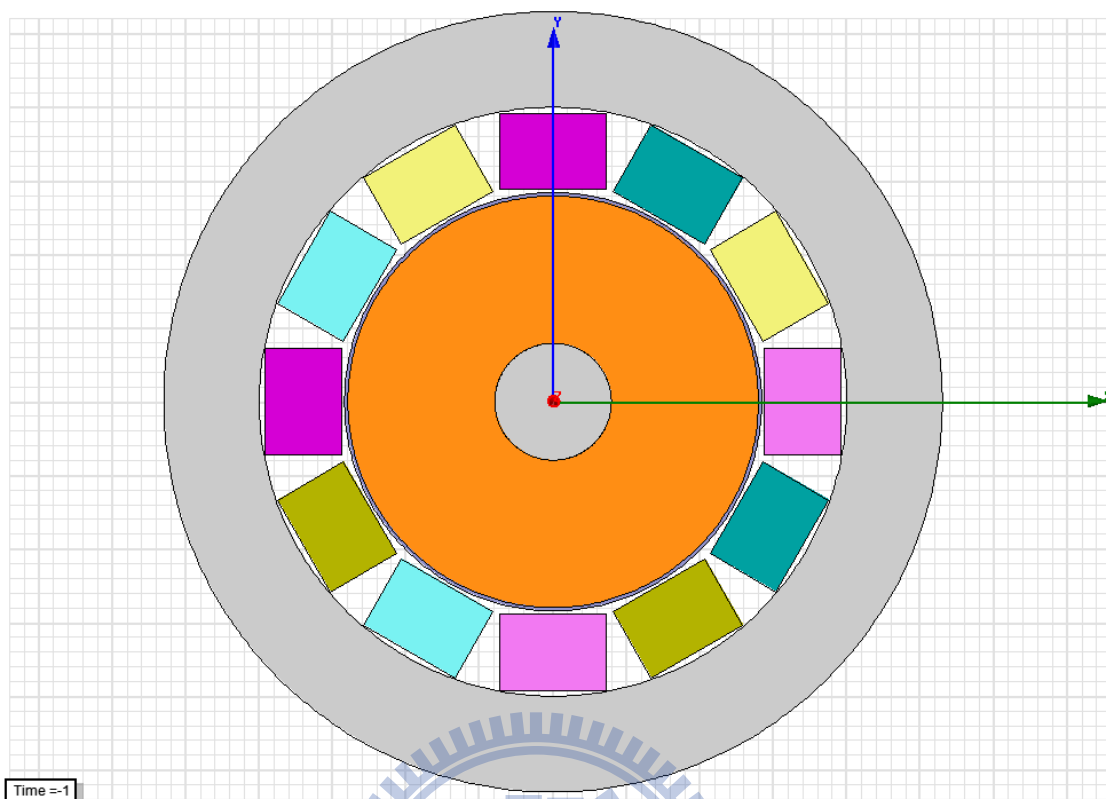


圖 3.12 小型永磁式發電機

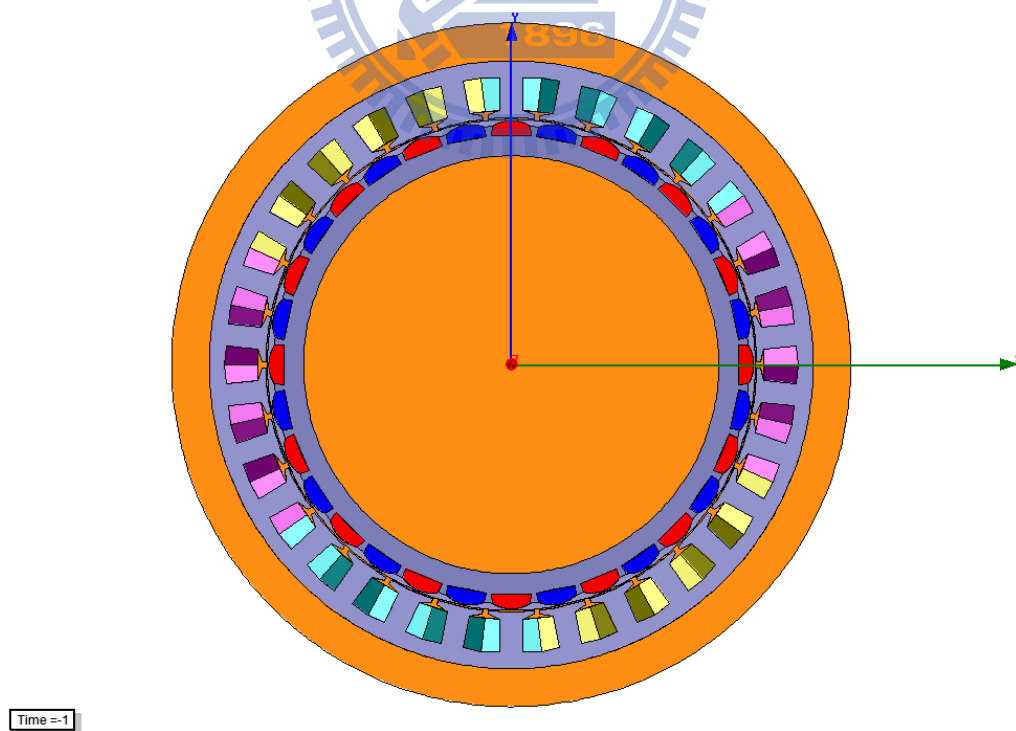


圖 3.13 1kw 永磁式發電機

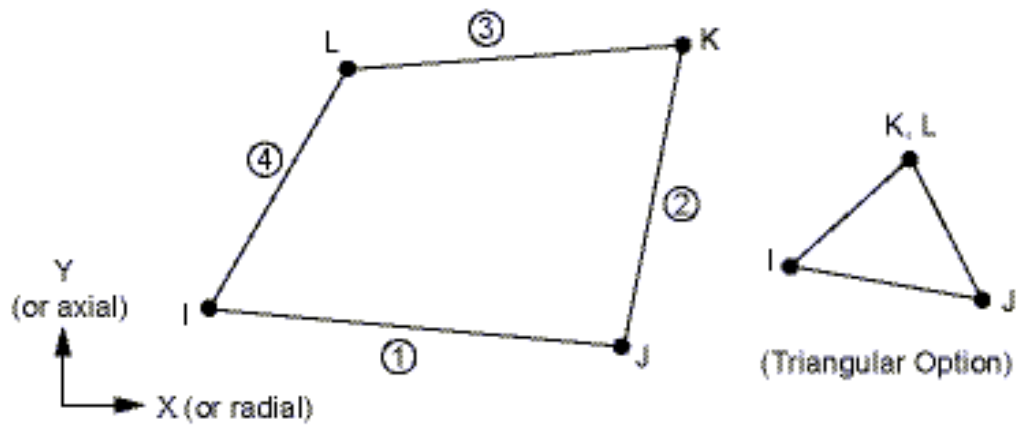


圖 3.14 plane55 元素

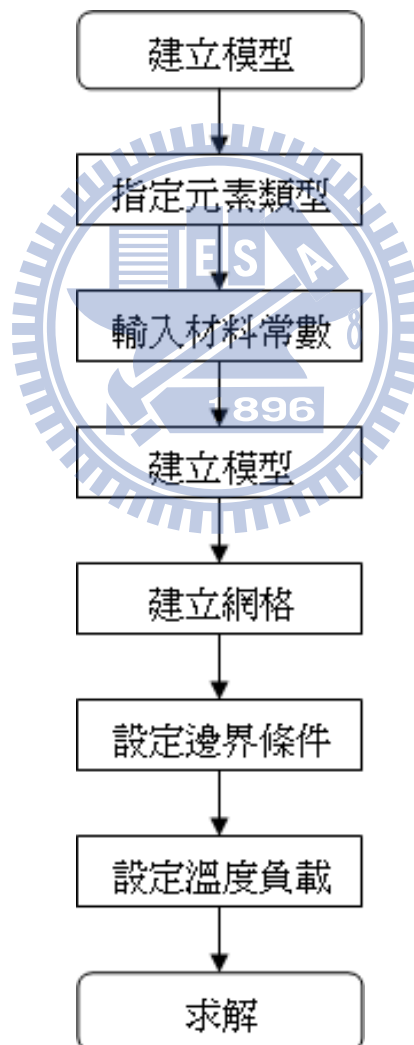


圖 3.15 熱傳分析求解步驟

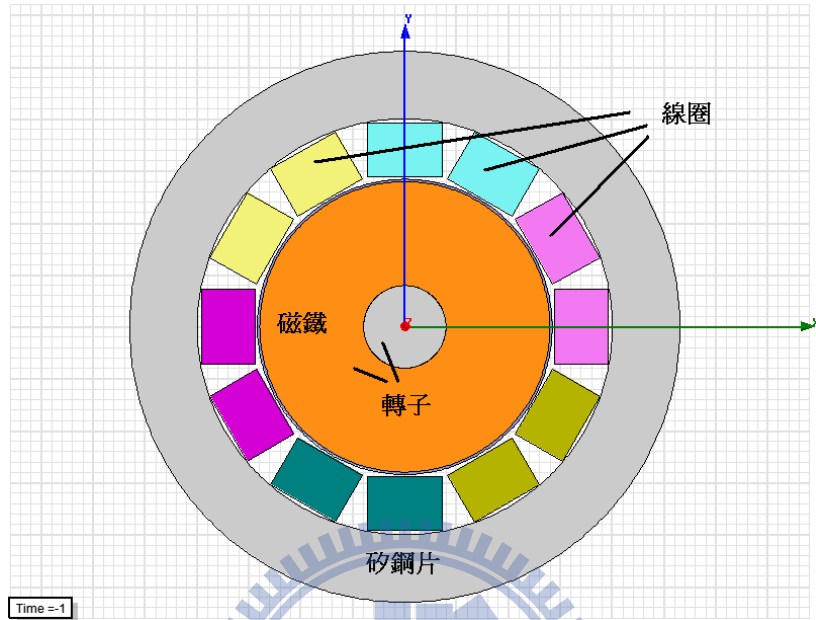


圖 4.1.發電機構造

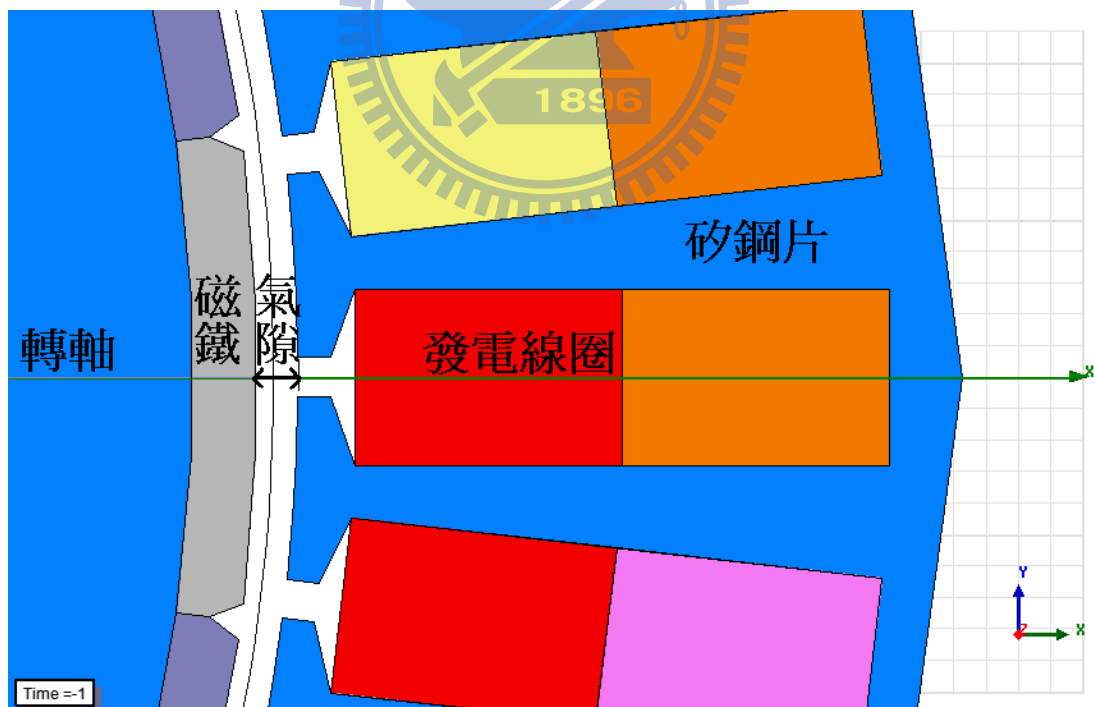


圖 4.2.氣隙與磁鐵和線圈的位置關係

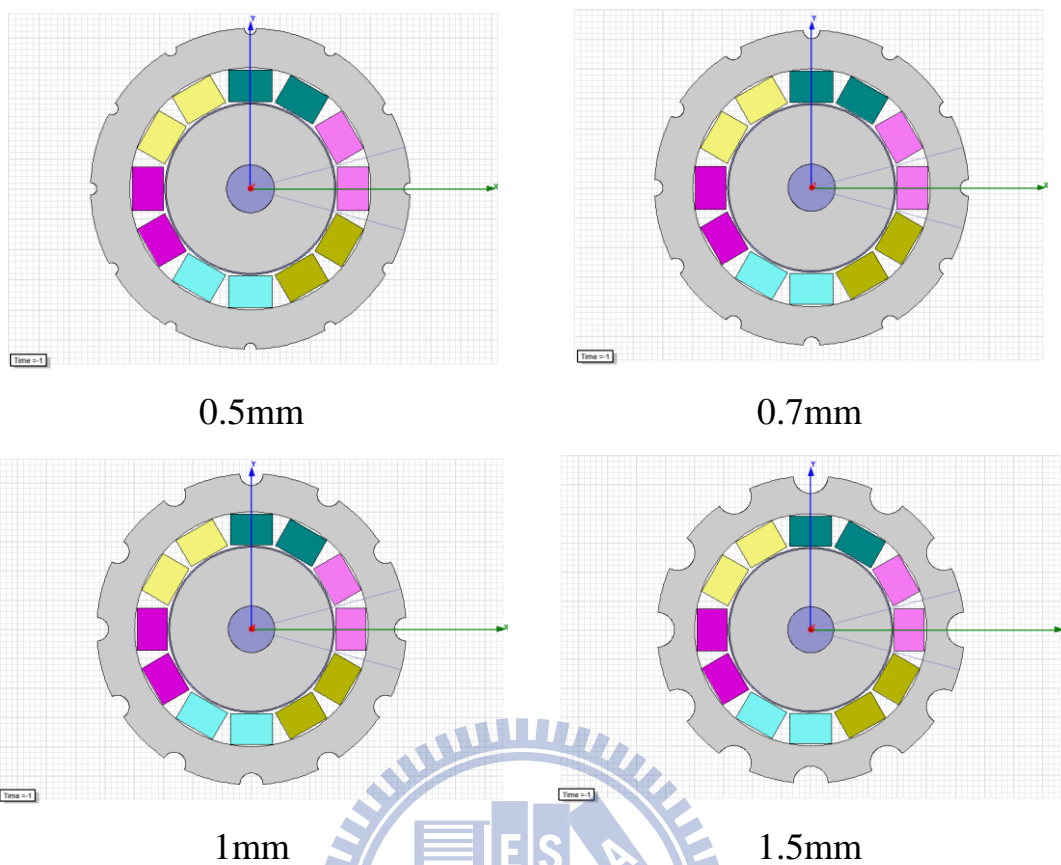


圖 4.3 發電機定子改良

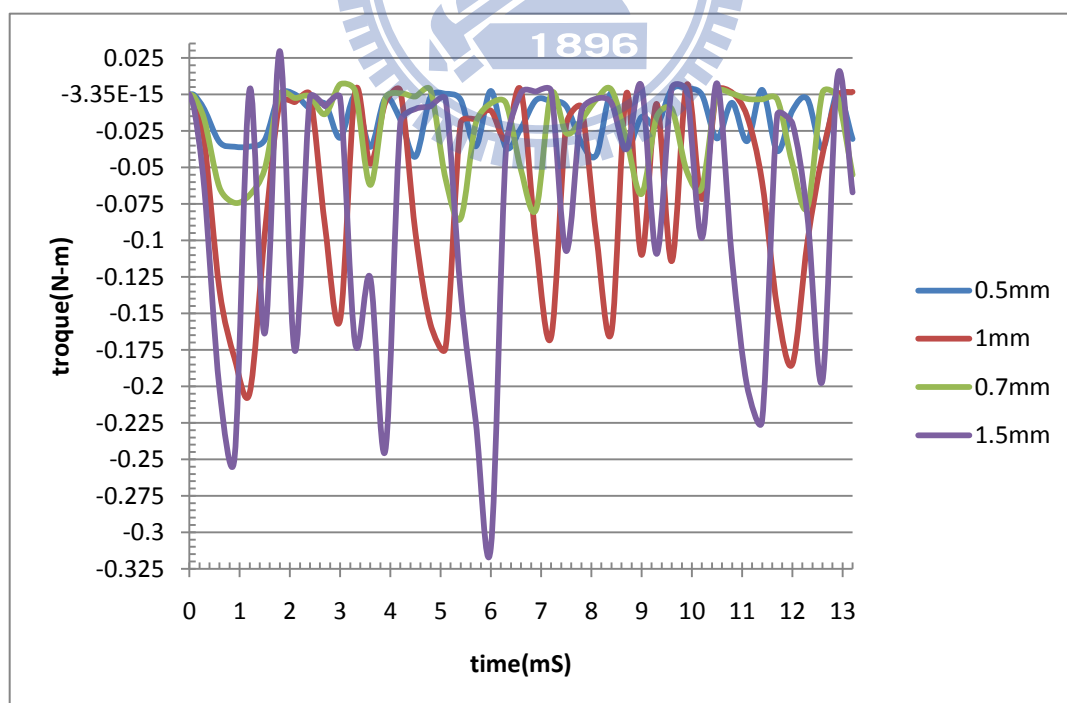


圖 4.4 扭力與時間關係

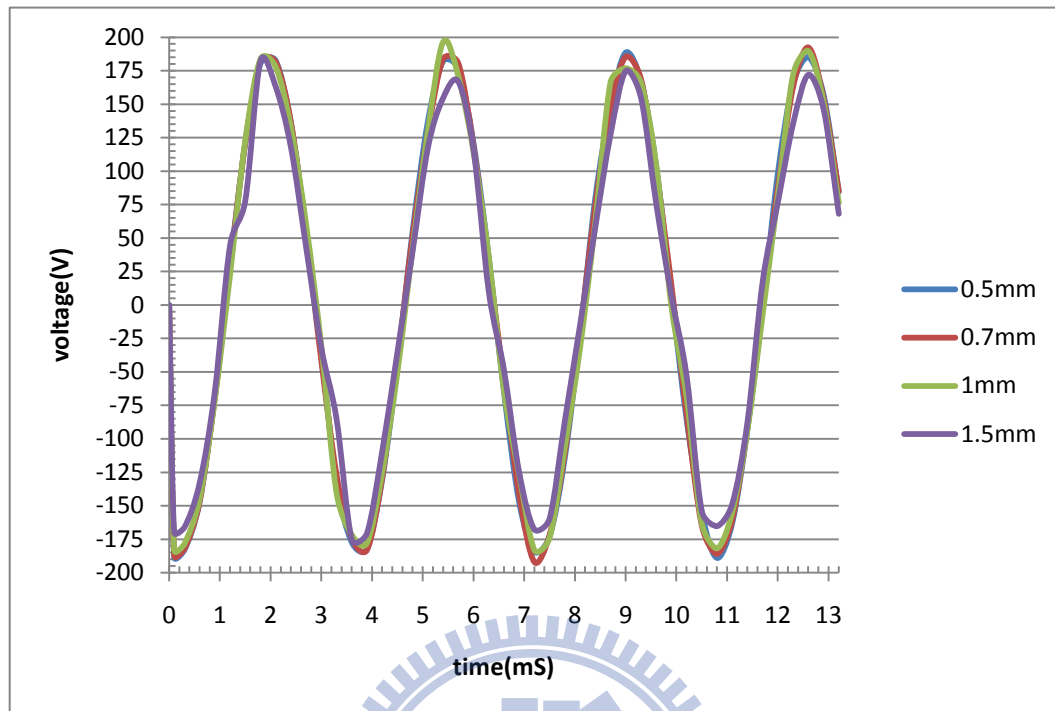
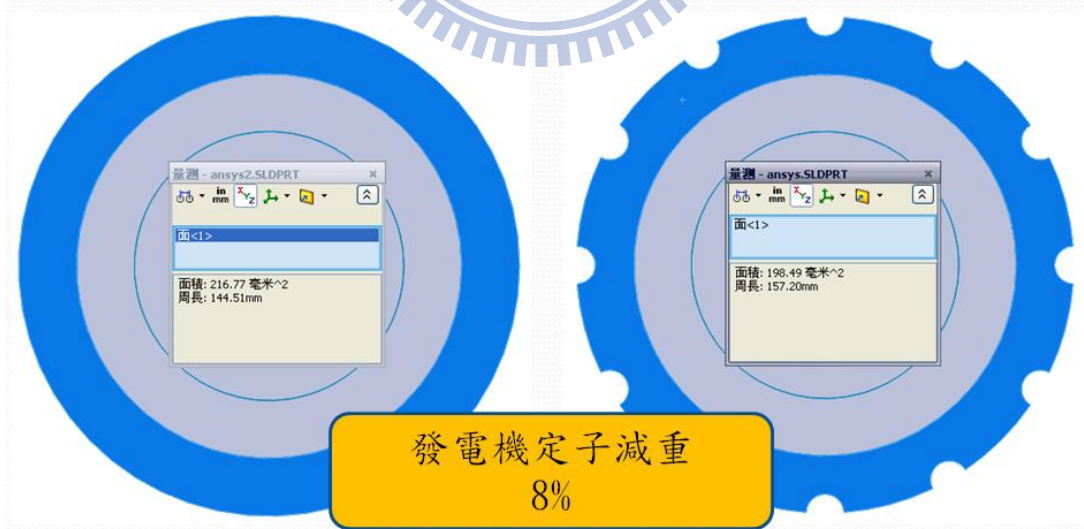


圖 4.5 電壓與時間關係

挖孔前

挖孔後



發電機定子減重
8%

圖 4.6 發電機矽鋼片減重

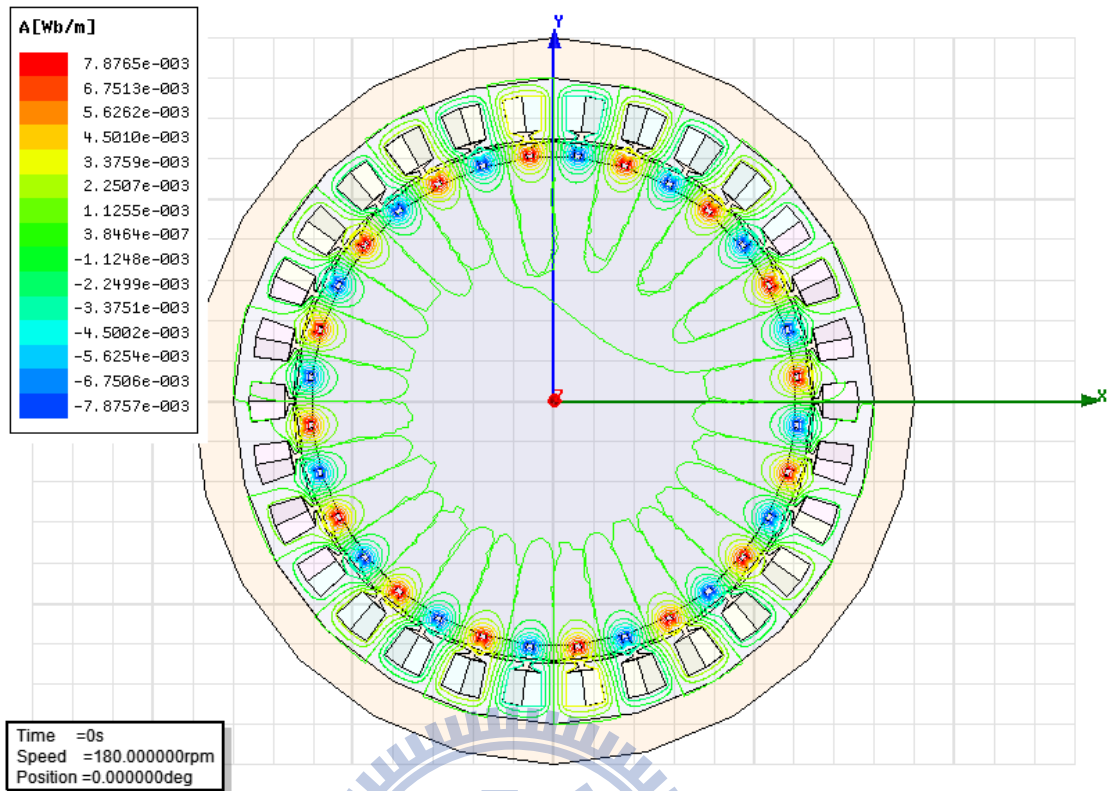


圖 4.7 發電機中心為實體軸

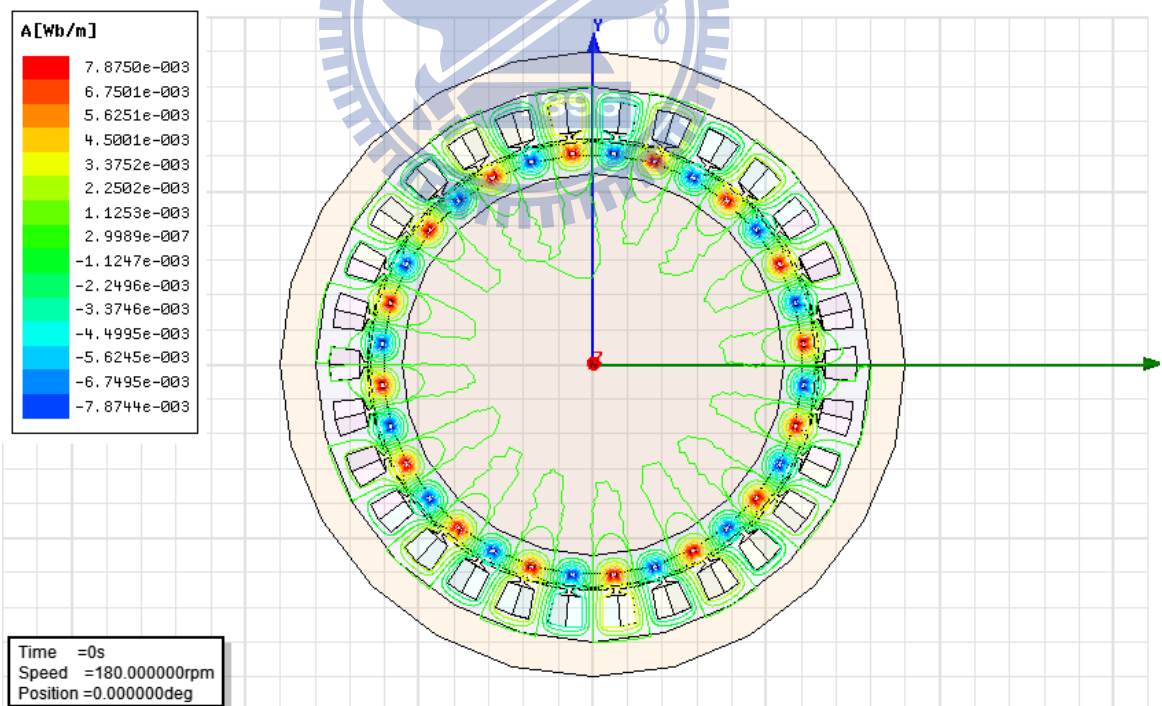


圖 4.8 發電機中心為空氣

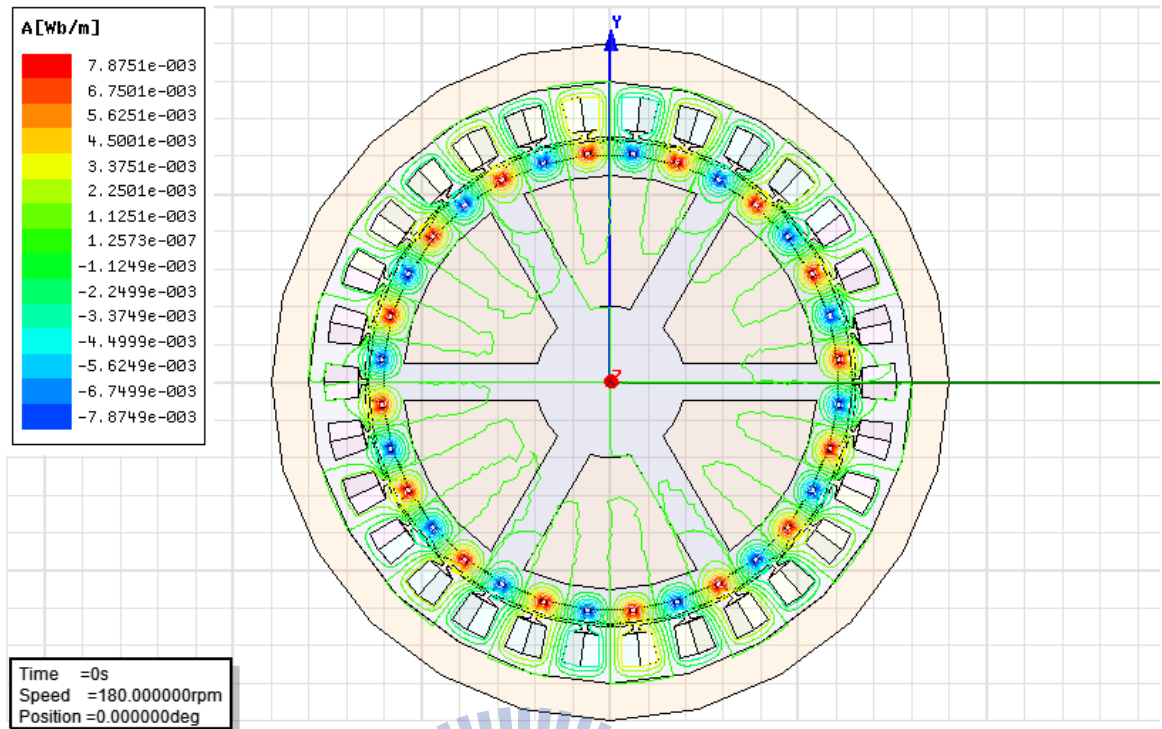


圖 4.9 發電機中心為矽鋼片支撐

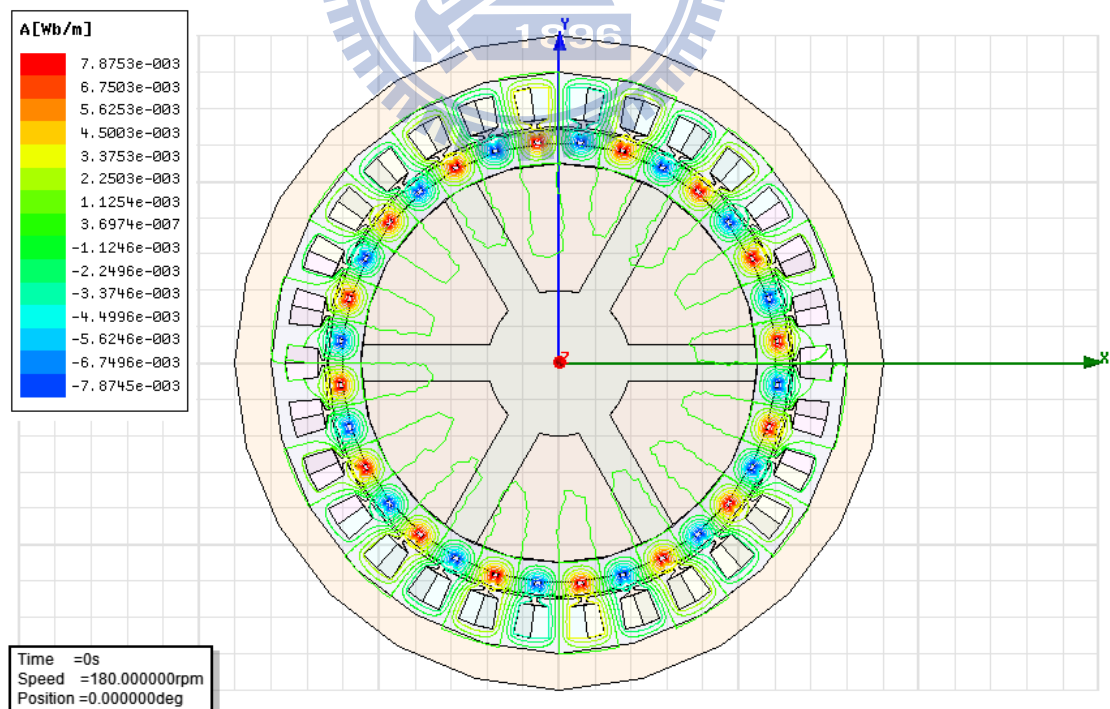


圖 4.10 發電機中心為鋁合金支撐

實心設計

肋條設計

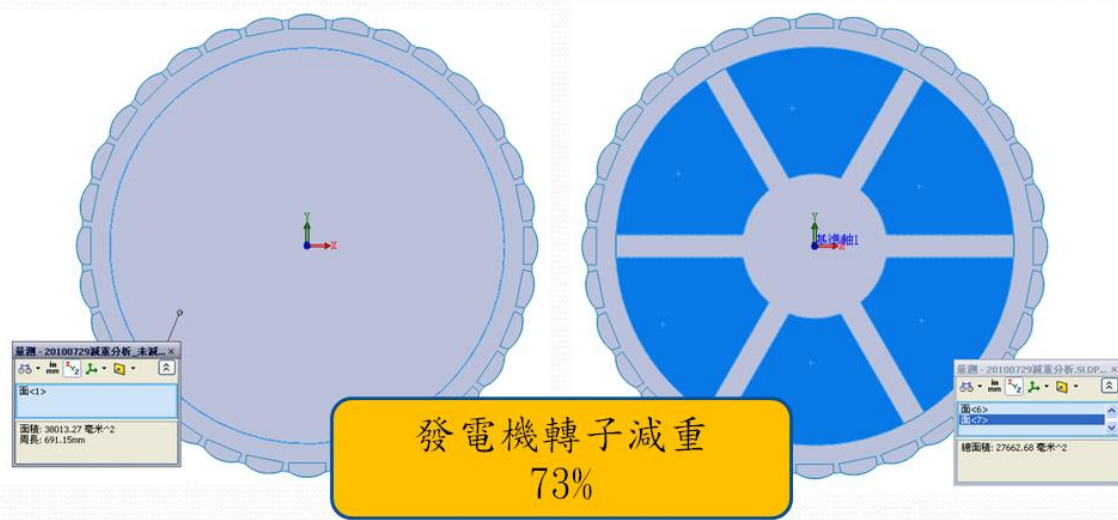
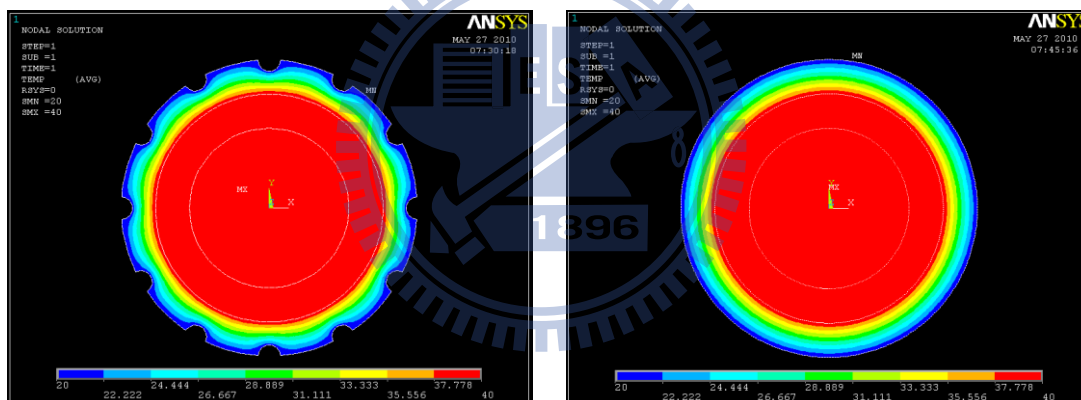


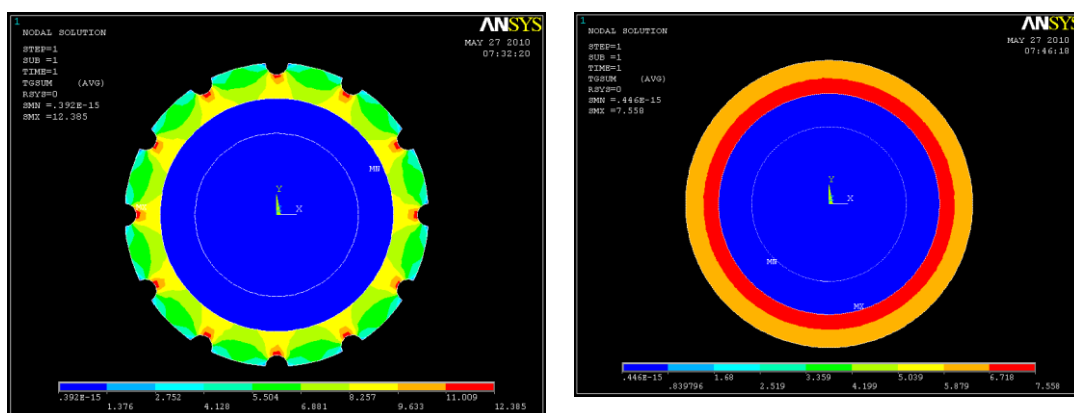
圖 4.11 發電機定子減重

外側有挖孔

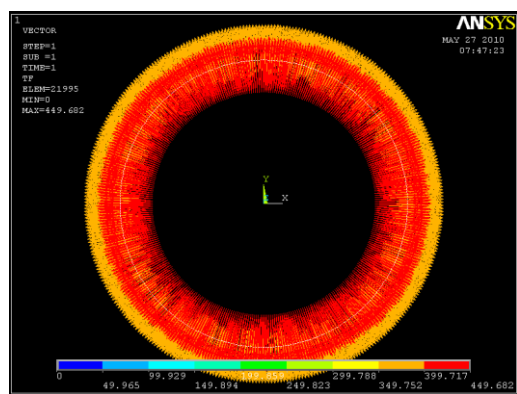
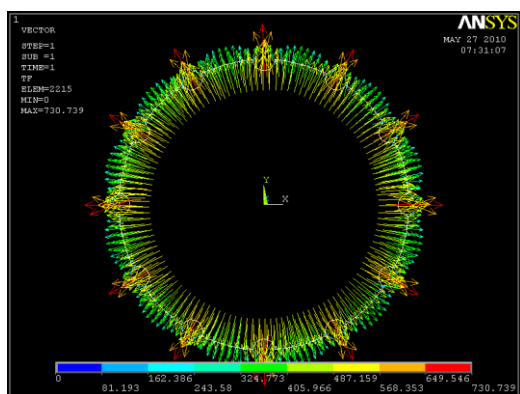
無挖孔



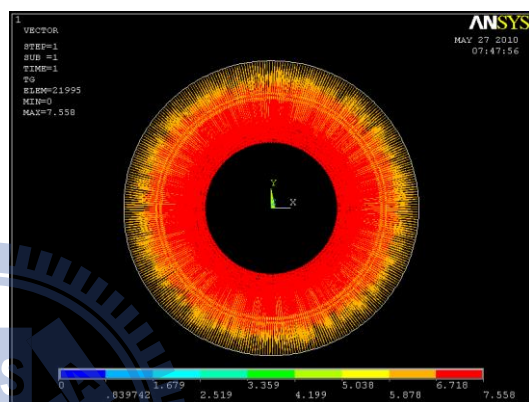
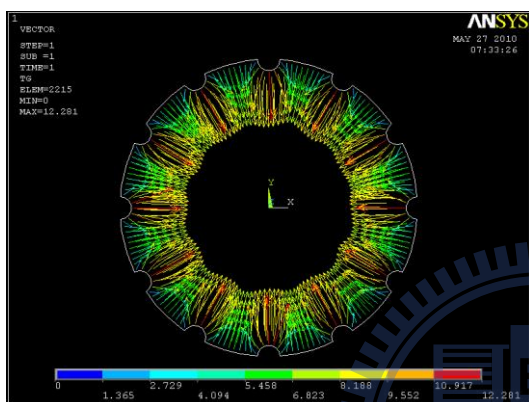
溫度分佈



熱梯度



熱傳向量圖



熱梯度向量圖

圖 4.12 發電機設計改良比較

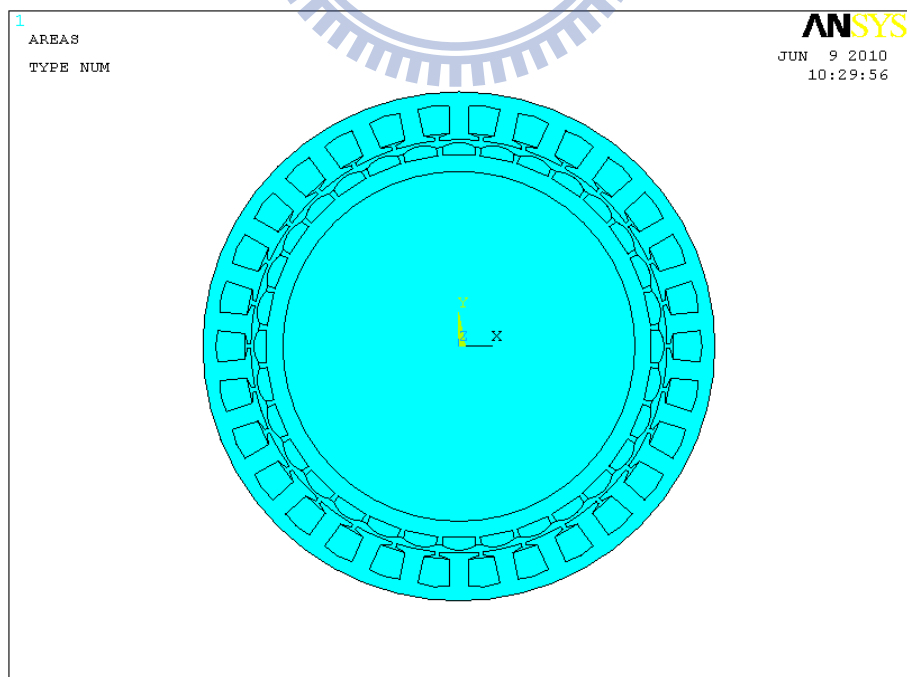


圖 4.13 台科大設計的發電機

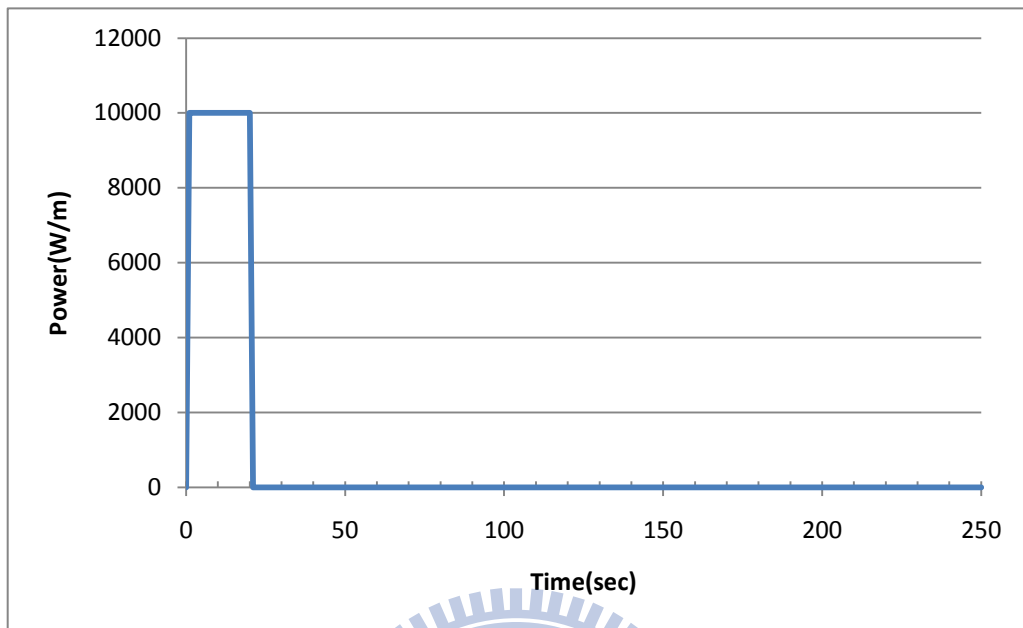


圖 4.14 輸入熱源與溫度關係圖

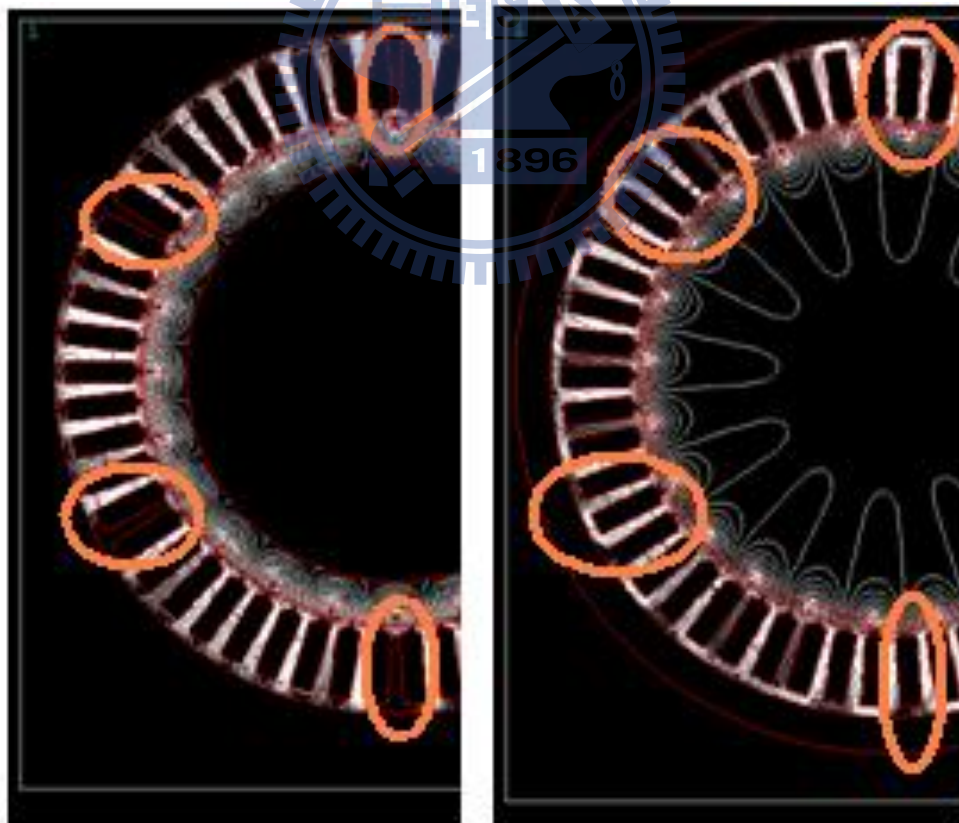


圖 5.1 旋轉不同角度的磁力線比較

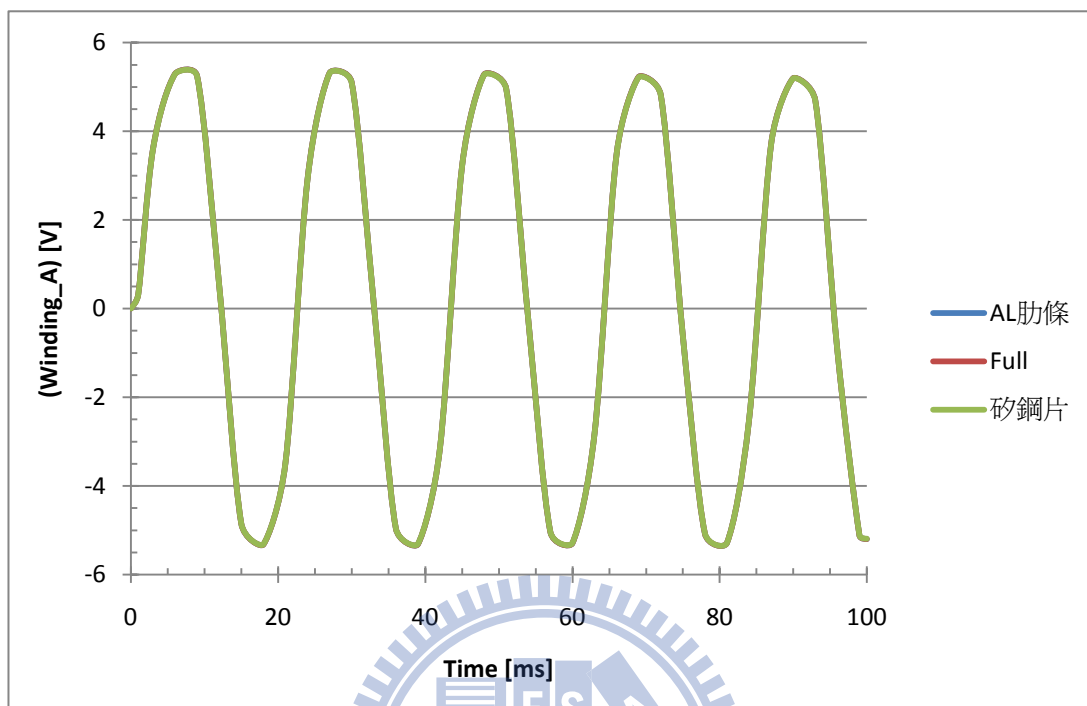


圖 5.2 發電機挖孔峰值電壓比較

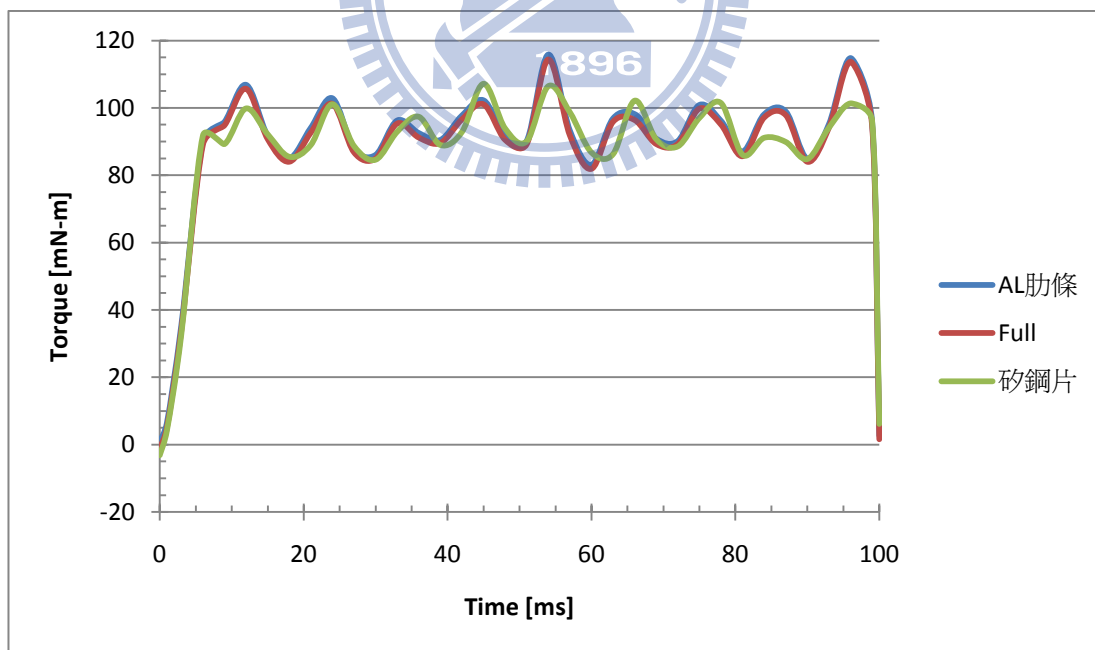
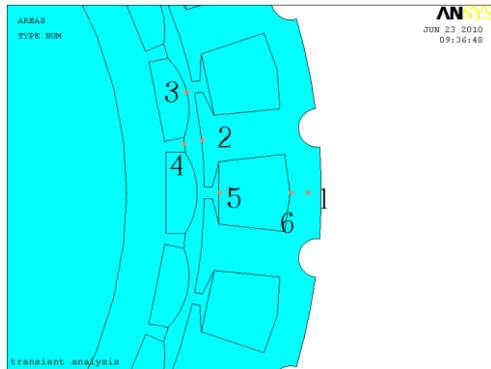
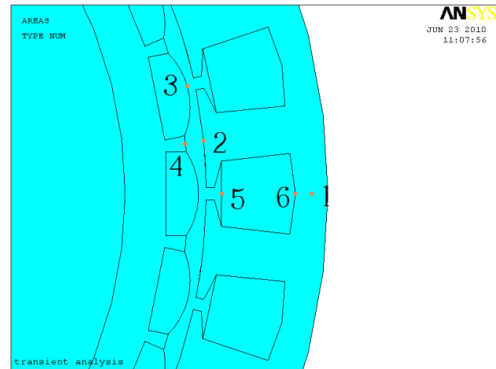


圖 5.3 發電機挖孔旋轉扭矩比較

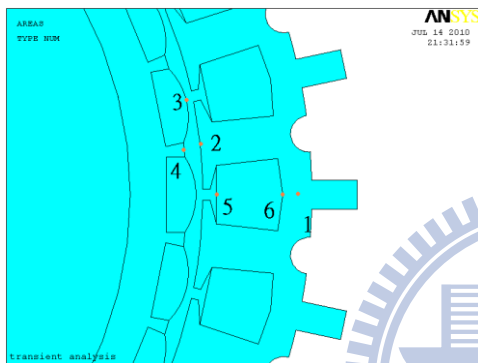
有挖孔



沒挖孔



有挖孔有加散熱鰭片



沒挖孔有加散熱鰭片

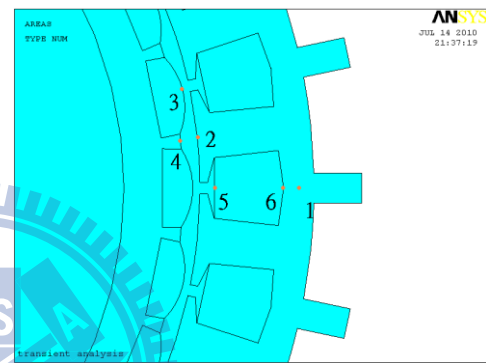


圖 5.4 溫度探討區域

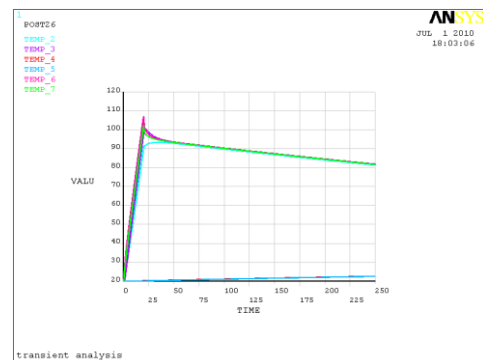
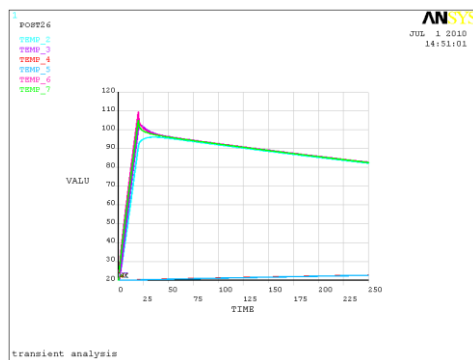
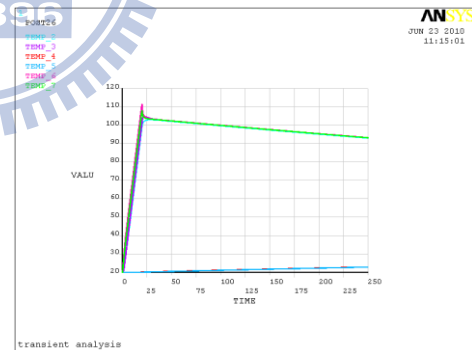
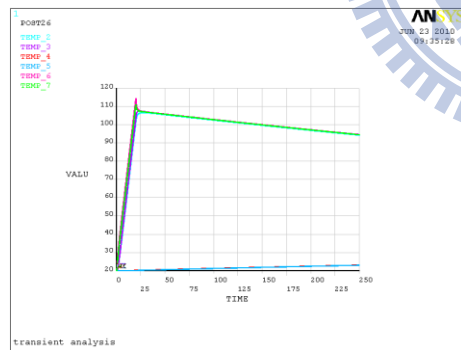


圖 5.5 溫度與時間關係

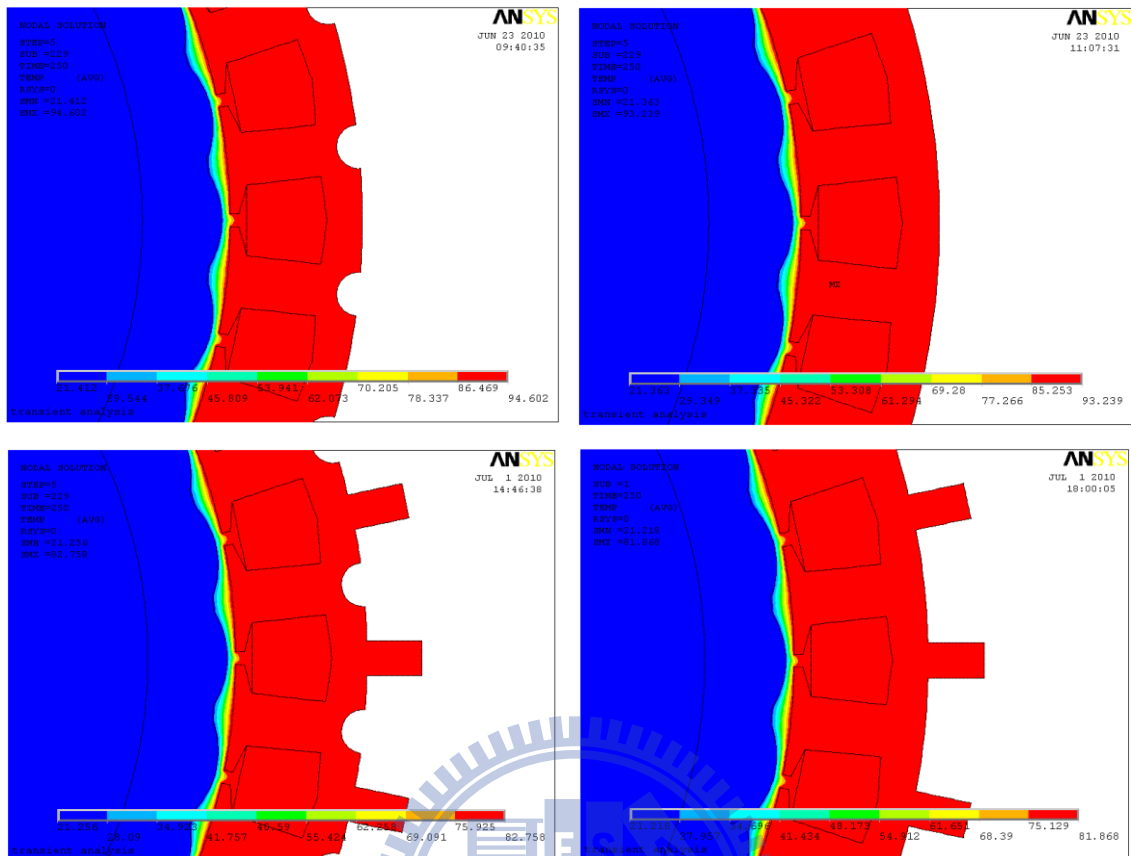


圖 5.6 第 250 秒溫度分佈

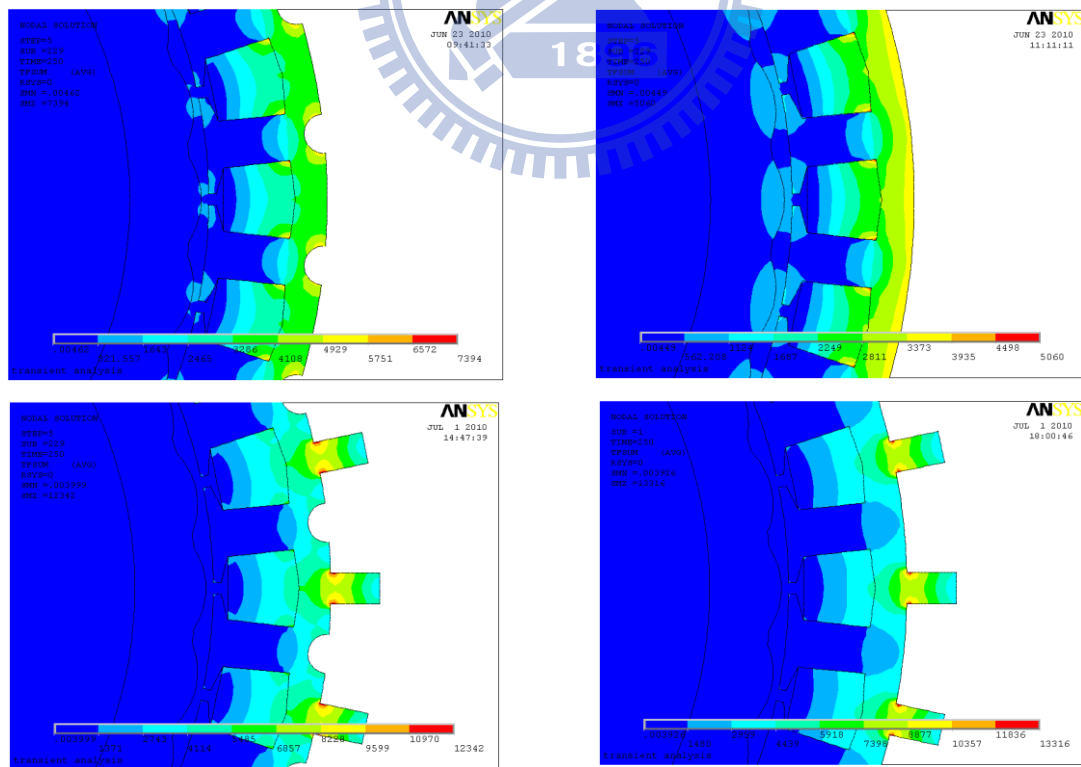


圖 5.7 熱梯度

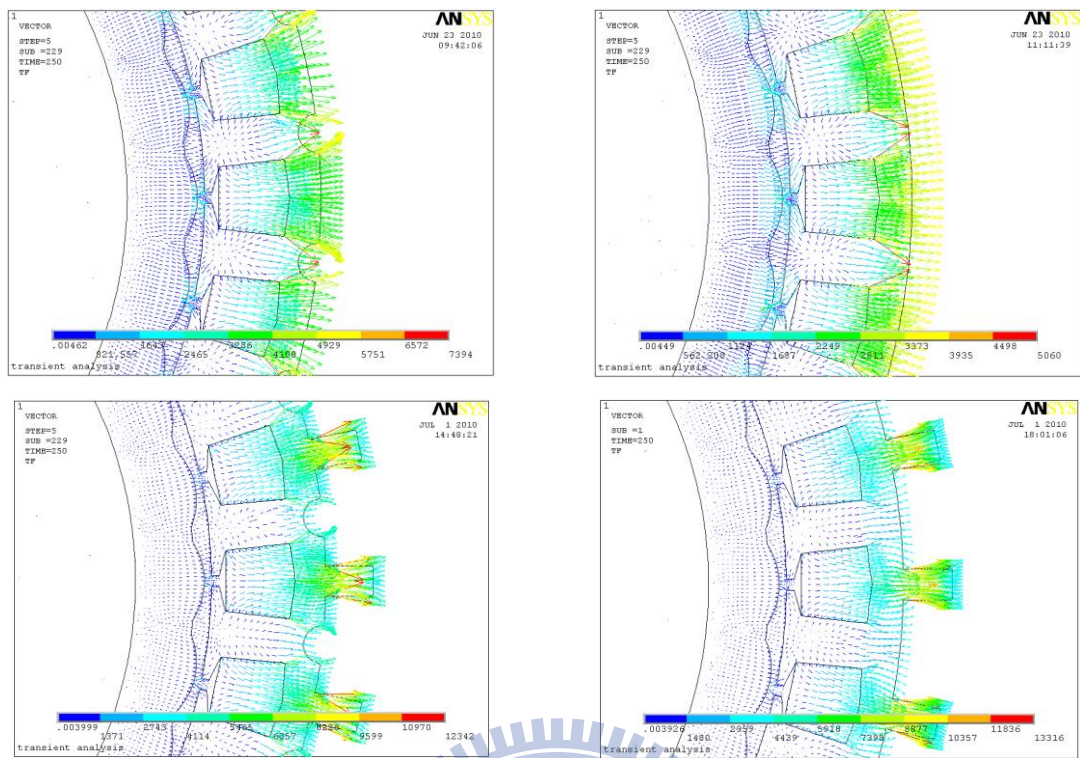


圖 5.8 熱傳向量圖

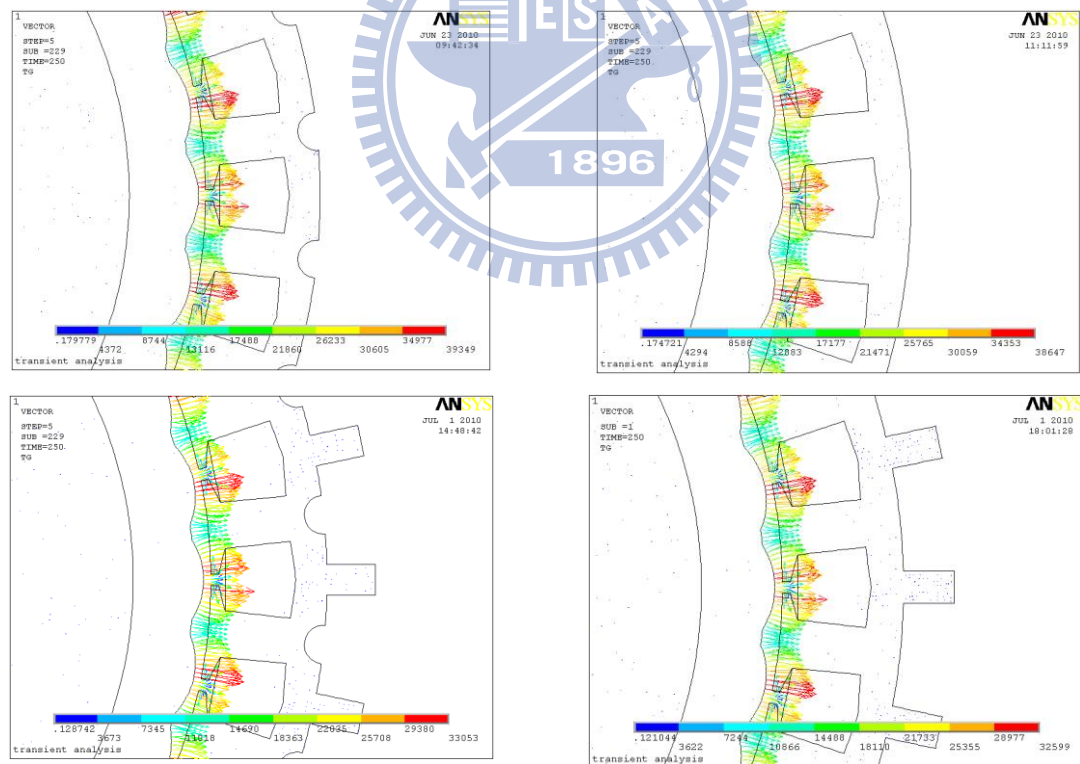


圖 5.9 熱梯度向量圖

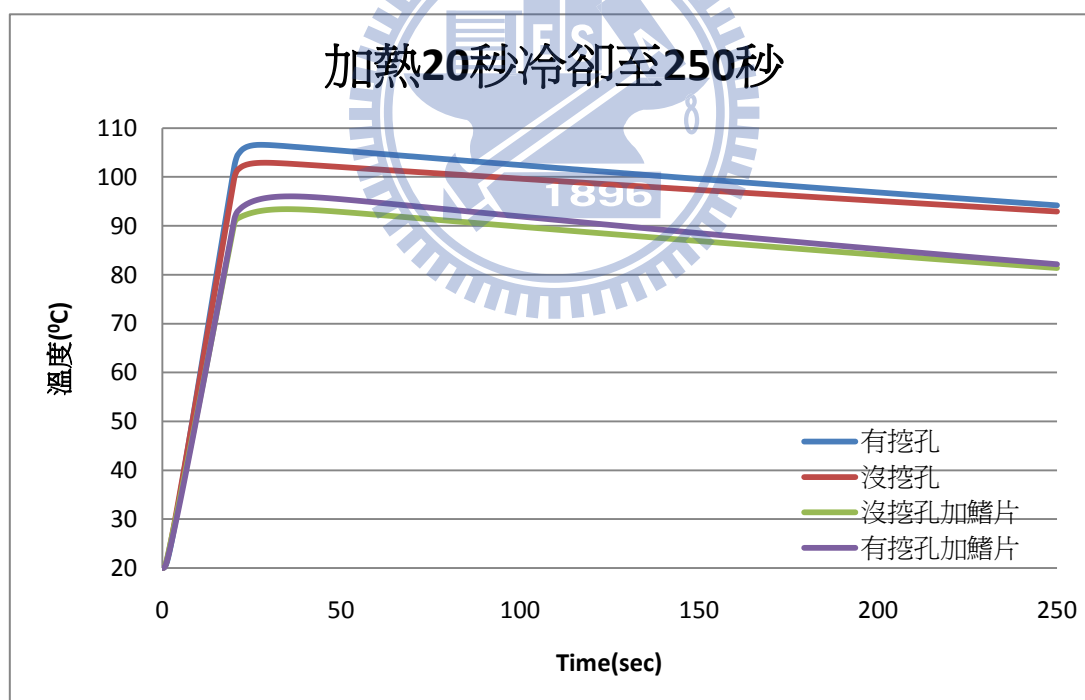
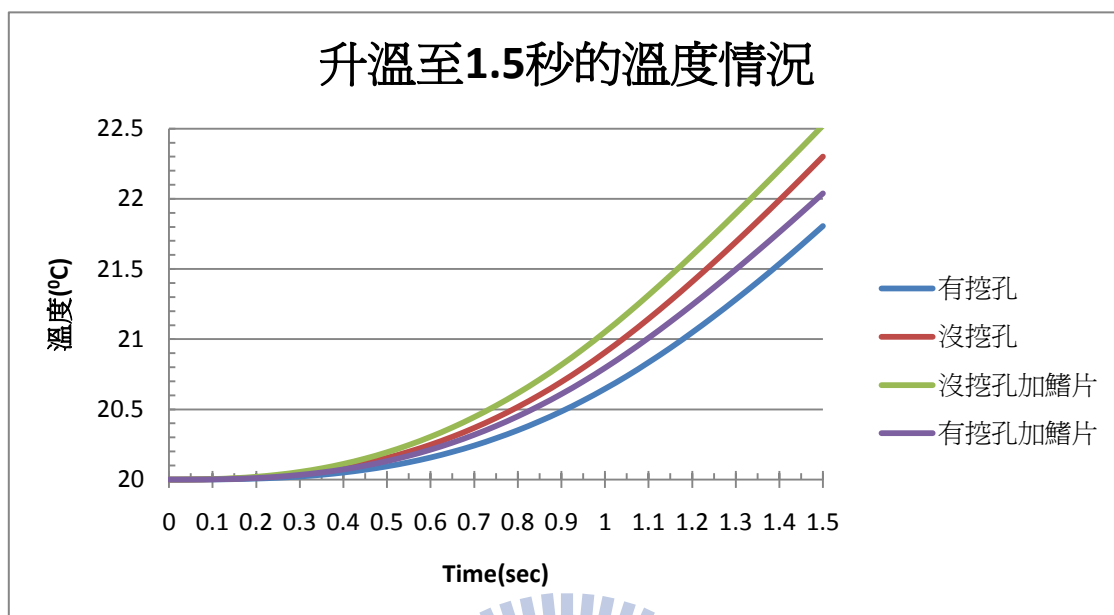


圖 5.10 單點溫度比較

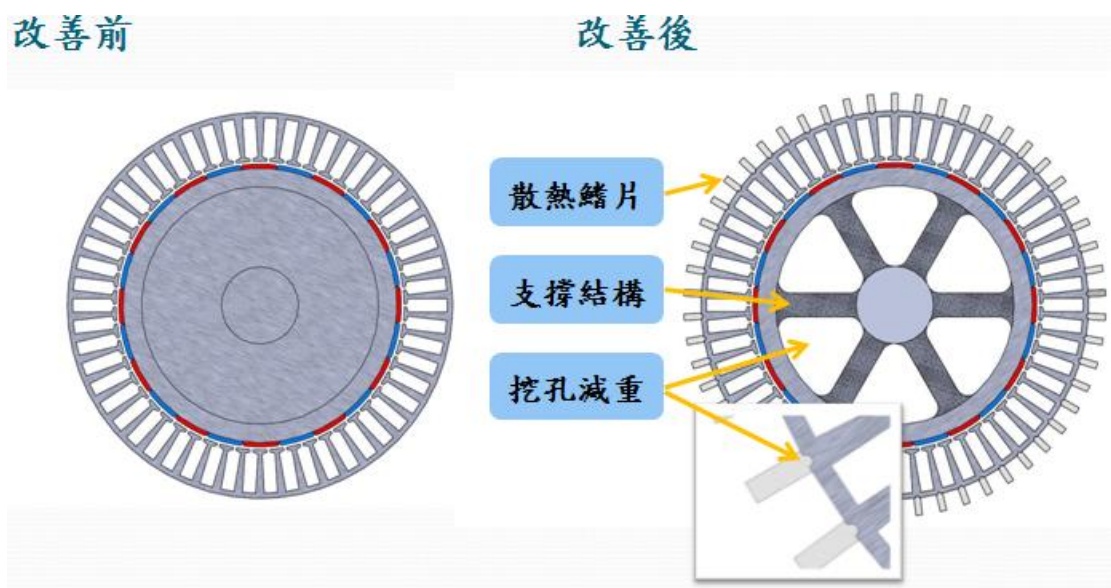


圖 6.1 發電機建議設計圖

