

汽車空調動力輔助馬達之設計與效能分析

石育岑¹、劉建章²、劉星鋒²、林克衛¹

¹財團法人車輛研究測試中心

²臺灣大學機械工程學系

摘要

傳統車輛的空調系統中，壓縮機所需之動力源為引擎運轉時透過曲軸皮帶來傳動。為解決車輛於怠速熄火期間，引擎停止運轉使空調製冷系統無法運作而造成車廂悶熱之問題，本文針對車輛怠速熄火時之空調驅動進行電動馬達設計分析。研究結果顯示，在馬達外部尺寸限制情況下，以徑向磁通式永磁無刷馬達來帶動空調壓縮機，可供應怠速熄火時的基本冷房需求，且以外殼自然空冷時，馬達可維持運轉180秒而不使線圈溫升過高。車輛於怠速熄火期間，本文所設計之馬達能據以提供適當之空調動力輔助。

關鍵字：車輛，馬達，空調，怠速熄火。

1. 前言

由於環保與能源問題成為世界關注的焦點，各國政府不斷投入大量資源實施獎勵措施、管制策略，以及開發各種替代能源車輛，使得提高能源效率、降低污染排放成為影響汽車業發展的關鍵因素，也為汽車空調業提出了新的課題與挑戰。

傳統車輛的空調壓縮機是由引擎透過曲軸皮帶來傳動，在引擎運轉時除提供車輛行進的動力，亦提供空調系統壓縮機所需的能量。因此當引擎熄火，車內空調則無法繼續供應。而大型車輛(如大貨車、大客車)之空調系統為獨立式空調，以輔助發動機作為動力源，其最大特點是致冷效果不受汽車行駛速度的影響，但空調系統的體積和質量較大，佈置較複雜，製造與使用成本較高，因此一般小客車並不採用此類空調系統。

在地處亞熱帶的台灣地區，車輛的空調尤其是冷氣的提供，對於使用者而言是不可缺少的配備。為使小客車在停車時或怠速熄火時仍可供應空調，可行的方案是採用電動空調或是電動輔助空調，這是指車輛的空調系統中，壓縮機的帶動不僅以引擎皮帶來驅動，需進一步藉由電動馬達來帶動，使車輛在引擎不運轉時，仍能透過電動馬達來使空調系統持續作用，以維持車內駕駛者或是乘員的舒適性。

1.1 引擎停止時的空調運作

當引擎停止運轉時，車輛的空調系統運作方式可依應用的車輛種類區分為下列三種[1][2]：

(1) 輕複合動力車輛(Micro-hybrids with stop & start)

此類型指配備有怠速熄火系統(Idle stop system)之傳統汽車，另配有啟動馬達(Starter)可使引擎自動從熄火狀態中重新啟動。其空調壓縮機仍以引擎皮帶來帶動，意即引擎熄火後也將不提供空調使用。或是當空調系統作用時，車輛便不會在怠速運轉時自動熄

火。

(2) 中複合動力車輛(Mild-hybrids)

複合動力車輛具有較高電壓的電源，其馬達可用來提供車輛行進之動力。若車上搭載混合式空調壓縮機(hybrid compressor/2-way driven compressor)，則可由電動馬達或引擎來驅動壓縮機，當引擎運轉時由引擎皮帶來驅動壓縮機，而引擎停止時，則由馬達來帶動壓縮機。

(3) 強複合動力車輛(Strong-hybrids)

電系規格大於100V以上的複合動力車輛，其空調系統可採用混合式壓縮機，由皮帶與馬達分別或共同帶動空調壓縮機；或是採用純電動壓縮機，由儲存在電池內的電力提供空調系統的電力來源，而不再使用引擎皮帶來驅動空調壓縮機，即使在汽油引擎沒有運轉的狀態下，仍能讓車內持續保持涼爽。

1.2 混合式空調的優勢

傳統汽車的空調系統是以電磁離合器的頻繁閉合，來使壓縮機開始或停止工作，以維持車廂內的溫度，無法根據致冷的需求而自動改變功率輸出，此對引擎油耗的影響很大。根據過去的研究顯示[3]，車輛使用空調會使油耗增加約12~21%。

日本 Denso 針對混合動力車設計一款可使用引擎皮帶帶動與馬達驅動的雙向混合式壓縮機(2-Way Driven Compressor)[4]。其壓縮機的動力切換策略，在車輛加速時，由引擎同時驅動車輛與空調壓縮機；車輛減速或引擎不運轉時，則改由馬達來帶動壓縮機。利用馬達驅動壓縮機可延長引擎停止運轉的時間，進而降低車輛的油耗。相較於傳統空調系統，透過混合式壓縮機的動力切換策略，可節省引擎的燃油消耗達8%。日本 Matsushita 的研究亦指出[5]，當車輛處於怠速熄火(Idle Stop)期間，藉由變頻控制技術，車廂溫度仍不致有太大的變化。Yuji 等人[6]亦研發混合動力式的空調壓縮機(Dual Scroll Hybrid Compressor, DSHC)，雙渦卷結構的設計使得在引擎皮帶帶動壓縮機時，冷煤排量為70 cc/rev，而馬達帶動時，冷煤排量可為15 cc/rev。此壓縮機除了可以分別由皮帶帶動或是馬達驅動外，亦可皮帶與馬達同時來帶動壓縮機，透過其控制模組的使用策略，可選擇最佳的驅動模式(皮帶或馬達)來降低壓縮機的功率消耗，以達到最大的省能效果。該研究亦比較使用 DSHC 與變排量壓縮機(Externally Controlled Variable Displacement Compressor, ECVC)的燃油消耗，結果顯示在市區行車型態下，DSHC 的燃油消耗較 ECVC 明顯低約20%以上；高速行車型態的差異較小，但 DSHC 的燃油消耗仍優於 ECVC，顯示藉由馬達驅動壓縮機控制策略的使用，可有效降低空調系統的能量

損耗。

由以上的研究可知，使用電動馬達來帶動車輛的空調壓縮機或是以混合動力方式來驅動壓縮機，除了可有效降低空調系統的能耗，更針對未來車種的動力來源提供因應策略。

2. 研究方法

車輛在怠速熄火期間，由於引擎停止運轉使得空調系統無法運作，而造成車廂悶熱的問題。若使用電動馬達來作為車用空調壓縮機的輔助動力，為可行的解決方案，並可提高傳統車輛搭載怠速熄火系統的接受度。本文針對車輛怠速熄火時的空調驅動進行電動馬達設計分析，分別探討空調壓縮機的消耗功率與適當的馬達性能與規格，圖1為本文在進行空調壓縮機驅動馬達設計模擬的分析流程。

2.1 壓縮機的驅動扭力

傳統車用壓縮機所需的功率來自於引擎提供，其功率消耗可由廠商提供之壓縮機性能曲線得知。本文在進行馬達設計時，設定的壓縮機型式為傳統定排量壓縮機，冷煤排量(Capacity)約介於140~180 cc/rev.之間。以馬達來驅動空調壓縮機時，須先獲得壓縮機所需的扭力大小，此為空調運轉時，壓縮機的啟動扭力與不同轉速下壓縮機所需的輸入扭力大小，一般壓縮機所需的扭力約在14~17 Nm之間。壓縮機的扭力可由性能曲線上轉速與消耗功率計算而得，圖2所示為Sanden市售兩款壓縮機的力矩變化，由圖可看出扭力大小在12 Nm以上。本文之馬達設定在轉速1000 rpm運轉時，其驅動壓縮機之冷卻量僅用以維持車廂內溫度，因此馬達的輸出扭力設定在13 Nm以上。

2.2 驅動馬達設計

Denso 所發展的雙向混合式壓縮機[4]採用直流無刷馬達(DC Brush-less Motor)來驅動，為表面永磁型(Surface Permanent Magnetic, SPM)，線圈則使用集中繞組(Concentrated windings)的方式，具外轉子結構。過去 Makino 等人[7]亦曾針對車用空調壓縮機設計驅動馬達，使用稀土磁鐵(Rare-earth magnets)與集中繞組的方式，相較於傳統馬達可縮短總長度達20%，並降低15%的重量。

本文進行馬達設計模擬時，在經過設計評估後，先比較軸向與徑向磁通馬達的特性，如圖1所示，選定適用的馬達型式，並探討不同齒極比的影響。接著使用有限元素分析軟體(ANSOFT Maxwell)進行最佳化設計，以獲得可符合性能需求的定轉子尺寸與磁鐵材料。最後進行整體馬達的熱分析，使用COSMOS FLOWWORKS做有限元素分析，探討馬達在一定的運轉時間內，其溫度變化的情形，並可藉以設計馬達外殼的散熱方式，確保馬達在運轉時不會因為銅線溫度過高而損壞。

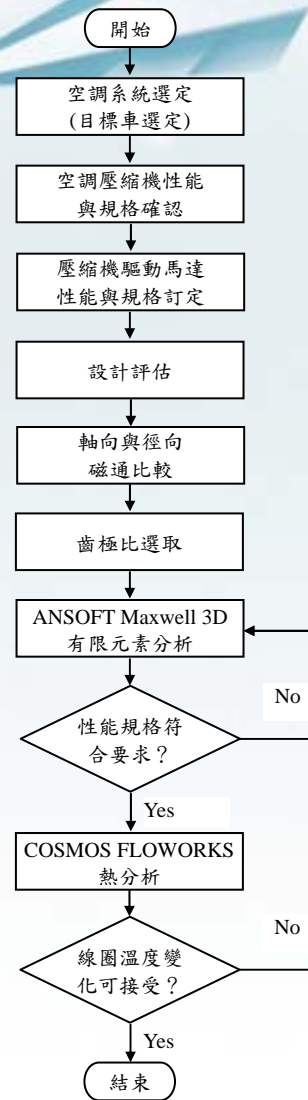


圖 1: 壓縮機驅動馬達設計分析流程。

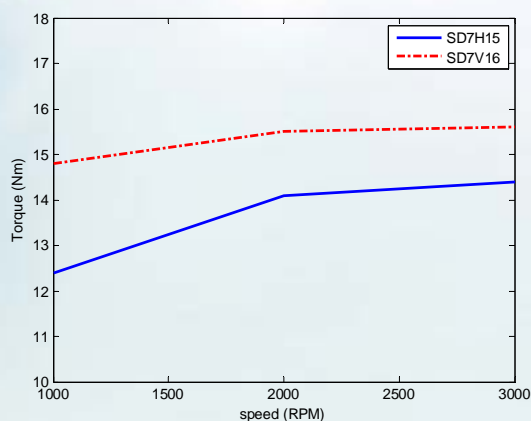


圖 2: 壓縮機轉動力矩的變化
(冷煤進/出口壓力 1.6 MPa / 196 kPa (gage))

3. 分析方法與條件設定

3.1 規格與設計評估

車輛的空調壓縮機位於引擎室內，若欲設計電動輔助空調之驅動馬達需考慮可架設的空間，因此在尺寸大小與輸出力矩要求的限制下，可訂出壓縮機驅動馬達的基本規格如表 1 所示，此亦為設計時的參考依據。評估內容說明如下：

表 1: 馬達設計規格與運轉條件設定。

	項目	規格
馬達 基本 規格	平均輸出力矩	13 Nm 以上@1000 rpm
	額定電壓	24 V
	最大電流(rms)	100 A 以下
	直徑	100mm 以下(不含外殼)
	定子繞線	三相 Y 接
馬達 運轉 條件	啟動條件	引擎急速熄火後
	最大轉速	1200 rpm
	運轉時間	180 sec 以內
冷房 能力 設定	壓縮機類別	定排量
	冷煤排量	140~180 cc/rev.
	冷卻量*	1~3 kW

* 壓縮機轉速在 1000 rpm 的冷卻量，依冷煤排量而定。

3.1.1 馬達在尺寸上的限制將影響力矩輸出之表現

馬達體積對於力矩輸出大致上成正比關係，可表示成下列方程式：

$$T = kr^2L \quad (1)$$

其中 k 為受材料參數影響之變數， r 為轉子半徑， L 為馬達軸向長度即馬達厚度。

馬達輸出力矩的設定則考慮驅動壓縮機的需求，應配合壓縮機型式，在直徑與厚度的限制之下，

以馬達尺寸參數為考量來提昇馬達力矩輸出，最直接的作法為增加轉子半徑。在設計時，本文固定馬達最大外徑為 100 mm，這與車用壓縮機的外徑相當，再調整其他參數，以尋求最佳的馬達參數組合。

3.1.2 額定電壓對馬達轉速性能之影響

空調系統的冷卻量與壓縮機的轉速相關，須先考慮車廂內的冷房需求，才能訂定馬達的最大轉速。本文所設定的運轉條件為車輛在急速熄火期間，此時空調系統的運作是用來維持車廂內的溫度，因此設定馬達維持在 1000~1200 rpm 之間運轉，表 1 中同時列出本文所設計之馬達在運轉條件上的設定。

此外，馬達反電動勢隨馬達轉速增加而上升，當反電動勢峰值到達額定電壓時，電流輸入的波形會產生改變，使得力矩對轉速的關係中由定力矩區間進到定功率區間，將限制馬達轉速之提升。為使馬達在高轉速時，依舊能有高力矩輸出的能力，反電動勢峰值在最大轉速時不能超過額定電壓。以 24 V 的供應電壓來說，最大轉速在 1200 rpm 已算是相當高速，若是採用減少馬達各齒上的繞線匝數來降低反電動勢，則會影響最大轉速時的力矩輸出需求，甚至有可能使力矩輸出不足以驅動壓縮機。所以，在設計上可利用繞組並聯的方式，避免馬達線圈產生之反電動勢因串聯而累加在一起，但此做法也會使馬達輸入的總電流增加。

3.2 軸向與徑向磁通式馬達比較

由於結構上的不同，軸向磁通式馬達轉子在轉動時，轉子外側在軸向會有較大的偏移，因此為避免定轉子互相撞擊，氣隙長度的增加是必要的，但也會佔去過多的馬達厚度。此外，在相同條件下，軸向磁通馬達的力矩小於徑向磁通馬達，且電動輔助空調馬達的構造並不需要非軸向磁通式馬達不可，因此考慮尺寸上的限制，本文選用徑向磁通式馬達來進行設計。

3.3 齒極比選取

本文設計的馬達為 9 齒 8 極，齒極比的設計是依據下列幾點來選取：

(1). 繞線空間

在最大外徑不得超過 100 mm 與三相驅動的限製下，9 齒的繞線空間比 12 齒來的充裕，且齒寬較寬，磁通較不易飽和，所以可以有較多的磁通來提高平均力矩。

(2). 額定轉速與力矩輸出

雖然 6 齒繞線空間較多，但是線圈匝數太多會使反電動勢提高，降低額定轉速。另一方面，使用較粗的銅線雖可提高電流，但會因此浪費齒槽空間，單齒磁動勢 ($F = Ni$) 不增反減，反而使力矩輸出降低。

(3). 力矩漣波

當馬達旋轉時，轉速跟力矩會產生不穩定而有漣波現象，稱為力矩漣波 (Torque Ripple)，會使馬達運轉不平順，因此力矩漣波愈小愈好。齒極比接近的馬達，其力矩漣波較小，輸出力矩值越大。

綜合上述原因，9 比 8 的齒極比是在本文設定的尺寸、力矩輸出和轉速規格條件下，最合適的選擇。另外由於 9 齒 8 極的力矩漣波很小，所以可以不必特地設計齒鞋來減少漣波，減少齒鞋所省下的空間可以用來增加轉子半徑，提昇力矩輸出。也就是說可以使用較少的線圈匝數，來達到所要的額定力矩，而線圈匝數的減少可以降低反電動勢，馬達最大轉速也可以跟著提升。

4. 研究結果

為解決在引擎熄火時車內無空調可用的問題，本文藉由探討影響馬達設計的因素，期能在有限的尺寸限制下，找出適用於驅動車輛空調壓縮機的馬達特性，提供車輛在怠速運轉時另一驅動空調的動力來源。

本文以前述之設計評估，選用 9 齒 8 極、無齒鞋的徑向磁通式馬達做為設計基礎，利用 ANSOFT Maxwell 3D 有限元素電磁分析軟體，對馬達定轉子背鐵厚度、氣隙長度、轉子半徑、永久磁鐵厚度、齒寬和線圈匝數等參數做最佳化設計。

所獲得的馬達設計參數如表 2 所示，由表可知馬達外徑為 100 mm，厚度則為 50 mm。在轉子結構上，為使高速運轉時永久磁鐵不會脫離轉子，轉子外型的设计和一般表面貼磁式馬達有部分差異，圖 3 為馬達結構立體圖，可看出和永久磁鐵接觸的地方總共有三個面，塗膠的面積增加，且馬達運轉時所產生的切向力也由轉子凸出的部分吸收，如此永磁更能有效的固定在轉子上不脫離。由於齒極比的關係，無齒鞋的設計對力矩漣波亦沒有太多負面的影響。另由於形狀簡單，使得在製造上會更為簡便。

表 2: 馬達設計參數。

項目	參數值	項目	參數值
永久磁鐵	NdFe35	氣隙	0.4 mm
定子	Steel 1008	線圈匝數	24 turns
轉子	Iron	線徑	1.628 mm
線圈	14AWG	齒長	10 mm
齒數	9	齒寬	12 mm
極數	8	磁鐵厚度	4 mm
定子外徑	50 mm	定子背鐵厚度	5.5 mm
轉子內徑	24 mm	轉子背鐵厚度	6 mm
軸長	50 mm	佔槽率	67.1%

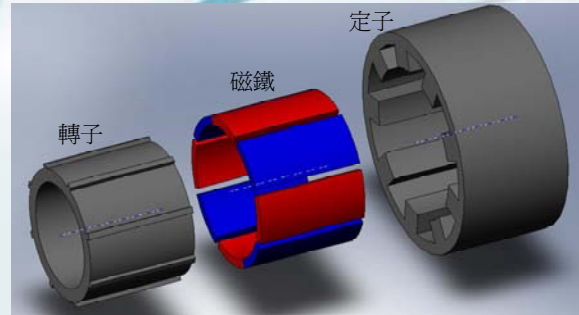


圖 3: 馬達結構立體圖。

圖 4 為馬達輸出力矩分佈，此為馬達轉速為 1200 rpm 時、轉子旋轉一個電氣週期的力矩變化，平均輸出力矩則為 15.5 Nm。圖 5 為三相反電動勢分佈，反電動勢變化在 ± 40 V 之間，由於本文所分析之馬達的定子繞線為三相 Y 接驅動，故二相間反電動勢為圖 5 中反電動勢的 $\sqrt{3}$ 倍。若在馬達繞組串聯的情況下，反電動勢最大值为 69.3 V；馬達運轉時之反電動勢必須低於供應電壓，才能達到設計規格中的額定轉速，所以將單相三個線圈並聯，使反電動勢減為原本的三分之一，即 23.1 V，此時額定轉速便能達到 1200 rpm。馬達力矩輸出模擬結果整理如表 3 所列。

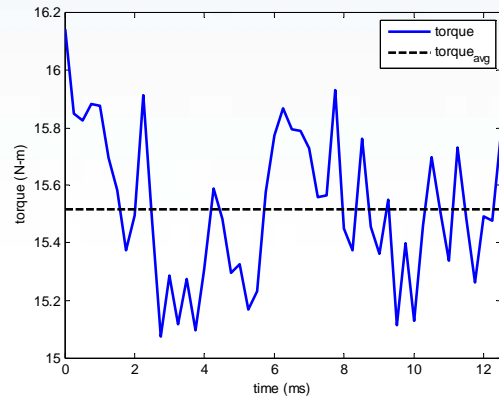


圖 4: 馬達輸出力矩分佈與平均力矩(1200 rpm)。

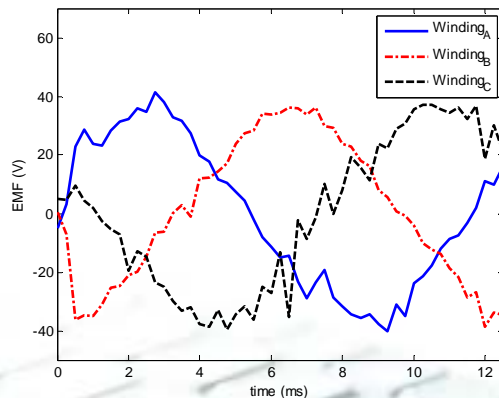


圖 5: 三相反電動勢分佈(1200 rpm)。

表3: 馬達力矩輸出模擬結果。

轉速	1200 rpm
平均力矩	15.5 Nm
力矩漣波(Ripple)	6.9%
三相Y接反電動勢(串聯)	69.3 V
三相Y接反電動勢(並聯)	23.1 V

圖4之馬達輸出力矩為軸長50 mm的結果，本文亦針對不同馬達軸長對於反電動勢的影響進行探討，表4所列為三種不同馬達軸長的分析結果。在固定其他馬達設計參數下，軸長在45 mm已可達到輸出力矩的需求，且反電動勢低於輸入電壓。雖然增加軸長可提升馬達平均輸出的力矩，但也會使反電動勢增加，如當軸長55 mm時，反電動勢已高於輸入電壓(24V)，需提升電源電壓方能使馬達有預期之額定轉速。因此，雖會犧牲一些轉速，但軸長50 mm為較適合的選擇，且可避免製造誤差達84%，意即可容許馬達在製造後力矩的減損在16%以內。

表4 不同馬達軸長對反電動勢的影響。

軸長	平均力矩	反電動勢 (三相Y接並聯)	與目標力矩 (13 Nm)差異
45 mm	14.1 Nm	23 V	92%
50 mm	15.5 Nm	24 V	84%
55 mm	17.1 Nm	28.9 V	76%

註：力矩漣波皆小於9.0%。

電動輔助空調馬達未來在應用上並非持續運轉，馬達連續運轉的時間與車輛怠速熄火時間一樣，但是比車輛停等紅燈的時間短。台灣地區各縣市的交通號誌中，大多數單次停紅燈的時間會少於99秒(因紅燈倒數秒數多半只有兩位數)，只有少數會有三位數的紅燈倒數器，但停紅燈時間也在2分鐘以內，最長很少超過3分鐘。此外，部分縣市為響應環保節能政策，實施機動車輛怠速運轉時間不能超過3分鐘未熄火，用意在降低車輛怠速運轉的污染排放。因此，本文在進行馬達的熱分析時，設定每次工作時間為180秒以內，表5所示為本文對馬達進行熱分析的相關條件設定。線圈的發熱量可由下列方程式計算：

$$P_c = \frac{3}{2} R_c (1 + 0.00393(\theta_c - 20)) I_c^2 \quad (2)$$

其中 R_c 為繞線於溫度 20°C 之電阻係數， θ_c 為繞線溫度， I_c 為相電流。

表5: 熱分析條件設定。

模擬時間	180 sec
初始溫度	25 °C
外界溫度	25 °C
空氣對流常數	15 W/m ² K
繞線電流	30 A
外殼	鋁合金
外殼厚度	5 mm

由表5之條件可計算線圈(銅線規格如表2所示)每秒發熱量約為33 W。圖6為馬達運轉180秒後的溫度分佈，外殼為5 mm厚的鋁合金，在未設計鰭片幫助散熱的情況下，馬達外殼的溫度約在65.7~72.5 °C之間。圖7為線圈溫度隨時間變化的情形，在馬達運轉180秒後線圈溫度由25°C上升至77°C，所以在沒有散熱鰭片設計下，若持續運轉不超過三分鐘，馬達銅線溫度離絕緣材料熔點(150°C)尚有一段差距，顯示本文所設計的馬達之傳導散熱足以保持正常的工作溫度。

此外，本文之馬達繞線採用 Hanselman 著作中所介紹的繞線方法[8]，依照其繞線流程便可以得到在該齒極比的繞組因數(winding factor)最大的繞線方式。而本文之馬達額定效率估計為90%，能量損失主要在於銅損上，這是為了要達到額定力矩規格，設計輸入的電流為30安培，而14AWG的銅線電流上限為32安培，操作點過於接近上限導致銅損增加。

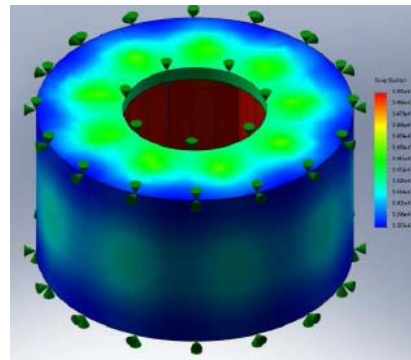


圖6: 馬達溫度分佈圖(運轉180 sec後)。



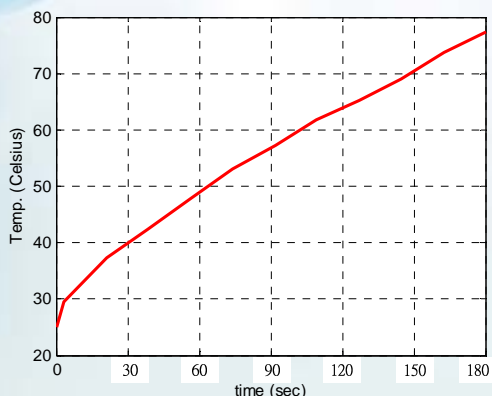


圖7: 線圈溫度隨時間的變化。

5. 結論

本文探討車輛空調系統中，搭載電動馬達作為壓縮機驅動動力的可行設計，除了為車輛在怠速熄火期間的空調供應提供一解決方案外，並可提高傳統車輛搭載怠速熄火系統的接受度。

在以維持車內人員舒適性的前提下，馬達帶動壓縮機的運轉條件可設定為1000~1200 rpm，冷卻量在1~3 kW。考量電動輔助空調之馬達在車輛引擎室內可架設的空間與驅動性能，包括馬達尺寸大小與輸出力矩的要求皆受到限制。

根據本文的研究結果，在外徑為100 mm下，選用9齒8極、無齒鞋、徑向磁通的永磁無刷馬達，其最適當的軸長為50 mm，不僅可獲得最佳的馬達設計參數，馬達輸出性能亦可達15.5Nm，不僅符合需求，且同時兼顧到製造上的便利性與性能損失容許度達16%。此外，透過熱分析的結果顯示，馬達在運轉180秒後，在自然對流空冷設計下，銅線溫度僅達77°C，散熱效果能保持馬達正常運轉與操作。

6. 誌謝

本論文承蒙經濟部「車輛潔能動力關鍵技術開發」計畫贊助，計畫編號 97-EC-17-A-16-127-0790，以及臺灣大學機械系陽毅平教授提供技術諮詢與設備支援，始得完成，謹此誌謝。

7. 參考文獻

1. Koji TAKAHASHI, Ken MATSUNAGA, Kiwamu INUI, "Product Development of Air Conditioner System with Electrically-driven Compressor for Hybrid Vehicles," DENSO TECHNICAL REVIEW, Vol. 10, No. 1, pp.24-27, 2005.
2. Gwénaél Guyonvarch, Régine Haller and Loïc Lepetit, "A Comparison Between Climate Control Systems Providing Thermal Comfort during Vehicle Stops", SAE paper 2003-01-1073, 2003.
3. 工研院機械所，使用中車輛能源效率評估與提升研究計畫，經濟部能源局委託計畫，93-D0201，

新竹、台灣，2004。

4. Takuo Sakai, Motohiko Ueda, Masao Iguchi, Taku Adaniya and Akinobu Kanai, "2-Way Driven Compressor for Hybrid Vehicle Climate Control System", SAE paper 2004-01-0906, 2004.
5. M. Makino, N. Ogawa, Y. Abe and Y. Fujiwara, "Automotive Air-conditioning Electrically Driven Compressor", SAE paper 2003-01-0734, 2003.
6. Yoshii Yuji and Tsuboi Masato, "Development of Hybrid Compressor", SAE paper 2004-01-0912, 2004.
7. Masahiko Makino, Nobuaki Ogawa, Yoshifumi Abe and Yukihiro Fujiwara, "Automotive Air-conditioning Electrically Driven Compressor," SAE paper 2003-01-0734, 2003.
8. Duane C. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, Second Edition, The Writers' Collective, 2003.

The Design and Analysis of the Auxiliary Motor for the Air-conditioning System in Vehicle

Yu-Tsen Shih¹, Jieng-Jang Liu², Hsing-Feng Liu²
and Ke-Wei Lin¹

¹ Automotive Research and Testing Center

² Department of the Mechanical Engineering,
National Taiwan University

Abstract

For traditional vehicle, the compressor in air-conditioning system is propelled by the engine power through the driving-belt on crankshaft. On the stop and go system, the powered-off engine during the idling period results in an ineffective cooling system temporarily. This paper proposes the design and analysis process of a space-limited motor that propels the compressor assistantly during the idling period. The results show that the properly designed brushless DC motor is suitable for the application on the auxiliary power for the air-condition system on a stop and go vehicle.

Keywords: vehicle, motor, air conditioning, idling stop.

