

直流馬達運轉安全性及電磁相容研究

Research on Safety and Electromagnetic Compatibility of DC Motor

林昆平
Lin, Kun-Ping

蕭水來
Hsiao, Shui-Lai

經濟部標準檢驗局 台南分局

摘要

含直流馬達構造之電器產品，由於換向片造成電流續斷現象，衍生突波雜訊電流，電磁干擾特別嚴重並透過電源線向外傳導，對於擺設附近的家電產品有不良的影響，可說是所有馬達類中最嚴重的干擾源；另外直流馬達運轉電壓，需藉助全波整流電路供應，但碳刷間的電壓往往比整流後的電壓高出許多，一直以來是電力工程師忽略的問題，這對於具有大型直流馬達運轉的工廠，構成安全上的威脅。本文即針對此兩個問題，在實驗室內架構起全套設備，希望能提供電機工程師非常寶貴的實驗結果。

Abstract

Two problems are proposed and discussed in this paper. For the first one, the commutator DC motor in any appliance causes the discontinuity of current, the surge noise current and Electromagnetic Interference. These phenomena seriously deteriorate the quality of electric power and cause the reverse effect of the household appliance power cord. Recently, DC motor is the most serious EMI interference source among all kinds of motors. For the second one, the voltage between brush gears is much higher than that of rectifier where the operating voltage of DC motor is powered by the bridge rectifier circuit. This frequently neglected problem menaces the safety of the factory where a large scale of DC motor consistently works. This paper shows the results from the specifically designed equipments and expects to provide useful recommendations for electrical engineers.

關鍵詞 (Key Words) :

突波雜訊電流 (Surge Noise Current)、
電磁干擾 (Electromagnetic Interference, EMI)、
換向片 (Commutator)、
全波整流電路 (Bridge Rectifier Ckt)。

一、前言

前陣子一位常跑標準檢驗局的家電製造商向筆者抱怨，他們生產直流馬達所驅動的刨冰機，在無載長時測試時，常不明原因故障，一旦加入冰塊有載操作，反而不會，令他百思不解。大部份使用者當然會加入冰塊才進行操作，很少在無加入冰塊條件下空轉，故所謂不明原因燒壞，本可不予理會，不過筆者爲了揭開謎底，還是在實驗室進行實驗，也找到了原因，而且還很重要，製造商若忽略，極有可能發生電器燒毀事故，到時候又可能被冠上「黑心電器」的美名。事實上直流馬達不僅應用家電上，大型工廠也有許多是使用直流馬達的，像是鋼鐵廠的軋鋼機，用量就特別多，故其運轉特性及直流電源電路，實有必要作更詳盡的分析。本文由直流電機運轉原理談起，其次探討整流電路電壓輸出特性，再者製作一包含直流馬達與整流電路之模擬基板，實際量測其運轉輸出波形，最後剖析直流馬達衍生高低頻電磁干擾及功率消耗問題，以提供國內安規實驗室、電磁干擾實驗室、家電製造商、電力工程師、含直流馬達負載之配電用戶，在直流馬達安全零組件規格選定上應注意的地方，同時建立其電磁干擾的防護觀念。

二、直流電機原理

直流電機又分爲發電機及電動機，家電應用上很廣，圖 1 顯示一標示額定 120V 的小型直流馬達外觀，內部結構主要分成四部份：

- 1.具 NS 磁極的定子：可爲永久性磁鐵或繞組激磁電磁鐵，小家電大部份採用永久性磁鐵。
- 2.線圈構成的轉子(稱電樞)：由鐵心及線圈構成。
- 3.供電機輸出入電流的碳刷：碳刷主要成份爲瀝青焦煤，質密堅硬、具有高電阻及高磨擦特性。
- 4.交直流電流轉換換向片：電樞旋轉一圈所切割定子磁場產生的感應電勢，恰爲週期 2π 的交流正弦波，但透過換向片，卻可巧妙地轉成直流，基本上換向片由硬抽銅構成，片與片間以雲母材料絕緣，形成凹槽間隙。

就發電機而言，在假設沒裝置換向片情形下，圖 2(a)顯示其運轉原理，由外部機械帶動電樞旋轉切割定子磁場，依法拉第及楞次定理，電樞線圈會產生感應電壓，衍生電樞電流，走向爲 $b_2 \rightarrow b_1 \rightarrow R \rightarrow b_2 \rightarrow a \rightarrow b$ ，當轉子轉半圈後，電樞電流走向變成圖 2(b) $a \rightarrow b_2 \rightarrow R \rightarrow b_1 \rightarrow b \rightarrow a$ ，因此就同一線圈邊 b 觀察，轉子每轉半圈，電流方向會反過來一次，轉一圈，則恰形成週期 2π 的交流正弦波。接著在線圈兩末端各黏上 1 片換向片(稱一組)，並讓換向片跟著線圈轉動，每轉至右邊位置，換向片電流恆流出，每轉至左邊位置，換向片電流恆流入，也就是說極性被互換一次，因此 b_1 與 b_2 間輸出電壓極性恆不變，形成直流脈波。當換向片與線圈增爲兩組時，圖 3(a)顯示，碳刷間感應出的電壓波形，爲差 90 度電角的兩交疊直流脈波(360 度/4 片)，一旦換向片及線圈成對增爲 4 組時，感應電壓波形如圖 3(b)所示(360 度/8 片)，其外形包跡就越近似圖 3(c)的直線形狀，故換向片又稱整流子(Commutator)，具交直流變換功能，圖 4 即圖 1 拆掉外殼後換向片實體。就電動機而言，圖 5 顯示其運轉原理，在碳刷間輸入直流電源，電流經碳刷及換向片

進入電樞線圈，由 2-1 式長度 L 導線切割磁場受磁力公式，電樞線圈邊將受磁力作用而旋轉起來，每轉半圈，就固定位置觀察，線圈內電流會反過來一次，形成一週期 2π 的交流正弦波，可說原理與發電機恰好相反。電動機的直流電源供應部份，有可能是穩定直線電壓，也有可能是非直線直流脈波，端視整流電路加不加濾波電容而定，但不管如何，直流電源形態將決定馬達轉矩、壽命、運轉及使用安全，更是左右電磁干擾的因素，有必要在第二節詳加探討。

$$\vec{F}_m = I \cdot \vec{l} \times \vec{B} \quad (2-1)$$



圖 1 標示 120V 實驗用直流馬達實體

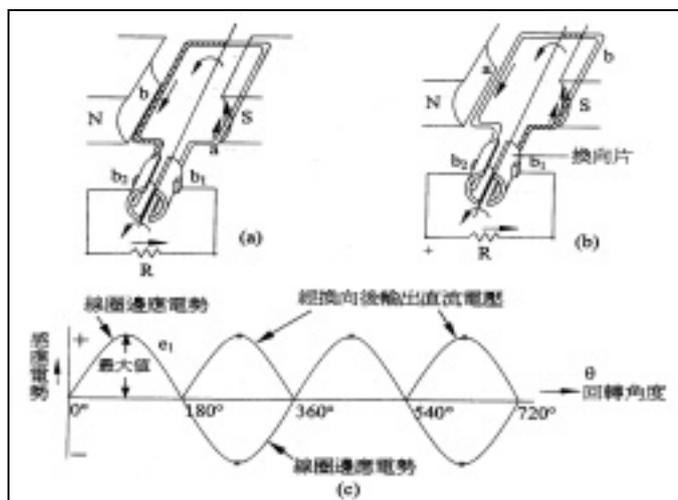


圖 2 直流發電機運轉原理

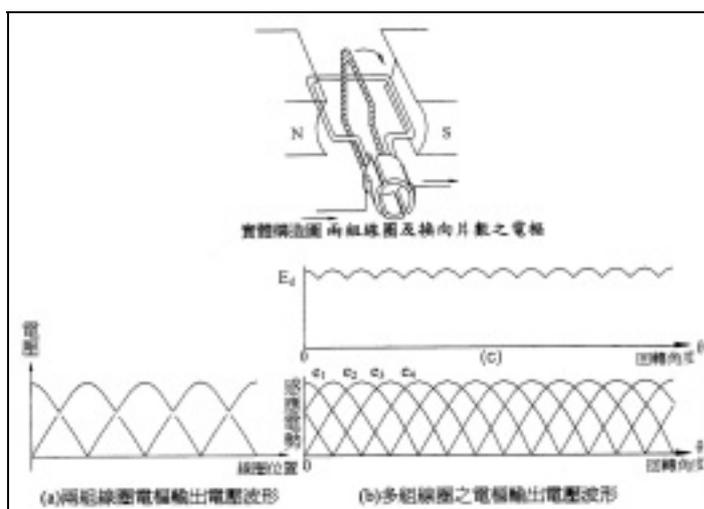


圖 3 換向片整流子原理

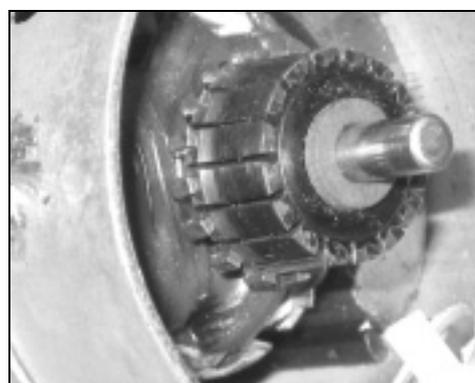


圖 4 具 16 片換向片的直流馬達

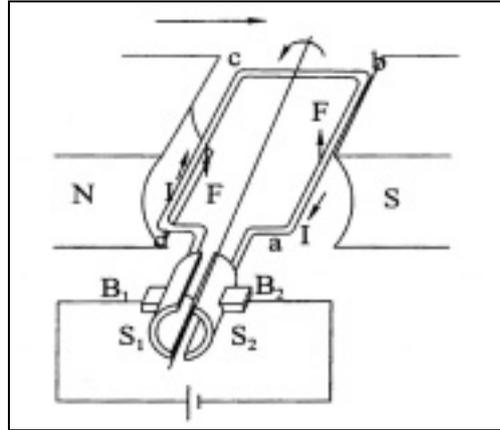


圖 5 直流馬達運轉原理

三、全波整流驅動電路理論

由於市電為交流，因此直流馬達前端均置有功率二極體組成的整流電路，形態上有半波整流、半波整流+濾波電容、全波整流、全波整流+濾波電容等四種。目前直流馬達電源，大部份採用後兩者，其輸出直流成份有很大差別，以下就此兩種電路電壓輸出特性加以介紹。

(一) 全波整流輸出電壓(未含濾波電容)

考慮 4 顆二極體構成的橋式整流電路及其相關資訊，這包括電源輸入波形 $V_s - t$ 、實際整流輸出波形 $V_o - t$ 、理想整流輸出波形 $V_o' - t$ ，整體如圖 6 所描述，整流平均電壓值 V_o' 可由 3-1 式求得；將 $0 \sim 2\pi$ 實際輸出直流脈波 $V_o - t$ ，打散在理想輸出波形 $V_o' - t$ 週期 2π 內，即可算出 3-2 式直流平均電壓。

$$\frac{A}{T} = \frac{V_o' \times \Delta t}{T} \quad , \quad \Delta t = T = 2\pi \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} V_o' &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2}V_s \sin(wt) dwt \\ &= \frac{\sqrt{2}V_s \times 2}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin(wt) dwt \\ &= 0.45 V_s \times 2 = 0.9V_s \end{aligned} \quad (3-2)$$

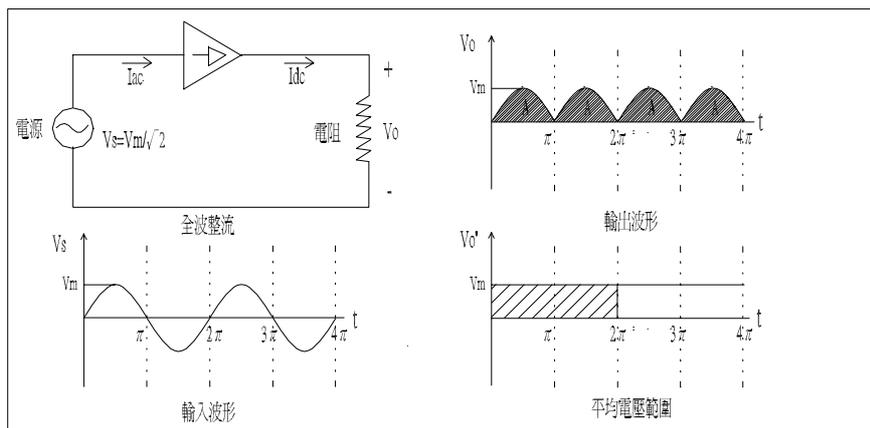


圖 6 未加裝濾波電容之全波整流電路輸出特性

(二)全波整流輸出電壓(含濾波電容)

圖 7 顯示含濾波電容之整流電路，電容充放電效應，會將整流後介於兩直流脈波間的凹陷區域填滿，由於此種充放電為一暫態現象，故連接兩脈波間的包跡線並非水平直線而是一斜線，這使得波形變成漣波(圖 8)，而直流平均電壓定義於 3-3 式，可說並無公式可套用計算，只有先量測漣波大小，才能決定直流電壓大小。例如電源 110V 交流輸入， $V_m = \sqrt{2} \times 110V = 155V$ ，漣波一般 20V 左右，有時後也很低，端視濾波電容濾波能力而定，故引用 3-3 式，直流平均電壓輸出應為 145V，連接其上的直流馬達，需選用額定 145V 以上，耐壓才算合格；若考慮最糟狀況，可假設漣波為 0V，額定需選用 155V 以上，才算安全，這一點很重要，大家要留意。至於若將 AC 110V 輸入於 3.1 節沒加裝濾波電容之整流電路時，輸出直流電壓套用 3-2 式應為 99V，那麼選用 120V 額定直流馬達，耐壓理應沒問題，結果，答案還是"錯"，而且不注意還真有點危險，不幸的是，99% 直流馬達驅動之小家電或工廠直流負載，均採用此種不加濾波電容的整流電路。下一節，我們將以實驗分析此兩種整流電路的運轉特性，務使家電製造商、工廠直流馬達用戶、消費者及國內電器安規實驗室人員，在直流馬達規格認定上，有正確的知識，確保電器安全運轉。

$$V_{dc} = V_m - \frac{1}{2} V_{r(p-p)} \quad (3-3)$$

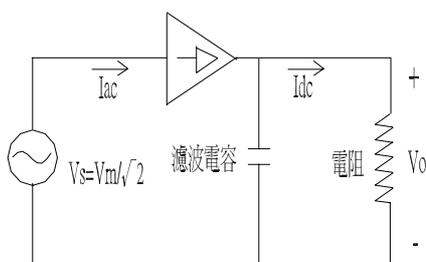


圖 7 加裝濾波電容之整流電路

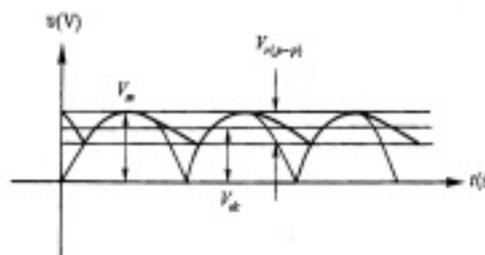


圖 8 輸出電壓波形

四、直流馬達運轉對整流電路輸出電壓的影響

圖 9A 顯示一全波整流電路模擬基板製作，由 40A 二極體、單投開關、200V 1000uf 濾波電容及廠商所提供 20W 刨冰機直流馬達組成，圖 9B 則顯示直流馬達等效電路，現在就濾波電容投入與否，搭配直流馬達「停止」、「空轉」、「堵轉」、「額定加載運轉」四種實際操作會面臨的狀況，在馬達輸入端 Vdc(ie: 整流電路輸出側)，進行直流電壓量測及波形擷取。

(一)全波整流直流脈波輸入時(未含濾波電容)

狀況 1 馬達停止運轉

量測波形數據如圖 10 所示，交流端輸入 111V，示波器記錄，直流平均電壓為 100.12V 的直流脈波，若以第一條虛線為 X 軸線(Y=0)，直流脈波最高點記錄為 155V，最低點記錄 7.5V，故直流脈波基本上，亦可視為一振幅 147.5V 的大漣波。

狀況 2 馬達空轉(不加負載)

會發生比較奇怪的現象，圖 11 顯示平均電壓竟由原先的 100.12V 跳升至 137.15V，原兩脈波間的凹陷區域，被不明電壓成份填滿，頂端形成五個尖銳漣波，示波器記錄結果，最高 165V，最低 102.5V，原因為何？先將尖銳漣波原因留至第四節電磁干擾再行解釋，把重點擺在凹陷區域不明電壓成份的填補效應，考慮圖 10 脈波間的凹陷區域，物理上，此區域是沒有能量的，碳刷間，將沒有足夠電壓驅動馬達運轉，但因馬達已被第一個輸入直流脈波電壓起動，故凹陷區域雖然失電壓，『馬達照樣慣性轉動』，如此一來，馬達在這段期間反變成發電機，加上慣性轉速短時間不會下降，故發電電壓表現在碳刷上，波形平均高度几乎等同自外部輸入的直流脈波平均高度，此種現象稱為反電勢(BACK E.M.F)，其大小與轉速成正比(4-1 式)，狀況 3 將可證明此推論。

狀況 3 馬達堵轉

將空轉中的馬達立即堵轉，迫使發電機效應消失，反電勢自然不見。圖 12 為筆者用尖嘴鉗夾住轉動中馬達的量測結果，此時，直流電流輸入最大，電樞轉矩最強，但實驗顯示，脈波間的凹陷區域重新浮現，填補的反電勢電壓消失，直流平均電壓降回 100.12V 附近。

狀況 4 額定加載操作

如果將此類馬達組裝成刨冰機，並加入冰塊運轉，又將發生什麼情形？圖 13 及圖 14 為刨冰機控冰量測數據及照片，可發現直流平均電壓只上升至 111.01V，原因在於有載轉速比空轉轉速來得低，一旦脈波凹陷區域作為電壓輸入時，慣性轉速低，反電勢現象小，填補範圍自然降低。另一個大家可能會問的問題是，脈波電壓加壓期間，馬達在轉動，理論上轉子也在切割定子磁場，為何反電勢沒將脈波波形上移，關於這一點，參考圖 9B 直流馬達等效電路，以 4-2 式解釋。反電勢基本上是存在的，只是抗拒外部脈波電壓輸入，反應在電樞電流變小，此在馬達輸入端(碳刷間)，是測不出來的。

$$E_b = k \Phi n_r \quad (4-1)$$

$$V_{dc} = E_b + I_a R_a \quad (4-2)$$

$$I_a = \frac{V_{dc} - E_b}{R_a}$$

n_r : 馬達轉速 Φ : 定子磁場
 E_b : 反電勢電壓 V_{dc} : 整流輸出直流平均電壓
 I_a : 電樞電流 R_a : 電樞電阻

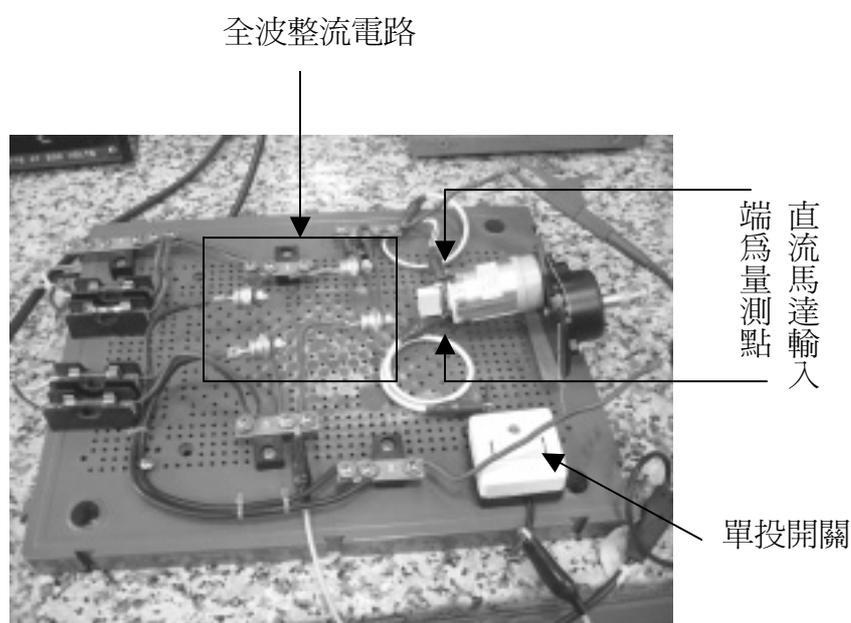


圖 9A 全波整流電路模擬基板(未含濾波電容)

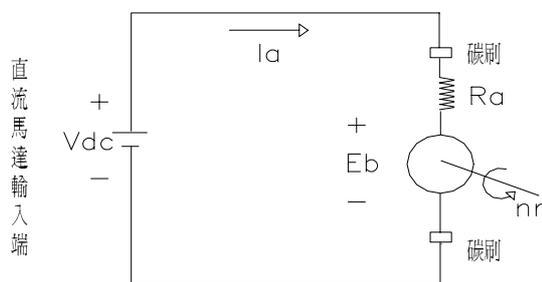


圖 9B 直流馬達等效電路

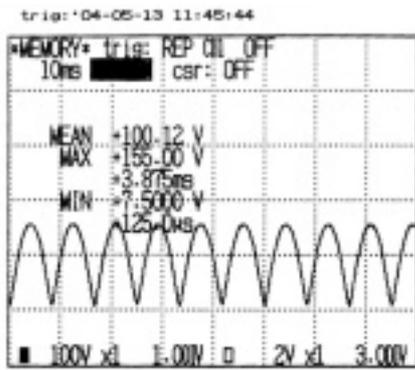


圖 10 直流馬達未起動

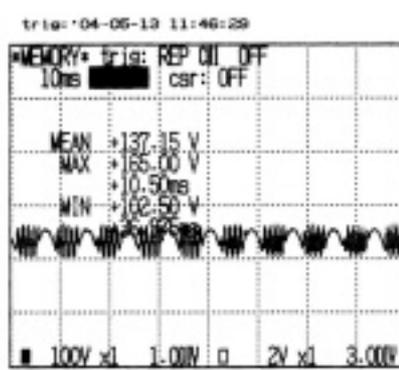


圖 11 直流馬達空轉

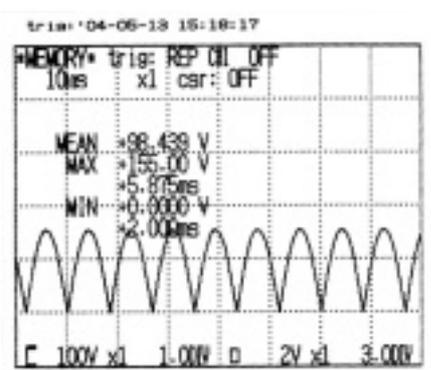


圖 12 直流馬達堵轉

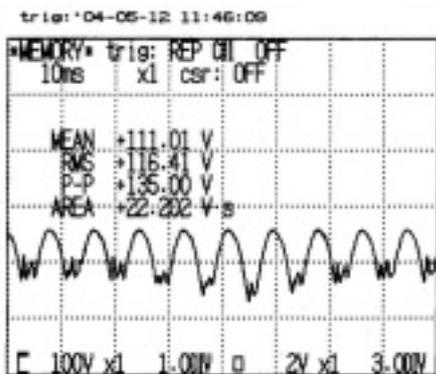


圖 13 刨冰機加冰運轉



圖 14 刨冰機控冰量測情形

(二)全波整流直流脈波輸入時(含濾波電容)

圖 15 顯示模擬基板加入濾波電容情形，我們只就直流馬達「停止」、「空轉」、「堵轉」三種邊界狀況，進行直流電壓量測及波形擷取。

狀況 1 馬達停止運轉

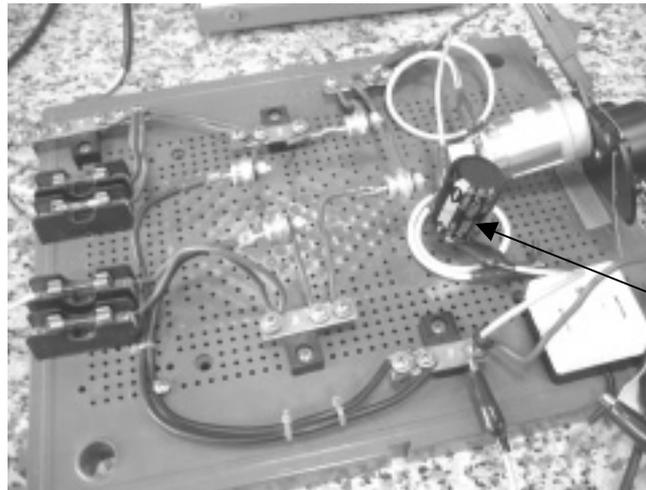
圖 16 為量測波形與數據，交流端輸入 111V，示波器記錄直流平均電壓高達 155V，且為一直線電壓，不似 3.1 節直流脈波有凹陷區域，主因凹陷區域被電容充放電效應填滿，另外也未發生如第二節圖 8 所言漣波現象，猜測可能是使用大容量濾波電容，具較佳漣波濾除效果。

狀況 2 馬達空轉(不加負載)

圖 17 顯示量測結果，數據與停止運轉狀況沒兩樣，凹陷區域早在馬達起動前，已被濾波電容填滿，故所謂失電壓導致慣性轉動發電效應並不存在，反電勢現象不會表現出來，只是抗拒外部直線電壓輸入，反應在電樞電流變小。

狀況 3 馬達堵轉

圖 18 顯示馬達堵轉所量測波形，約有 7.5V 振盪漣波，濾波電容充放電暫態效應有點浮現，至於為何空轉不會發生，堵轉卻會出現，筆者也不清楚，留給讀者去思索。



濾波電容

圖 15 全波整流電路模擬基板(含濾波電容)



圖 16 直流馬達未起動

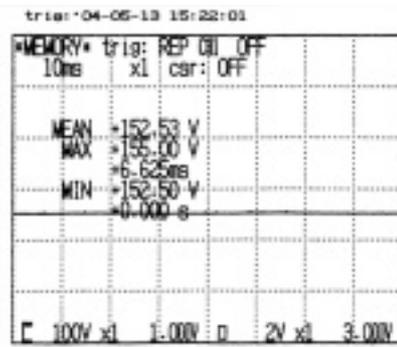


圖 17 直流馬達空轉

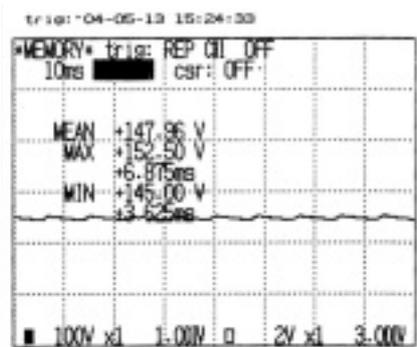


圖 18 直流馬達堵轉

五、直流馬達電磁干擾原因追究

在(一)節，馬達在不加濾波電容之整流電路空轉時，脈波凹陷區域為「反電勢」所填滿，(二)節，馬達在加濾波電容之整流電路空轉時，脈波凹陷區域為「濾波電容充放電」所填滿，此兩種填滿『全波整流電路輸出直流脈波凹陷區域』的動作，基本上均是一種引發電磁干擾的暫態現象，並隨著馬達運轉持續出現。另外一個更嚴重的電磁干擾，是換向片換向期間，因換向片槽距所引發的電流續斷突波問題，此現象在圖 11 空轉及圖 13 額定加載運轉，均可輕易觀測到，在圖 11 約有 5 個尖銳漣波，圖 13 有兩個。今將圖 11 尖銳漣波放大且等寬度延伸，則一週期內恰包含 16 個漣波數(圖 19)，此數據與馬達換向片數相同(圖 4)，現在考慮圖 20 電樞縱截面圖，當 aa'換向片及其對應線圈逆轉一槽距時，bb'換向片及其線圈會『剛好』接觸到碳刷，此時會發生類似開關投入的暫態現象，引發突波電流，衍生突波壓降，在大電力裏稱「電壓閃爍」，此種干擾隨著直流馬達運轉一直存在著，並透過碳刷向外部電路傳導，第一個受害者可能就是整流電路二極體，解決之道可在直流馬達輸入端並聯 X 電容，以吸收高頻雜訊電流；其後在每顆二極體並聯旁通電容，作為第二道保護，此種電磁干擾抑制策略，在家用吹風機內部，處處可見。

trial*04-05-14 16:18:46

* HARM #		RMS	CH2	VALUE
x20	freq:60.0Hz			
1	0.54	A11	0.00	A21
2	0.00	A12	0.00	A22
3	0.02	A13	0.00	A23
4	0.00	A14	0.00	A24
5	0.01	A15	0.00	A25
6	0.00	A16	0.00	A26
7	0.00	A17	0.00	A27
8	0.00	A18	0.00	A28
9	0.01	A19	0.00	A29
10	0.00	A20	0.00	A30
1-RMS		IHD-F	IHD-R	
		0.54 A	4.08%	4.08%

圖 24 堵轉諧波失真(不含 C)

trial*04-05-14 16:22:59

* HARM #		POWER	VALUE
x20	freq:60.0Hz		
1	+3.125	W11	+0.000
2	+0.000	W12	+0.000
3	+0.000	W13	+0.000
4	+0.000	W14	+0.000
5	+0.000	W15	+0.000
6	+0.000	W16	+0.000
7	+0.000	W17	+0.000
8	+0.000	W18	+0.000
9	+0.000	W19	+0.000
10	+0.000	W20	+0.000
PATT		VA	VAR
		+3.125 W	+14.44 VA +14.10 var
			0.216

圖 25 空轉消耗功率(含 C)

trial*04-05-14 16:22:59

* HARM #		CH2	VALUE
x20	freq:60.0Hz		
1	0.03	A11	0.04
2	0.00	A12	0.00
3	0.06	A13	0.03
4	0.00	A14	0.00
5	0.05	A15	0.03
6	0.00	A16	0.00
7	0.05	A17	0.02
8	0.00	A18	0.00
9	0.04	A19	0.02
10	0.00	A20	0.00
1-RMS		IHD-F	IHD-R
		0.13 A	360.00% 96.25%

圖 26 空轉諧波失真(含 C)

trial*04-05-14 16:27:55

* HARM #		VALUE
x20	freq:60.0Hz	
1	129.1	W11
2	0.000	W12
3	781.3	W13
4	0.000	W14
5	781.3	W15
6	0.000	W16
7	312.5	W17
8	0.000	W18
9	0.000	W19
10	0.000	W20
PATT		VA
		+127.2 W
		+222.7 VA +182.8 var
		0.571

圖 27 堵轉消耗功率(含 C)

trial*04-05-14 16:27:55

* HARM #		RMS	CH2	VALUE
x20	freq:60.0Hz			
1	1.21	A11	0.12	A21
2	0.00	A12	0.01	A22
3	1.14	A13	0.08	A23
4	0.01	A14	0.00	A24
5	0.89	A15	0.09	A25
6	0.01	A16	0.00	A26
7	0.59	A17	0.07	A27
8	0.02	A18	0.00	A28
9	0.32	A19	0.03	A29
10	0.01	A20	0.00	A30
1-RMS		IHD-F	IHD-R	
		2.01 A	132.74% 79.86%	

圖 28 堵轉諧波失真(含 C)

七、結論

直流馬達應用在小家電或工廠直流負載運轉上，難免有空轉、堵轉及額定運轉的狀況發生，例如榨汁機製作冰沙時，被冰塊堵住的堵轉狀況，吸塵器放任其空轉，使用者卻已離開操作空間，因此為了保護消費者權益，確保電器運轉安全，考慮各種可能發生狀況並選擇最糟情形進行防護，是應該的。本文所有實驗數據、量測及分析，全部提供相關人員參考用，另為了讓大家快速掌握直流馬達及其整流電路運轉特性，筆者特別總結如下，縱使不知所云，記住就是。

一、未加濾波電容之整流電路驅動直流馬達家電

空轉約 137V，堵轉約 100V，額定加載約 111V，故馬達額定電壓應選 140V 以上，才算安全。運轉時，整流輸出直流脈波，因慣性轉動發電效應產生反電勢而提升輸出電壓。

二、加有濾波電容之整流電路驅動直流馬達家電

空轉約 152V，堵轉約 147V，額定加載介於之間，故馬達額定電壓應選 160V 以上，才算安全。運轉時，整流輸出直流脈波，因電容充放電效應提升輸出電壓。

三、直流馬達一定要加裝電磁干擾抑制元件，否則 EMI 几乎不會過

二極體旁可並聯高頻陷波電容，以確保二極體安全運作；直流馬達輸入端可加裝 X 電容，以濾

除換向片產生的高頻雜訊；另外採用高換向片數的直流馬達，也是降低電磁干擾的手段。

四、消耗功率

「加濾波電容整流電路」比「不加濾波電容整流電路」，消耗功率約高出 2~3 倍，因此 99% 直流馬達驅動負載之整流電路，寧採不加濾波電容，是基於節能觀點考量，卻也容易因輸入非穩定直流電源而縮短馬達壽命。

五、低頻諧波及功因

「加濾波電容之整流電路電容充放電效應」比「不加濾波電容之整流電路反電勢效應」，在交流電源側，更易衍生低頻諧波污染，造成產品功因下降，能源浪費。

參考文獻

- 1.許中平 著，"直流電動機控制電路設計"，三版，全華書局，1998，第 17-32 頁。
- 2.郭塗註 著，"電工機械"，大中國圖書公司，初版，2002，第 13-23 頁。
- 3.尊凡公司 著，"直流馬達技術資料"，第 1-17 頁。
- 4.李進賢 著，"工業基礎實習之基本電學實驗"，初版，全華書局，1999，第 34-39 頁。
- 5.李世興 著，"常見雜訊測試與對策"，初版，全華書局，2001，第 1-23 頁。
- 6.陳柏宏 譯，"電磁干擾與防治對策"，二版，文笙書局，1997，第 266-270 頁。
- 7.卓聖鵬 譯，"EMC 的基礎和實踐"，初版，全華書局，2001，第 6-2 - 6-10 頁。