

元 智 大 學

電機工程學系

專題研究報告

多階層逆變器混合型脈寬調變

Hybrid-PWM of three-level Inverter

指導教授：陳鏗元 教授

組員：1040635 李沅晉

中華民國 一零七 年 五 月

目錄

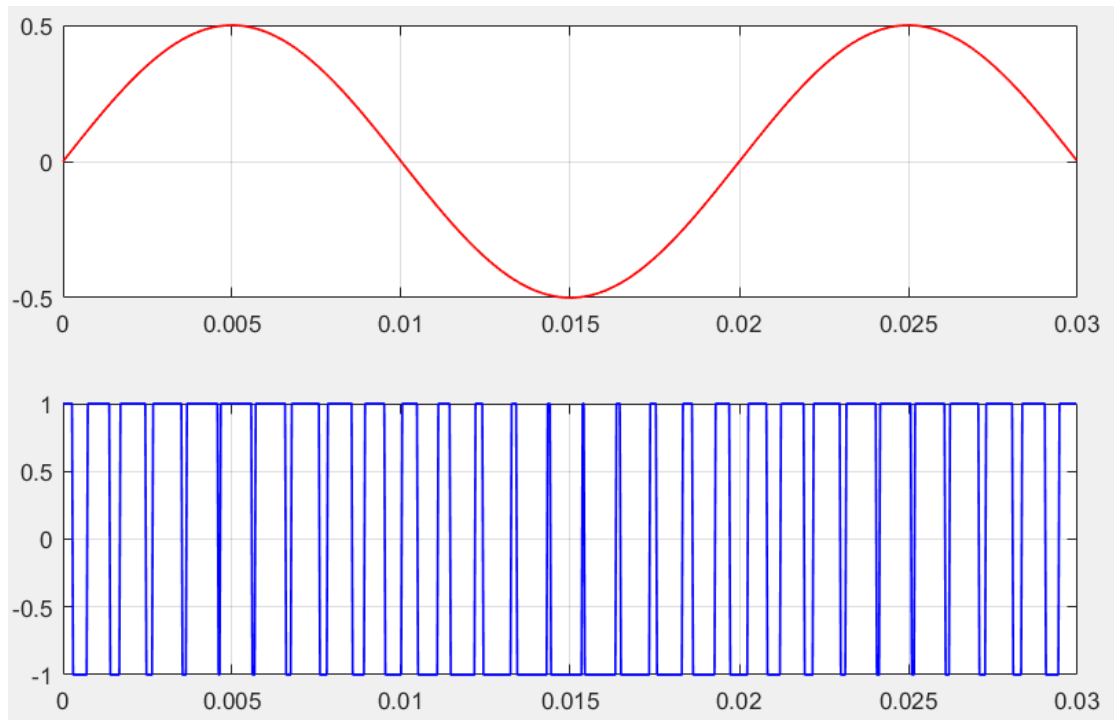
第一章 摘要	3
第二章 脈波寬度調變	3
第三章 電路解說	4
第四章 快速傅立葉轉換	6
第五章 總諧波失真	7
第六章 傳統脈寬切換	8
1.載波脈波寬度調變	8
1.三角波	8
2.加 λ	9
3. λ 的性質	10
2.空間向量脈波寬度調變	11
1.派克變換 DQ 平面	11
2. DQ 平面分析	11
3.切換序列	16
3.比對 CBPWM SVPWM 關聯性	18
第七章 混合型脈寬調變發展	18
1.特殊序列一分析	18
2.Current ripple(HDF)	19
3.混合型脈寬調變	24
第八章 模擬結果	26
1.三相二階	26
2.五相二階	27
3.七相二階	29
4.三相三階	31
5.五相三階	33
第九章 結論	35
第十章 參考文獻	35
第十一章 附錄	36
1.三相五相七相的差異及比較	36
2.三階電路說明	42
3.新三區與新五區	44
4.新三區與新五區模擬結果	47

一. 摘要

本專題主旨是在研究如何有效地利用直流電產生交流電，主要會使用脈波寬度調變的方法來達成。並會介紹載波脈波寬度調變、空間向量脈波寬度調變以及混合型脈波寬度調變，藉由使用最低 HDF 來降低諧波失真，還有最後 matlab 模擬結果。

二. 脈波寬度調變 (Pulse Width Modulation)

簡稱脈寬調變，是將類比訊號轉換為脈波的一種技術，一般轉換後脈波的週期固定，但脈波的占空比（指方波的導通時間和總時間的比值）會依類比訊號的大小而改變。

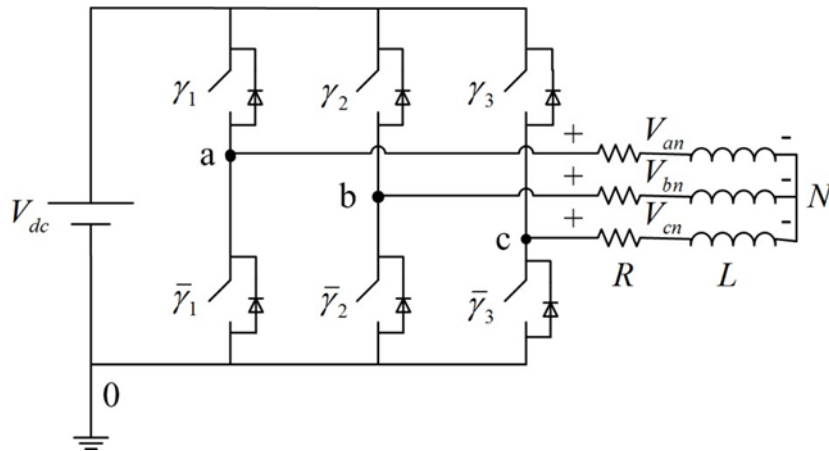


圖一：類比訊號與經過 PWM 後訊號

由圖一可以看出經過 PWM 轉換後的訊號是由好幾個方波所組成，很明顯可以看出方波的占空比會因為類比訊號的大小而有所改變，像在 0.05 秒時，弦波到達高峰，方波的占空比也會比較大，同理，在 0.015 秒時，弦波處於低峰，方波的占空比也會比較小。

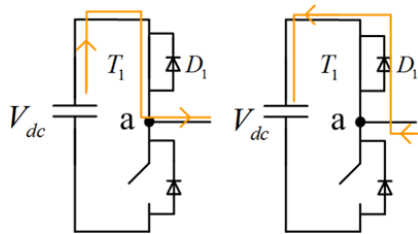
PWM 技術是一種對類比訊號電位的數位編碼方法，通過使用高解析度計數器（調變頻率）調變方波的占空比，從而實現對一個類比訊號的電位進行編碼。其最大的優點是從處理器到被控對象之間的所有訊號都是數位形式的，無需再進行數位類比轉換過程；而且對雜訊的抗干擾能力也大大增強（雜訊只有在強到足以將邏輯值改變時，才可能對數位訊號產生實質的影響），這也是 PWM 在通訊等訊號傳輸行業得到大量應用的主要原因。

三. 電路解說

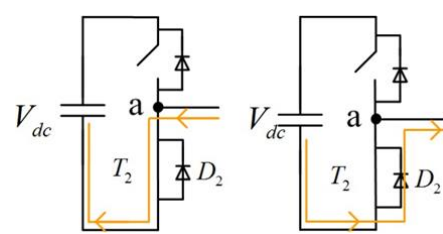


圖二：三相二階電路

上圖是一個三相二階電路，也是本專題的精隨，其中三相二階電路是由 6 個開關(可以是 MOSFET 或是 IGBT)所組成，輸入是直流電，令為 V_{dc} ，輸出通常是接三相馬達，又因為馬達大多是電感性負載，所以這邊用 RL 負載表示。



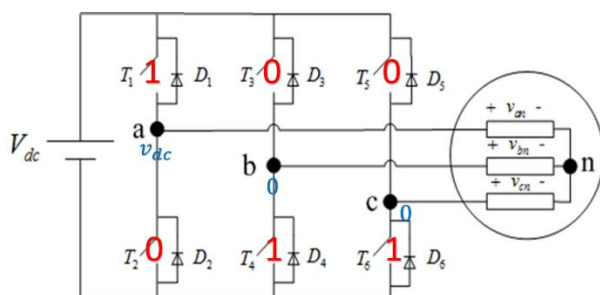
圖三：上導通電流走向



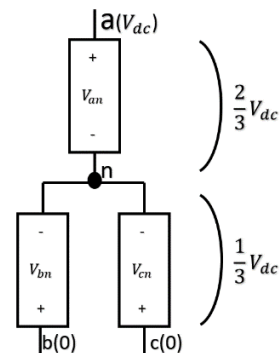
圖四：下導通電流走向

在講三相二階電路之前先說說基本觀念，在一個半橋電路下，開關只有 4 種可能，分別是上導通、下導通、都導通、都斷開，而在實際的情形下，我們只會使用到上導通以及下導通兩種。原因很簡單，要是兩個開關都斷開的話，那就是斷路了，整個電路不會運作，而要是兩個開關都導通的話，輸出電壓會不一定，有可能因為圖己的關係，輸出電壓是 V_{dc} ，也有可能因為圖己的關係，輸出電壓是 0，在這種輸出不確定的因素下，導致我們不會讓電路處於都導通的情況。

總結來說，一行之中只會有一個開關導通，例如當上開關導通時，下開關一定斷開，所以我們將上導通稱作 1，下導通稱做 0。藉由上段描述可知，三相二階電路的切換狀態共有 8 種可能，分別是 000、001、010、011、100、101、110、111。



圖五：切換狀態 100 電路示意圖



圖六：負載跨壓示意圖

再來是輸出的部分，半橋電路的話，上導通的輸出電壓是 V_{dc} ，下導通的輸出電壓是 0，接上負載之後，很顯然的，負載的跨壓就會是輸出電壓，沒有甚麼問題，但換成三相二階電路之後，負載會相接(圖六)，這時就要利用電阻分壓定律(圖六)來求出每個負載的相電壓(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})。例如當切換

狀態是 100 時(圖五)， $V_{an} = \frac{2}{3}V_{dc}$ 、 $V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{dc}$ 、 $V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{dc}$ 。

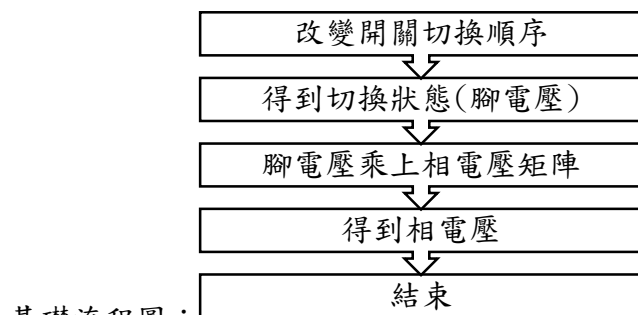
state	0	4	6	2	3	1	5	7
a	0	1	1	0	0	0	1	1
b	0	0	1	1	1	0	0	1
c	0	0	0	0	1	1	1	1
V_{an}	0	$2/3$	$1/3$	$-1/3$	$-2/3$	$-1/3$	$1/3$	0
V_{bn}	0	$-1/3$	$1/3$	$2/3$	$1/3$	$-1/3$	$-2/3$	0
V_{cn}	0	$-1/3$	$-2/3$	$-1/3$	$1/3$	$2/3$	$1/3$	0

表一：切換狀態與相電壓的相互關係

當 V_{dc} 等於 1 的時候，輸出的腳電壓值(V_a, V_b, V_c)就會跟開關的狀態一樣，再把腳電壓依序利用電阻分壓推導就可以整理成表一，繼續觀察表一後

可以找到下列的關係式：
$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$
。那個矩陣

就稱為相電壓矩陣，而最後乘出來的相電壓值就會是所要的結果，這樣就完成一次脈波寬度調變(PWM)。

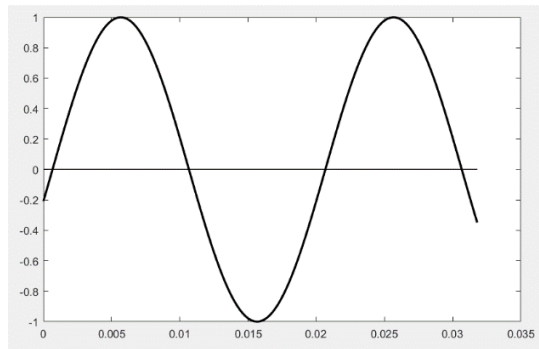


基礎流程圖：

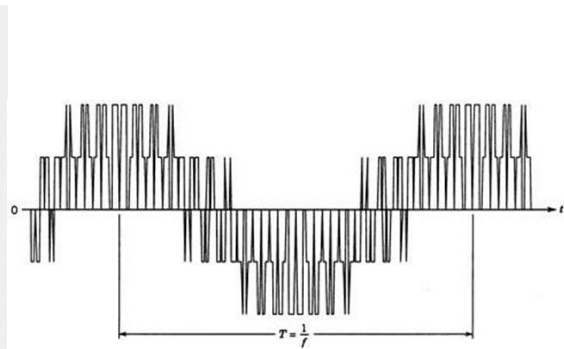
四. 快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform)

由於由二階電路轉出來的交流訊號是以快速切換開關的方波來產生的，並不理想（圖二），而為了判別這樣的交流訊號到底好不好，是不是跟預期的結果一樣，會需要用到快速傅立葉轉換來判別，而當傅立葉結果出來的主頻與理想訊號的主頻一樣時，便可以得知其結果是對的。

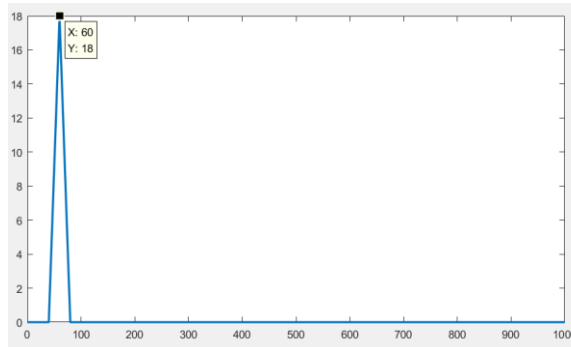
快速傅立葉轉換，是快速計算序列的離散傅立葉轉換或其逆轉換的方法。傅立葉分析將訊號從原始域（通常是時間或空間）轉換到頻域的表示或者逆過來轉換。我們將訊號轉換到頻域上來看，便可比較清楚的看出波型的差異，只要主頻一樣，高頻的數量跟震幅都不大的話，即可得知組合出兩個波形的成分是類似的，也可得知兩個波形是相似的，我們就是用此方法來判別實際波形與預測波形兩者是否一樣。



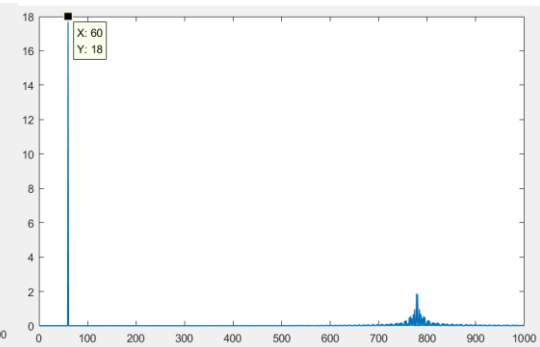
圖七:理想交流訊號



圖八:實際交流訊號



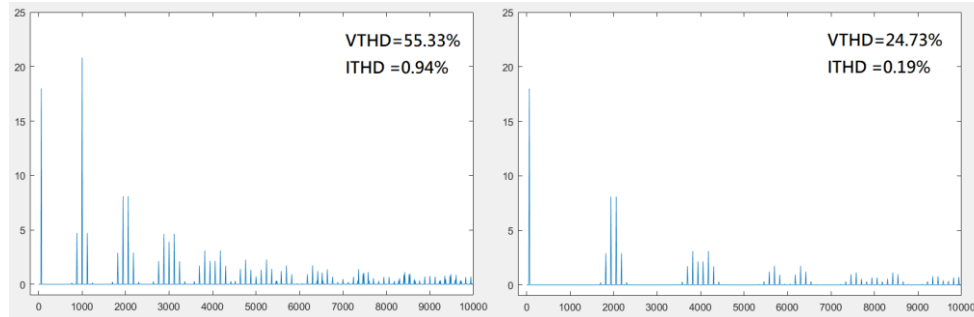
圖九:理想訊號經傅立葉轉換



圖十:實際訊號經傅立葉轉換

五. 總諧波失真(Total Harmonic Distortion)

因為轉出來的交流訊號不理想，不像類比訊號一樣有連續性，造成在傅立葉轉換後會有一些高頻的根數存在，為了判別說它跟理想訊號的差別多寡，這時就定義一個名詞，總諧波失真率(harmonic distortion)，並定義其值為倍頻的有效值。如圖十一，如果倍頻根數很多的話，代表訊號跟理想訊差相差甚遠，可能會有一些雜訊或誤差存在，所以失真率(THD)就會比較高。



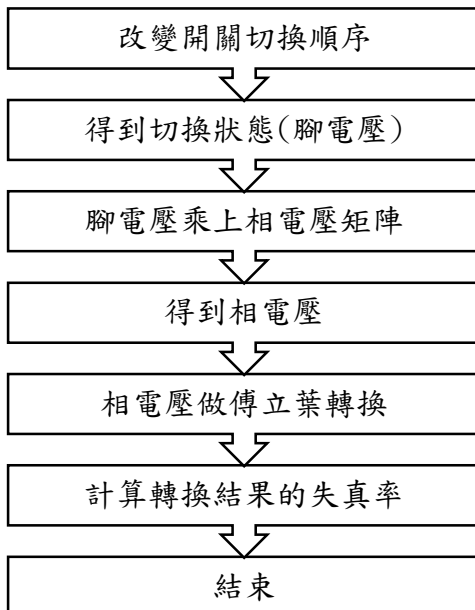
圖十一:不同訊號傅立葉轉換結果比較

總諧波失真公式:

$$\%THD = 100 \times \frac{\sqrt{I_{S2}^2 + I_{S3}^2 + I_{S4}^2 + \dots}}{I_{S1}}$$

分子是倍頻大小，分母是主頻大小，整個公式是很直觀的，要是倍頻的根數或數值都很大的話，平方再開根號之後，出來的值也會跟著變大，所以失真率就會較高，沒什麼問題，又因為每個訊號的大小都不一樣，所以除以主頻再乘 100，用百分比來判別比較標準。

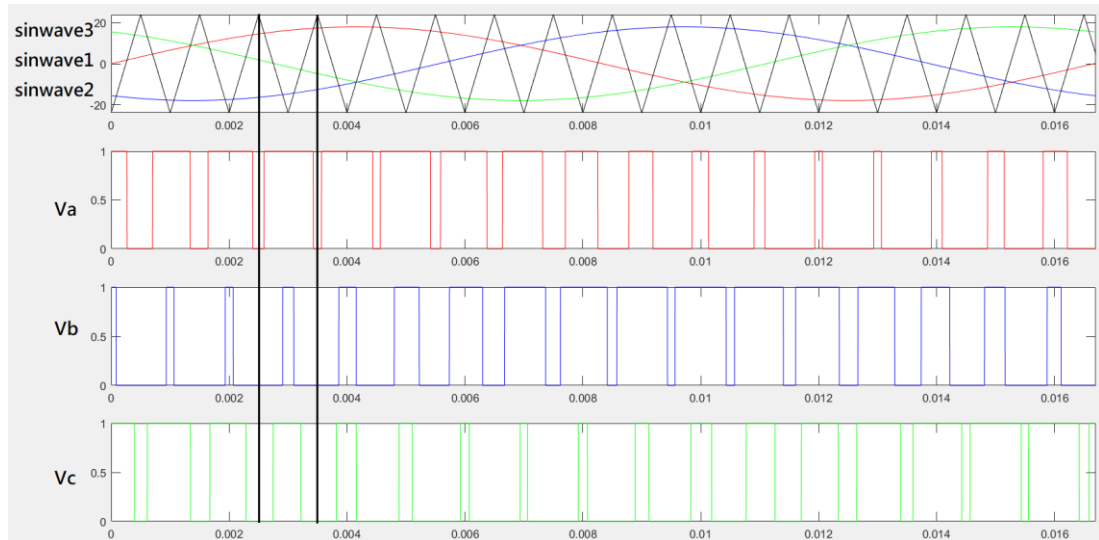
基礎 PWM 流程圖：



六.傳統脈寬切換

6-1-1.載波脈寬調變(Carried-Based PWM)-三角波

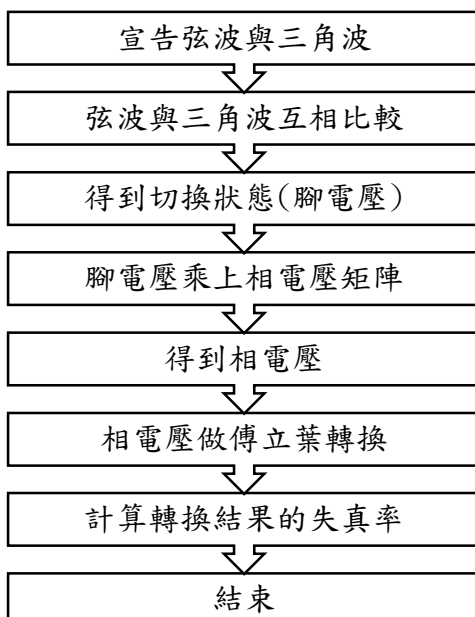
首先將需要產生的弦波輸出反過來當作模擬所需的參考，接著設計一個頻率與弦波的取樣頻率一樣的三角波，然後將弦波與三角波兩者做比較，如果弦波的值比三角波還要來的大，輸出電壓設為一，反之，如果弦波的值比三角波還要來的小時，輸出電壓設為零。



圖十二:載波脈寬調變(CBPWM)示意圖

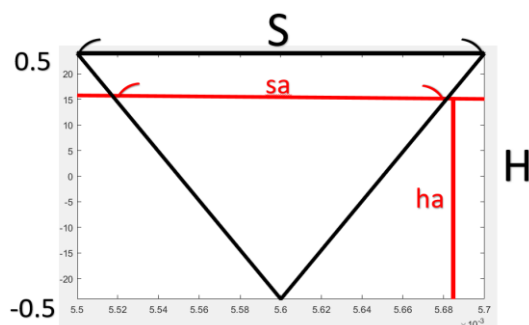
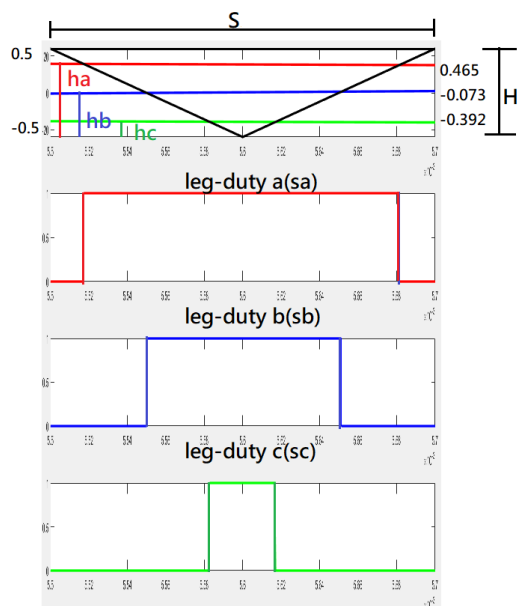
如圖十二所示，在兩者比較後，可以做出圖一的結果，也就是把一個弦波變成一組腳電壓。在一個三角波周期內，可以分成7個部分，分別是000、100、101、111、101、100、000。這些腳電壓代表了開關的切換狀態，也就是說，如果要利用合成出像三角波裡面的弦波一樣，電路需要依序按照那7個部分做切換，才可以合成出來。

CBPWM 三角波流程圖：

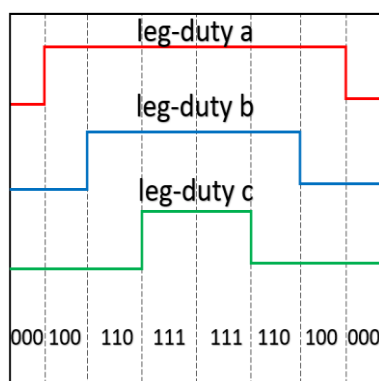


6-1-2.載波脈寬調變(CBPWM)-加 λ

將腳電壓的從一個三角波週期放大來看，如圖十三，可以發現腳電壓都是以 010 的順序循環，再加上腳電壓可以代表開關的狀態，因此可以推斷開關也是以開開關的順序循環。在此，我們定義在一個周期內開關導通的時間稱為 leg-duty。要得到 leg-duty 的值，可以利用相似三角形性質，大三角形的高比底會等於小三角形的高比底，即是 $H:S=ha:sa=hb:sb=hc:sc$ 。



圖十三：CBPWM 一個三角波週期示意圖 圖十四：相似三角形示意圖



圖十五：腳電壓對應切換狀態示意圖

$$H: S = ha : \text{leg-duty a}$$

$$\rightarrow 1 : 1 = 0.465 + 0.5 : \text{leg-duty a}$$

$$\rightarrow 1 : 1 = 0.965 : \text{leg-duty a}$$

$$\rightarrow \text{leg-duty a} = 0.965$$

切換狀態 000 的持續時間：1- leg-duty a

切換狀態 100 的持續時間：leg-duty a- leg-duty b

切換狀態 110 的持續時間：leg-duty b- leg-duty c

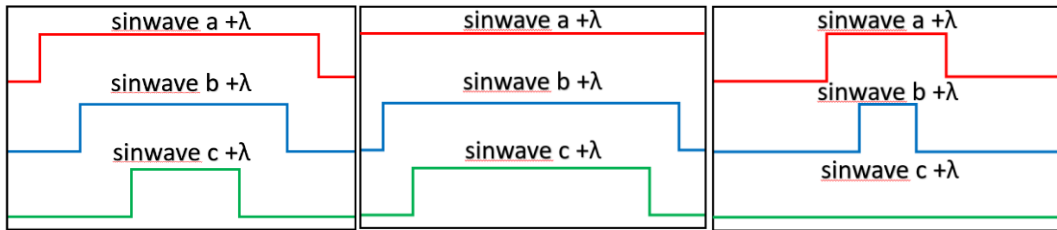
切換狀態 111 的持續時間：leg-duty c

藉由上述推導可得知，假如要求 leg-duty 的話，只需要把弦波的取樣值加上 0.5 後就可以得到 leg-duty。加上 0.5 後得到 leg-duty 之後，我們再繼續對它做運算，便可以得到各個切換狀態所持續的時間(圖十五)。

在上一頁的 CBPWM，我們將弦波與三角波進行比較得出的結果，它同時包含切換狀態與切換狀態所持續的時間，又我們之所以會需要設計一個三角波，也是為了得到弦波在轉換後的切換狀態與 leg-duty，然而藉由上段的推導，我們也可以得到同樣的結果，所以這個+ λ 的方法並不只可以簡化 CBPWM 的過程，省去設計三角波的步驟，還可以得到同樣的結果。

6-1-3.載波脈寬調變(CBPWM)- λ 的性質

性質一：上下界



圖十六： $\lambda=0.5$

圖十七： $\lambda=1-\max$

圖十八： $\lambda=-\min$

把弦波加上 λ 就能變成 leg-duty，如圖十六，接著，我們注意到 λ 是有上下限的，因為 leg-duty 是不能夠超過整個橫軸的，所以將 λ 設計到 leg-duty 等於一的值就是 λ 的上界，此時的 λ 是 $1-\max$ (\max 是最大的弦波值)，如圖十七，同理，把 λ 設計到 leg-duty 等於零的值就是 λ 的下界，此時的 λ 是 $-\min$ (\min 是最小的弦波值)，如圖十八。

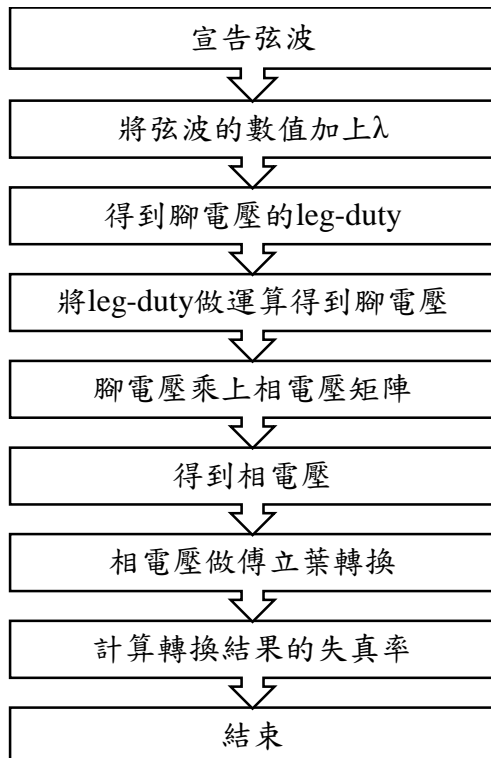
性質二：改變 λ 可以改變 000 與 111 的長度

縱向看下來，發現 000 與 111 的長度會因為 λ 的改變而有所改變，所以我們可以利用這點來設計我們想要的腳電壓，從圖十六看來，000 的長度是 $1-(\max+\lambda)$ ，111 的長度是 $\min+\lambda$ ，要是我們想要讓 000 跟 111 的比例是 $a:b$

的話，那 $\lambda = \frac{a-\max*a-\min*b}{a+b}$ ，如下方推導，而我們最常用的是讓 000 與

111 的長度一樣，也就是 $a=1, b=1$ ，在這時的 λ 就會等於 $\frac{1-\max-\min}{2}$ 。

CBPWM + λ 流程圖：



$$\begin{aligned}
 \min+\lambda:1-(\max+\lambda) &= a:b \\
 (1-\max-\lambda)a &= (\min+\lambda)b \\
 (1-\max)a &= \min b+\lambda b+\lambda a \\
 (1-\max)a-\min b &= (a+b)\lambda \\
 \lambda &= \frac{a-\max*a-\min*b}{(a+b)}
 \end{aligned}$$

6-2.空間向量脈寬調變(Space Vector PWM)

利用一種座標轉換，把弦波與切換狀態映射到 DQ 平面上，藉此可以比較容易求出目標向量是哪兩個基本向量組成又是藉由多少比例來合成。

6-2-1.派克變換 DQ 平面(Park's Transformation)

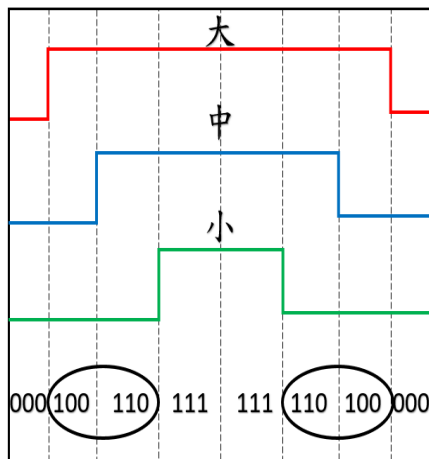
派克變換（也譯作帕克變換，Park's Transformation），是目前分析同步電動機運行最常用的一種坐標變換，由美國工程師派克（R.H.Park）在 1929 年提出。派克變換將定子的 a,b,c 三相電流投影到隨著轉子旋轉的 d 軸，q 軸與垂直於 dq 平面的 0 軸上去，從而實現了對定子電感矩陣的對角化，對同步電動機的運行分析起到了簡化作用。

$$T_{abc-dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \theta & \cos 2\theta \\ \sin 0 & \sin \theta & \sin 2\theta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

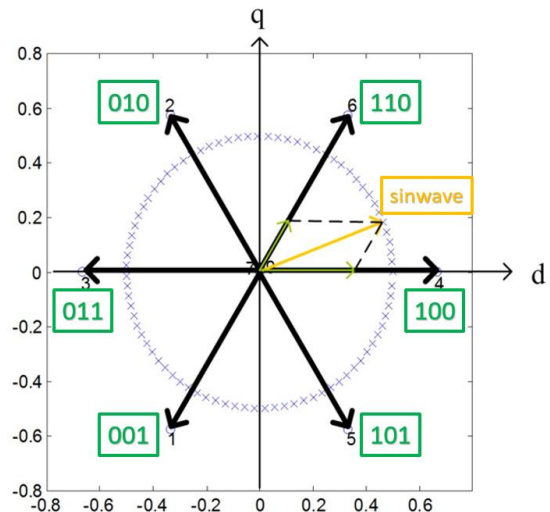
圖十九：派克變換定義映射矩陣($\theta = \frac{2\pi}{3}$)

6-2-2.DQ 平面分析

回顧之前的方法，我們需要一一比對弦波的數值誰大誰小，才可以知道當下的切換狀態，再利用切換狀態合成出弦波，但 SVPWM 不用，他只需要把弦波映射到 DQ 平面上，就可以很明白的知道他是由那些切換狀態所組成。例如，在一個取樣點，弦波的數值是 0.465, -0.073, -0.392，按照之前的方法，需要判斷是大中小之後，才可以知道切換狀態是 000、100、110、111、110、100、000，如圖二十，但 SVPWM 就不用這麼麻煩，直接看圖二十一，就可以馬上看出是由切換狀態 100 與 110 組成。



圖二十：腳電壓對應切換狀態



圖二十一：DQ 平面上基本向量
與目標向量示意圖

要具體實現空間向量脈波調變(SVPWM)，可以分成四個步驟：

步驟一：把切換狀態映射到 DQ 平面

切換狀態(腳電壓)總共有 8 種可能，造成相電壓也會有 8 種可能，把這 8 種相電壓都通過映射矩陣(圖十九)映射到 DQ 平面上，就可以得出切換狀態在 DQ 平面上的向量。下面舉出其中一種可能做推導，100 的切換狀態經過相電壓矩陣(頁碼 5)可以得到相電壓，再把相電壓乘上映射矩陣就可以得到切換狀態在 DQ 平面上的向量，其中第一列是 d 軸座標，第二列是 q 軸座標，第三列必定是零。

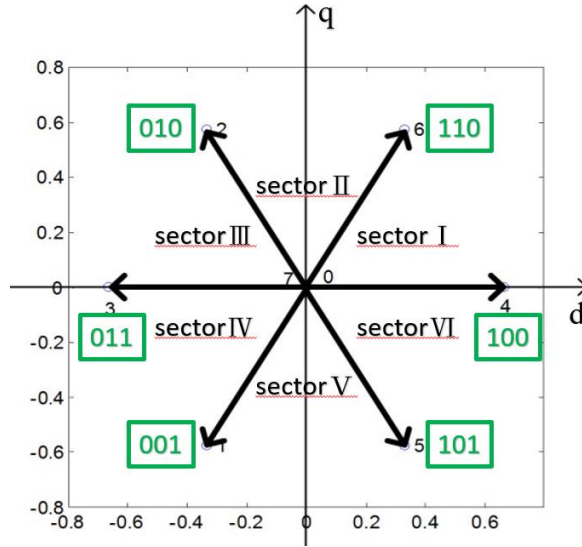
$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 \\ -1/3 \\ -1/3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \text{d-axis} \\ \text{q-axis} \\ \text{zero} \end{bmatrix} = T_{abc-dq} \begin{bmatrix} 2/3 \\ -1/3 \\ -1/3 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \theta & \cos 2\theta \\ \sin 0 & \sin \theta & \sin 2\theta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2/3 \\ -1/3 \\ -1/3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}。$$

由於第三列必定是零，便可以發現這過程起到了簡化作用，因為由原本三個變數(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})變成只有 D 軸座標跟 Q 軸座標兩個變數。在下方表格有整理出 8 種狀態對應的 DQ 座標，依序分別是腳電壓(切換狀態)、相電壓、以及 DQ 軸座標，接著再把 DQ 軸座標對應的向量畫出來，如圖二十二，發現向量可以依照角度把平面分成 6 個扇形， 0° 到 60° 是第一區， 61° 到 120° 是第二區，依此類推。

state	0	4	6	2	3	1	5	7
a	0	1	1	0	0	0	1	1
b	0	0	1	1	1	0	0	1
c	0	0	0	0	1	1	1	1
V_{an}	0	2/3	-1/3	-1/3	-2/3	1/3	1/3	0
V_{bn}	0	-1/3	2/3	-1/3	1/3	-2/3	1/3	0
V_{cn}	0	-1/3	-1/3	2/3	1/3	1/3	-2/3	0
d-axis	0	2/3	1/3	-1/3	2/3	-1/3	1/3	0
q-axis	0	0	$\sqrt{3}/3$	$\sqrt{3}/3$	0	$-\sqrt{3}/3$	$-\sqrt{3}/3$	0
zero	0	0	0	0	0	0	0	0

表二：切換狀態與相電壓與基本向量對應圖



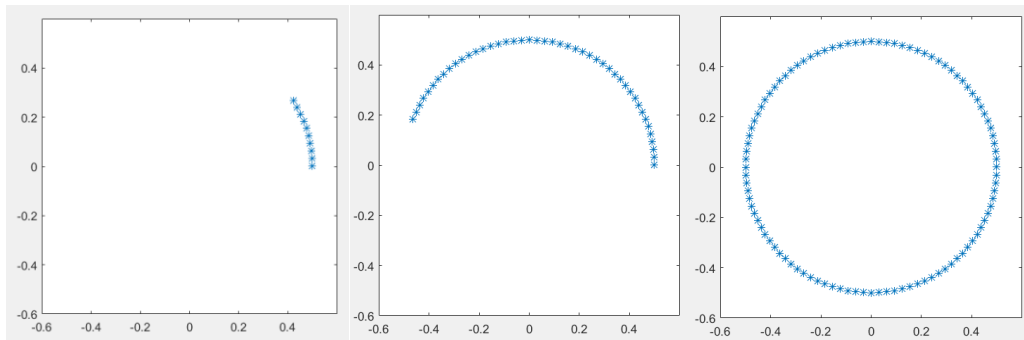
圖二十二：DQ 平面上基本向量示意圖

也許你會好奇，原本的 8 種切換狀態，到 DQ 平面上只剩 6 根向量，那怎麼夠呢？但是回去看看圖二十，可以觀察到頭尾一定是 000，中間一定是 111，所以我們只要知道除了 000 與 111 之外的另外兩個切換狀態就夠了，至於細節的部分，會在步驟三進行說明。

步驟二：把弦波映射到 DQ 平面

跟步驟一一樣，我們也把弦波映射到 DQ 平面上，發現出來的值第三列也會是零，也同樣有簡化作用，而第一列與第二列也是代表 DQ 平面上的 D 軸座標與 Q 軸座標，然後慢慢的把一個周期內的所有弦波映射到 DQ 平面上，我們會發現他會剛好繞成一圈(圖二十三)。

$$\begin{bmatrix} d - \text{axis} \\ q - \text{axis} \\ \text{zero} \end{bmatrix} = T_{abc-dq} \begin{bmatrix} \sin wave 1 \\ \sin wave 2 \\ \sin wave 3 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin wave 1 \\ \sin wave 2 \\ \sin wave 3 \end{bmatrix}。$$

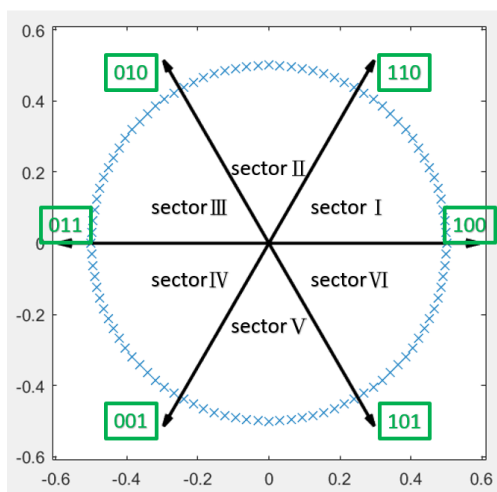


圖二十三：cos 弦波映射到 DQ 平面示意圖

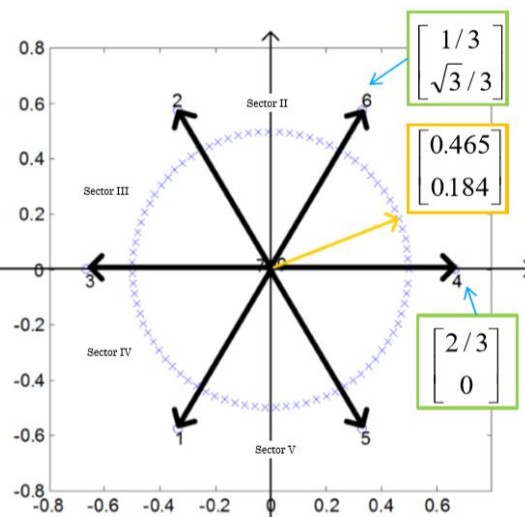
步驟三：結合步驟一與步驟二以及 duty ratio 推導

步驟三首先要結合步驟一跟步驟二的結果，把兩張圖放在一起，如圖二十四。這時先說明一下名詞，假如是弦波映射到 DQ 平面上的向量，稱作目標向量，而假如是切換狀態映射到 DQ 平面上的向量，則稱作基本向量。然後我們看目標向量坐落在哪裡，那他所對應的切換狀態就會是由與目標向量相鄰的那兩個基本向量。

例如當目標向量在第一區，那他的切換狀態就會是 100 與 110，或是當目標向量在第二區，那他的切換狀態就會是 010 與 110，依此類推。



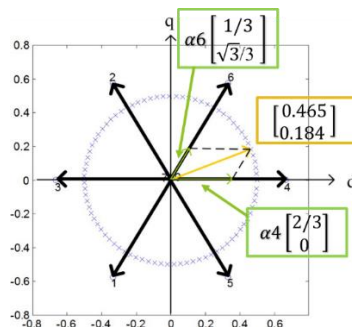
圖二十四：腳電壓與弦波映射到 DQ 平面示意圖



圖二十五：第一區的目標向量與它所對應的基本向量

那因為一個扇形內所有的弦波都是由相鄰的切換狀態來組成，也就是說同樣的切換狀態可以合成出不同的弦波，但要怎麼利用相同的切換狀態組成不同的弦波呢，想必就是利用不同的比例關係了，所以接下來就要來算每個弦波的切換狀態比例是怎麼分配的。

利用例子來說明的話，假設今天的目標向量座標是 $[0.465 \ 0.184]$ (圖二十五)，那他所對應的基本向量就是與之相鄰的那兩根，座標分別是 $[1/3 \ \sqrt{3}/3]$ 、 $[2/3 \ 0]$ ，接下來就要利用向量加法的概念來推導，那因為兩根基本向量的長度太長了，加起來一定會超過目標向量，所以要取他們的比例來做加法，而那個比例也就會恰恰好等於切換狀態的比例。



圖二十六：目標向量與基本向量關係示意圖

目標向量*總導通時間 = 1 個上導通的切換狀態*他自己的導通時間
+ 2 個上導通的切換狀態*他自己的導通時間

$$\begin{bmatrix} \sin d q x \\ \sin d q y \end{bmatrix} T = [M1] T_1 + [M2] T_2 \quad (T_1, T_2 < T)$$

$$\begin{bmatrix} \sin d q x \\ \sin d q y \end{bmatrix} = [M1] \alpha_1 + [M2] \alpha_2 \quad (\alpha_1 = \frac{T_1}{T} = \text{duty ratio})$$

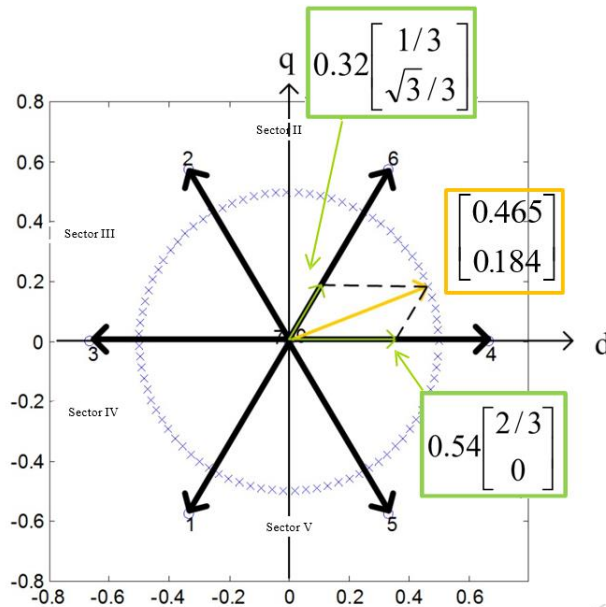
$$\begin{bmatrix} 0.465 \\ 0.184 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 \\ 0 \end{bmatrix} \alpha_4 + \begin{bmatrix} 1/3 \\ \sqrt{3}/3 \end{bmatrix} \alpha_6$$

$$\begin{bmatrix} 0.465 \\ 0.184 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 1/3 \\ 0 & \sqrt{3}/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_4 \\ \alpha_6 \end{bmatrix}$$

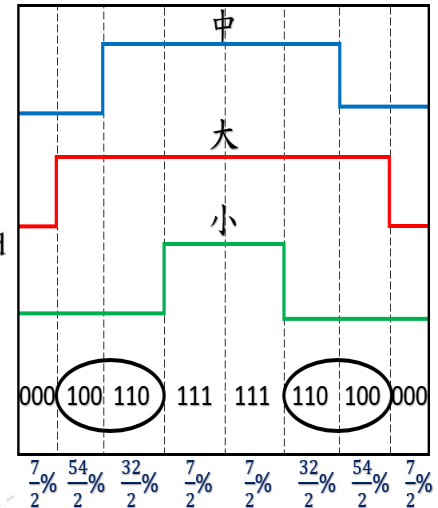
$$\begin{bmatrix} \alpha_4 \\ \alpha_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 1/3 \\ 0 & \sqrt{3}/3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0.465 \\ 0.184 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_4 \\ \alpha_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.54 \\ 0.32 \end{bmatrix}$$

經過上段的推導後，得出 $\alpha_4=0.54$, $\alpha_6=0.32$ ，代表 100 切換狀態占了整體時間的 54%，110 的切換狀態占了 32%，剩下的 14%，就分給了固定的那 2 種切換狀態，000 與 111，所以 000 跟 111 的比例都是 7%，可參考圖二十。所以切換狀態的持續時間(duty ratio)的求法，就是把基本向量的座標進行反矩陣再與弦波座標相乘。



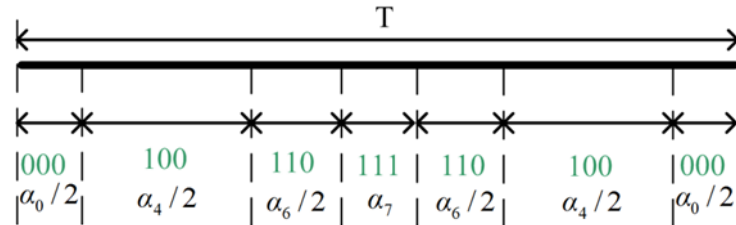
圖二十七：目標向量與基本向量合成示意圖



圖二十八：切換狀態與 duty ratio 示意圖

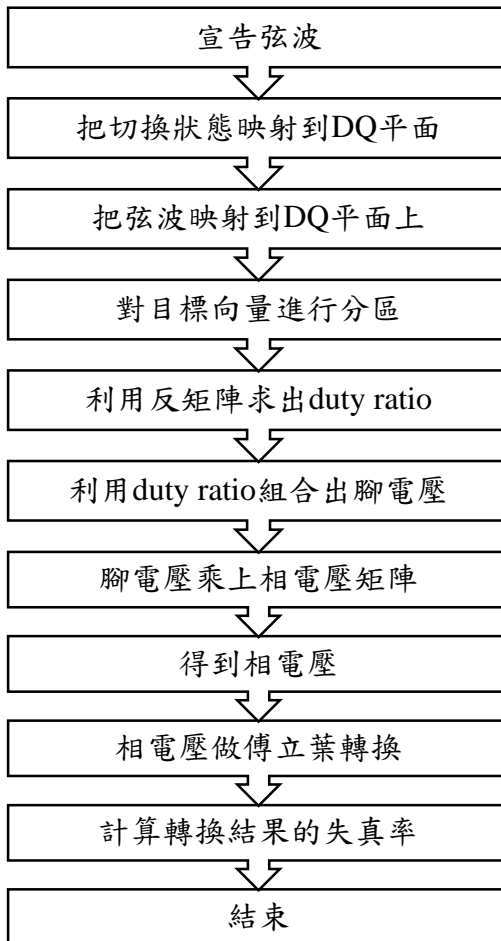
步驟四：排列成 0127 的形式

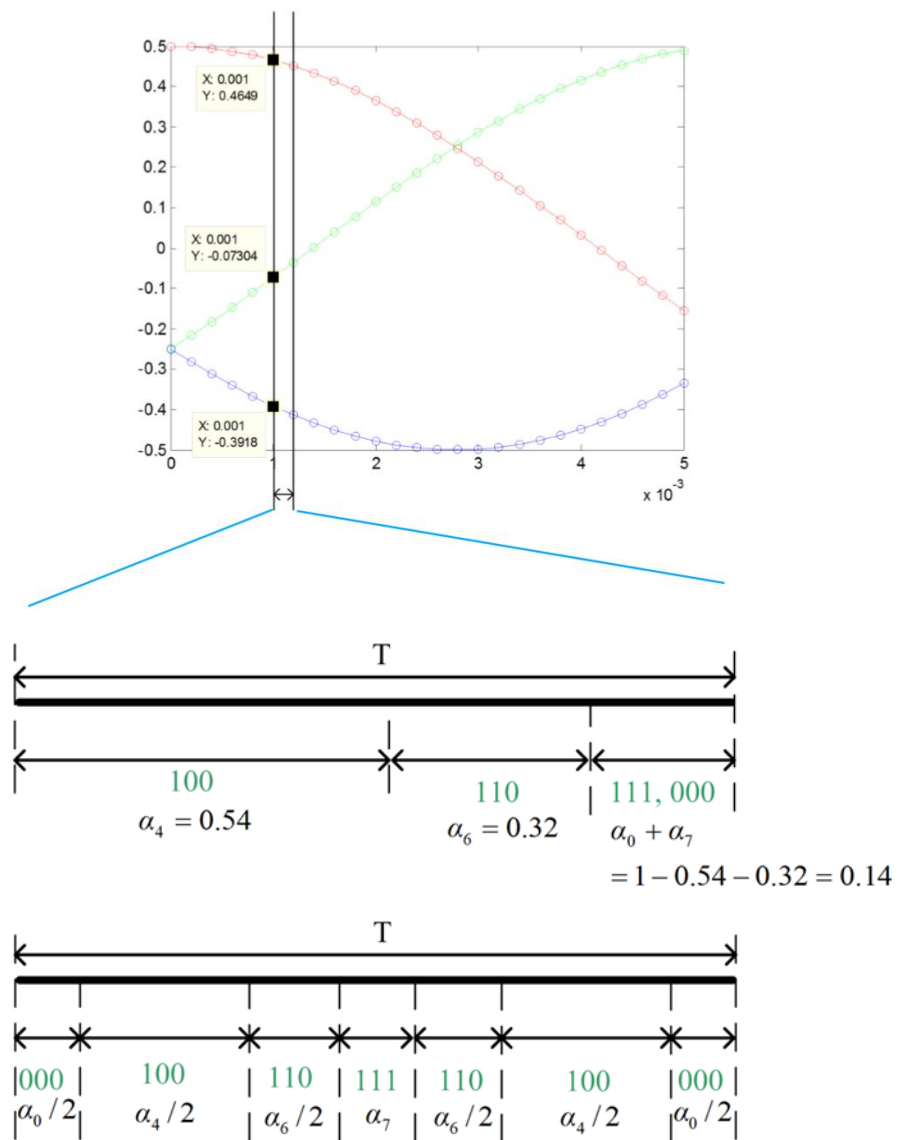
最後一步，就是排出完整的腳電壓，像是圖二十八，或圖二十九的樣子，按照 000、100、110、111、110、100、000 的順序作排列，比例也都在步驟三求出來了，所以這一步是很簡單的但為甚麼要按照 0127 的排列，一是因為 CBPWM 出來的結果就是這樣，二是因為再開關從一種切換狀態到另一種只切換一次開關



圖二十九：切換狀態與 duty ratio 關係示意圖

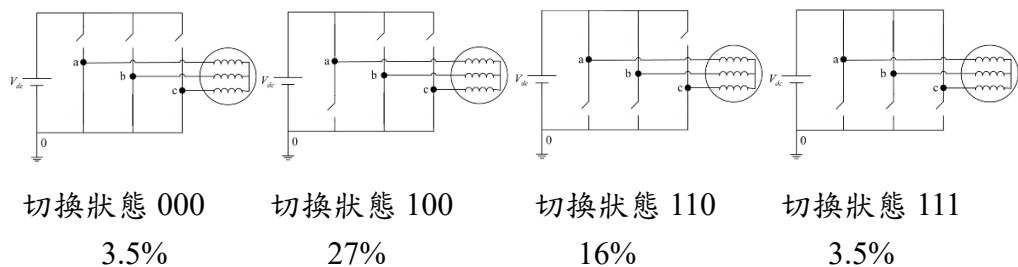
一區流程圖：





圖三十：切換狀態組合出弦波示意圖

舉例來說，如果要合成出[0.465,-0.073,-0.392]的弦波 1 秒，那開關就要像下方一樣做切換，000:0.035 秒,100:0.27 秒,110:0.016 秒,111:0.035 秒,111:0.035 秒,110:0.016 秒,100:0.27 秒, 000:0.035，簡圖如圖三十，再開關這樣子切換後，出來的相電壓做傅立葉結果才會跟預測的弦波一樣。



圖三十一：開關切換狀態改變示意圖(半週期)

6-3.比對 CBPWM SVPWM 關聯性

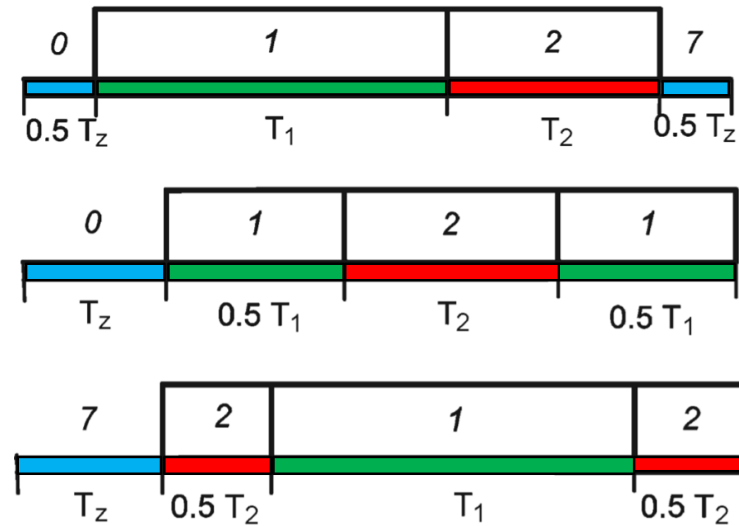
比較 CBPWM 與 SVPWM，兩者乍看之下沒有關聯性，但其實是有很深的關聯性。在 CBPWM 中的加 λ 部分有介紹說改變 λ 也會造成切換狀態 000 跟 111 的長度改變，而這樣的觀念，在 SVPWM 也有，在 SVPWM 裡，000 與 111 的長度，指的就是 α_0 與 α_7 。所以在 SVPWM 內，讓 α_0 等於 α_7 ，就等於在 CBPWM 內讓 000 跟 111 長度一樣，造成 CBPWM 的結果就會等於 SVPWM 的結果，也就是當 CBPWM 的 $\lambda = \frac{1-\max-\min}{2}$ 時，CBPWM 會等於 SVPWM。

七.混合型脈寬調變發展

7-1.特殊序列一分析

之前的寫出來的腳電壓，它的切換序列稱作 0127，那之所以會叫做 0127 是因為在圖三十中它的順序是 0 個上導通，1 個上導通，2 個上導通，全部上導通，2 個上導通，1 個上導通，0 個上導通，可以發現整體是有對稱性的，所以我們為了方便起見，便叫這個最原始的切換序列 0127。

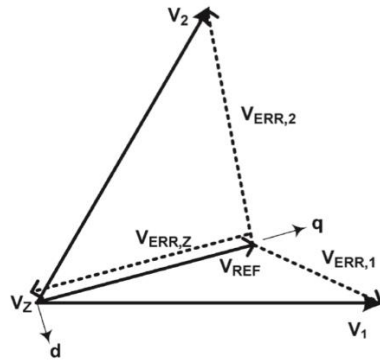
那為了優化 0127，就發展出其他種的切換序列，例如 0121,1012,1210,1272,2101,2127,2721,7210,7212，這裡使用其中的 0121 以及 7212 這兩種，如圖三十二，這兩種切換序列合稱特殊序列一。那為了判別特殊序列與原始序列的差別以及優異，會使用 HDF 作為指標。



圖三十二：原始切換序列與特殊序列一

7-2.Current ripple(HDF)

HDF 是指累加電壓誤差的曲線有效值，指的是說由於它在 DQ 平面上不會剛好落在目標向量的位置，所以會有電壓誤差，把電壓誤差累積起來，就會有目標向量每個角度的誤差曲線，將之取有效值就會是 HDF。而這些誤差(HDF)會讓電流產生漣漪，進而讓電流的失真率(ITHD)上升。所以我們接下來要做的就是找出每個目標向量最小的 HDF，並且使用它所屬的序列，就可以得到最小失真率的切換序列了。



$$V_{ERR,1} = V_1 - V_{REF}$$

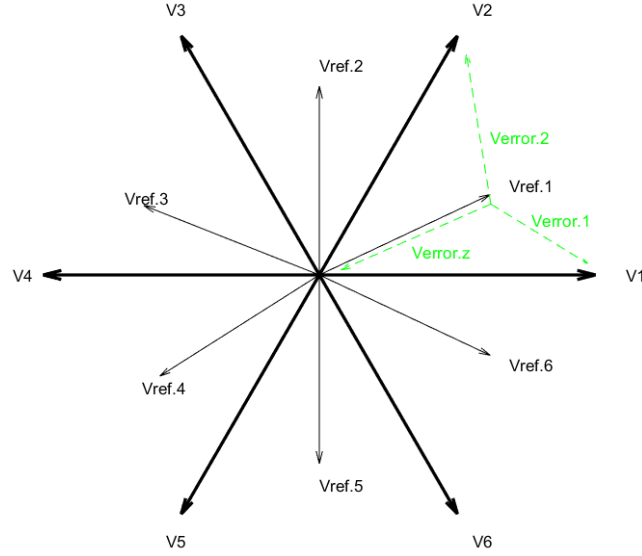
$$V_{ERR,2} = V_2 - V_{REF}$$

$$V_{ERR,Z} = -V_{REF}$$

圖三十三：目標向量的瞬時誤差示意圖 圖三十四：誤差向量數學表示法

至於要如何計算誤差的值，可以由圖三十三看出，一個目標向量，他會有三個電壓誤差，分別是 $V_{error,1}$ 、 $V_{error,2}$ 、 $V_{error,z}$ 。然後很明顯可以看出 $V_{error,1} = V_1 - V_{REF}$ 、 $V_{error,2} = V_2 - V_{REF}$ 、 $V_{error,z} = -V_{REF}$ ，接下來我們再利用向量分解法把 V_1 、 V_2 、 V_z 都拆解到 DQ 兩軸上。如圖三十三，Q 軸就是目標向量的方向，D 軸就是與目標向量垂直且指向一個上導通的方向，例如當目標向量坐落在第一區，此時 Q 軸就是目標向量的方向沒有問題，但 D 軸要與目標向量垂直，所以會有兩種可能，這時我們要看他兩邊的基本向量是由幾個上導通所映射的， V_1 由 100 所映射，一個上導通，而 V_2 由 110 所映射，兩個上導通，所以 D 軸會指向 V_1 的方向，如圖所示。再比如當目標向量坐落在第二區，此時 Q 軸是目標向量的方向，但 D 軸會指向 V_3 的方向，因為 V_3 是 010，一個上導通，而 V_2 是 110，兩個上導通，所以會指向 V_3 並與 D 軸垂直。

我們把這觀念同樣應用到其他 5 區，就會出現像下頁的推導一樣，要注意的是此時的 DQ 軸並不是一個固定的兩軸，他會因為目標向量的轉動而跟著轉動，是一種旋轉座標，以及 D 軸方向會根據目標向量所在的區域而有所改變。



圖三十五：目標向量與誤差向量關係圖(α =目標向量與 V_1 的夾角)

誤差向量 = 誤差分解到 D 軸的值 + 誤差分解到 Q 軸的值

第一區：

$$\begin{aligned} V_{error,1} &= V_1 - V_{REF.1} = V_1 \sin \alpha + V_1 \cos \alpha - V_{REF.1} \\ V_{error,2} &= V_2 - V_{REF.1} = -V_2 \sin(60^\circ - \alpha) + V_2 \cos(60^\circ - \alpha) - V_{REF.1} \\ V_{error,z} &= -V_{REF.1} = 0 + -V_{REF.1} \end{aligned}$$

第二區：

$$\begin{aligned} V_{error,1} &= V_3 - V_{REF.2} = V_3 \sin(120^\circ - \alpha) + V_3 \cos(120^\circ - \alpha) - V_{REF.2} \\ V_{error,2} &= V_2 - V_{REF.2} = -V_2 \sin(\alpha - 60^\circ) + V_2 \cos(\alpha - 60^\circ) - V_{REF.2} \\ V_{error,z} &= -V_{REF.2} = 0 + -V_{REF.2} \end{aligned}$$

第三區：

$$\begin{aligned} V_{error,1} &= V_3 - V_{REF.3} = V_3 \sin(\alpha - 120^\circ) + V_2 \cos(\alpha - 60^\circ) - V_{REF.3} \\ V_{error,2} &= V_4 - V_{REF.3} = -V_4 \sin(180^\circ - \alpha) + V_4 \cos(180^\circ - \alpha) - V_{REF.3} \\ V_{error,z} &= -V_{REF.3} = 0 + -V_{REF.3} \end{aligned}$$

第四區：

$$\begin{aligned} V_{error,1} &= V_5 - V_{REF.4} = V_5 \sin(240^\circ - \alpha) + V_5 \cos(240^\circ - \alpha) - V_{REF.4} \\ V_{error,2} &= V_4 - V_{REF.4} = -V_4 \sin(\alpha - 180^\circ) + V_4 \cos(\alpha - 180^\circ) - V_{REF.4} \\ V_{error,z} &= -V_{REF.4} = 0 + -V_{REF.4} \end{aligned}$$

第五區：

$$\begin{aligned} V_{error,1} &= V_5 - V_{REF.5} = V_5 \sin(\alpha - 240^\circ) + V_5 \cos(\alpha - 240^\circ) - V_{REF.5} \\ V_{error,2} &= V_6 - V_{REF.5} = -V_6 \sin(300^\circ - \alpha) + V_6 \cos(300^\circ - \alpha) - V_{REF.5} \\ V_{error,z} &= -V_{REF.5} = 0 + -V_{REF.5} \end{aligned}$$

第六區：

$$\begin{aligned} V_{error,1} &= V_1 - V_{REF.6} = V_1 \sin(360^\circ - \alpha) + V_1 \cos(360^\circ - \alpha) - V_{REF.6} \\ V_{error,2} &= V_6 - V_{REF.6} = -V_6 \sin(\alpha - 300^\circ) + V_6 \cos(\alpha - 300^\circ) - V_{REF.6} \\ V_{error,z} &= -V_{REF.6} = 0 + -V_{REF.6} \end{aligned}$$

再來就可以來算 HDF 了，但把 V_{error} 的 DQ 軸整個寫出來太長了，所以就用的新符號表示，如下方表示。

誤差向量=誤差分解到 D 軸的值 + 誤差分解到 Q 軸的值

$$V_{error,1} = V_{error,1,d} + V_{error,1,q}$$

$$V_{error,2} = V_{error,2,d} + V_{error,2,q}$$

接著是 Q1、Q2、Qz 以及 D1、D2、Dz，也就是把停留時間也計算進去，因為停留時間越長，那誤差累加起來也會跟著上升，同樣分成 DQ 兩軸各別計算，如下方表示。

Q/D = 誤差向量*停留時間

$$Q1 = V_{error,1,q} * T1$$

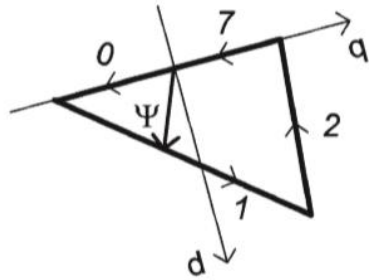
$$Q2 = V_{error,2,q} * T2$$

$$Qz = V_{error,z} * Tz$$

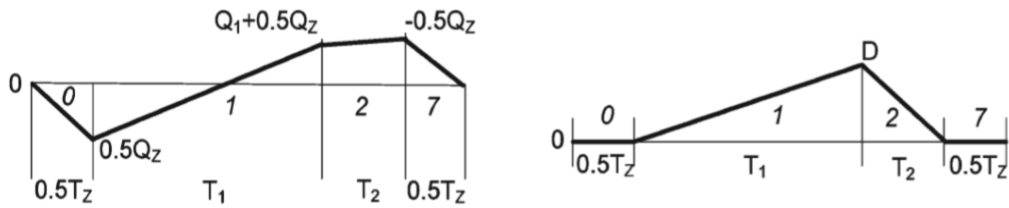
$$D1 = V_{error,1,d} * T1$$

$$D2 = V_{error,2,d} * T2$$

$$Dz = 0$$



圖三十六：0127 的誤差移動示意圖

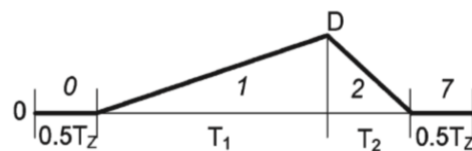
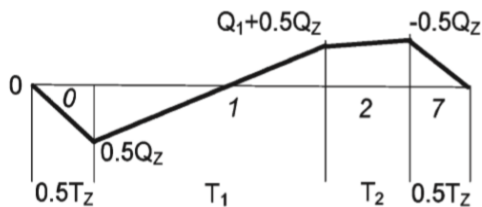


圖三十七：0127 的 Q 軸誤差示意圖 圖三十八：0127 的 D 軸誤差示意圖

假如切換序列是 0127，那它的誤差移動方式就會跟切換序列的順序一樣，如圖三十六，先從 0 開始依序按照 0127 的順序移動，一樣把誤差拆乘 DQ 兩軸來看，Q 軸誤差就會如圖三十七，D 軸誤差就會如圖三十八。

圖三十七或三十八的橫軸表示時間，縱軸表示誤差量，從 0 到 1 會有誤差產生是從 0 到 $0.5Qz$ ，從 1 到 2 也會有誤差產生，但之前的誤差仍存在，也要計算進去，所以誤差就是 $0.5Qz$ 到 $Q1+0.5Qz$ ，同理，1 到 2 的誤差是 $Q1+0.5Qz$ 到 $Q1+Q2+0.5Qz$ ，但因為 $Q1+Q2+Qz$ 等於零，所以也可以寫成 $Q1+0.5Qz$ 到 $-0.5Qz$ ，如圖三十七，最後 2 到 7 的誤差是 $-0.5Qz$ 到 0，那 D 軸也是一樣的操作模式。

先前有提到 HDF 就是瞬時誤差的有效值，而有效值在推導後的算法就是：首² + 首 * 尾 + 尾²，將它應用到下方的圖中，得出的結果就是最後完整的 HDF 數值了。



圖三十七：0127 的 Q 軸誤差示意圖

圖三十八：0127 的 D 軸誤差示意圖

$$\text{Part1} : (0)^2 + (0) * (0.5Qz) + (0.5Qz)^2$$

$$\text{Part2} : (0.5Qz)^2 + (0.5Qz) * (Q1 + 0.5Qz) + (Q1 + 0.5Qz)^2$$

$$\text{Part3} : (Q1 + 0.5Qz)^2 + (Q1 + 0.5Qz) * (-0.5Qz) + (-0.5Qz)^2$$

$$\text{Part4} : (-0.5Qz)^2 + (-0.5Qz) * (0) + (0)^2$$

$$\text{HDF_Q} = \text{Part1} + \text{Part2} + \text{Part3} + \text{Part4}$$

$$\text{Part1} : (0)^2 + (0) * (0.5Dz) + (0.5Dz)^2$$

$$\text{Part2} : (0.5Dz)^2 + (0.5Dz) * (Q1 + 0.5Dz) + (Q1 + 0.5Dz)^2$$

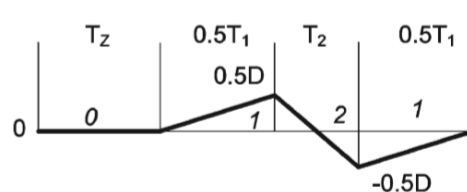
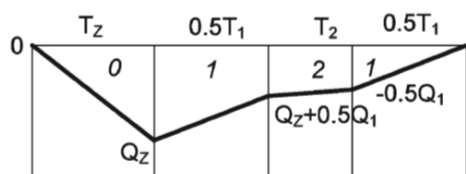
$$\text{Part3} : (Q1 + 0.5Dz)^2 + (Q1 + 0.5Dz) * (-0.5Dz) + (-0.5Dz)^2$$

$$\text{Part4} : (-0.5Dz)^2 + (-0.5Dz) * (0) + (0)^2$$

$$\text{HDF_D} = \text{Part1} + \text{Part2} + \text{Part3} + \text{Part4}$$

$$\text{HDF} = \text{HDF_Q} + \text{HDF_D}$$

同樣的，0121 跟 7212 也是按照同樣算法得出 HDF 的數值



圖三十九：0121 的 Q 軸誤差示意圖

圖四十：0121 的 D 軸誤差示意圖

$$\text{Part1} : (0)^2 + (0) * (Qz) + (Qz)^2$$

$$\text{Part2} : (Qz)^2 + (Qz) * (0.5Q1 + Qz) + (0.5Q1 + Qz)^2$$

$$\text{Part3} : (0.5Q1 + Qz)^2 + (0.5Q1 + Qz) * (-0.5Q1) + (-0.5Q1)^2$$

$$\text{Part4} : (-0.5Q1)^2 + (-0.5Q1) * (0) + (0)^2$$

$$\text{HDF0121_Q} = \text{Part1} + \text{Part2} + \text{Part3} + \text{Part4}$$

$$\text{Part1} : (0)^2 + (0) * (Dz) + (Dz)^2$$

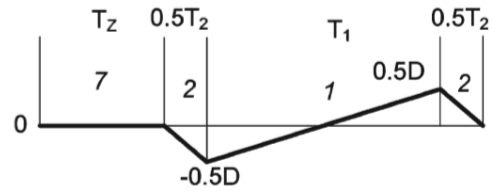
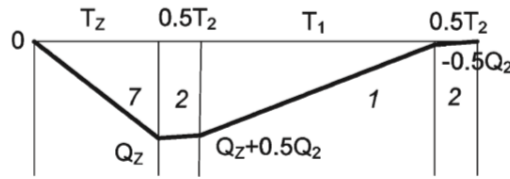
$$\text{Part2} : (Dz)^2 + (Dz) * (0.5D1 + Dz) + (0.5D1 + Dz)^2$$

$$\text{Part3} : (0.5D1 + Dz)^2 + (0.5D1 + Dz) * (-0.5D1) + (-0.5D1)^2$$

$$\text{Part4} : (-0.5D1)^2 + (-0.5D1) * (0) + (0)^2$$

$$\text{HDF0121_D} = \text{Part1} + \text{Part2} + \text{Part3} + \text{Part4}$$

$$\text{HDF0121} = \text{HDF0121_Q} + \text{HDF0121_D}$$



圖四十一：0121 的 Q 軸誤差示意圖 圖四十二：0121 的 D 軸誤差示意圖

$$\text{Part1} : (0)^2 + (0) \cdot (Q_z) + (Q_z)^2$$

$$\text{Part2} : (Q_z)^2 + (Q_z) \cdot (0.5Q_2 + Q_z) + (0.5Q_2 + Q_z)^2$$

$$\text{Part3} : (0.5Q_2 + Q_z)^2 + (0.5Q_2 + Q_z) \cdot (-0.5Q_2) + (-0.5Q_2)^2$$

$$\text{Part4} : (-0.5Q_2)^2 + (-0.5Q_2) \cdot (0) + (0)^2$$

$$\text{HDF7212_Q} = \text{Part1} + \text{Part2} + \text{Part3} + \text{Part4}$$

$$\text{Part1} : (0)^2 + (0) \cdot (D_z) + (D_z)^2$$

$$\text{Part2} : (D_z)^2 + (D_z) \cdot (0.5D_2 + D_z) + (0.5D_2 + D_z)^2$$

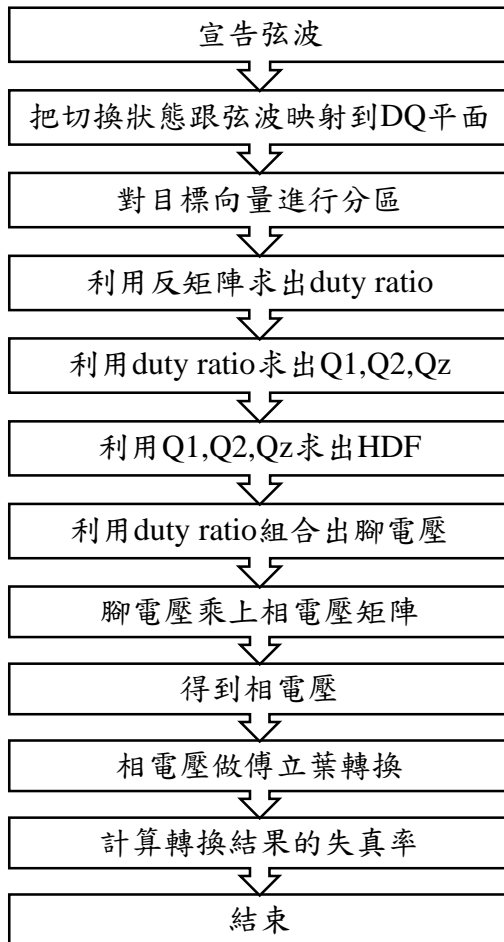
$$\text{Part3} : (0.5D_2 + D_z)^2 + (0.5D_2 + D_z) \cdot (-0.5D_2) + (-0.5D_2)^2$$

$$\text{Part4} : (-0.5D_2)^2 + (-0.5D_2) \cdot (0) + (0)^2$$

$$\text{HDF7212_D} = \text{Part1} + \text{Part2} + \text{Part3} + \text{Part4}$$

$$\text{HDF7212} = \text{HDF7212_Q} + \text{HDF7212_D}$$

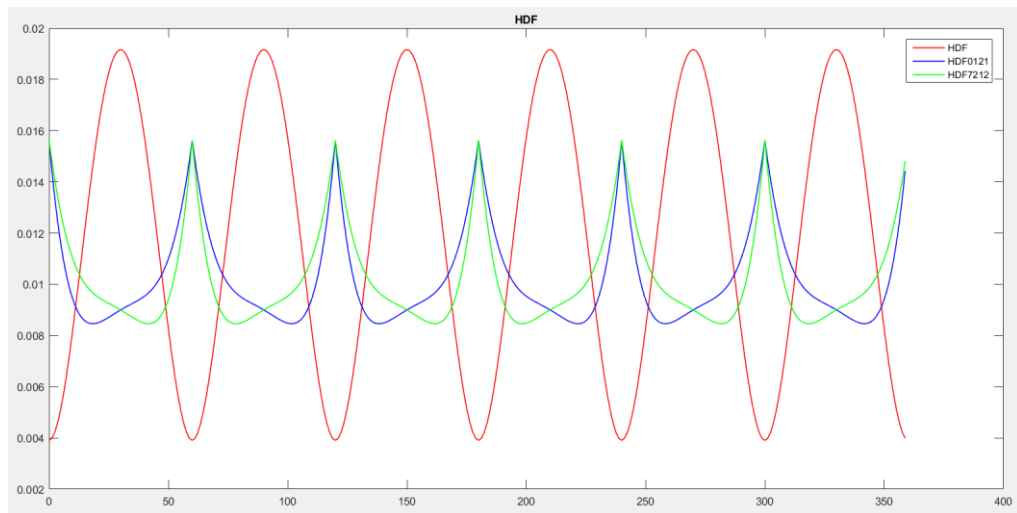
一區 HDF 流程圖：



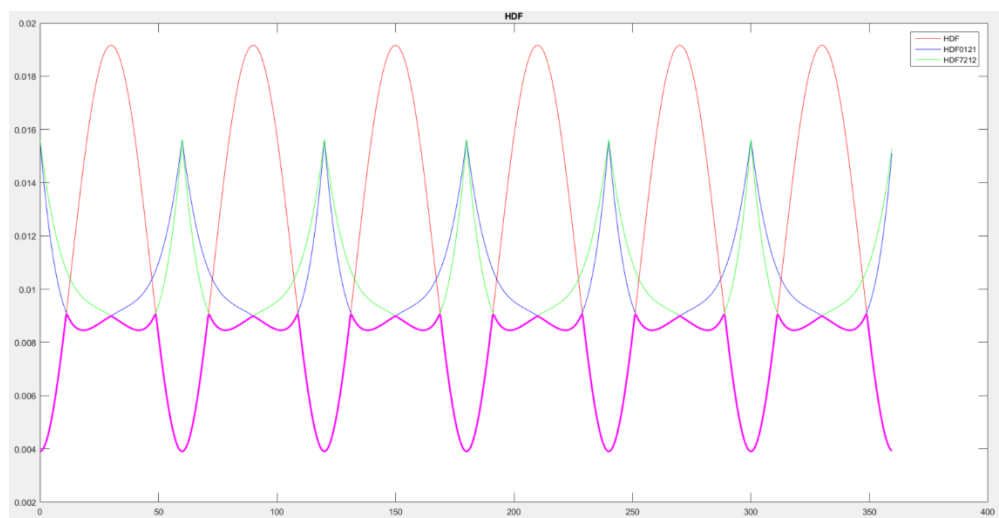
7-3.混合型脈寬調變

現在有 3 種切換序列了，也有各自的 HDF 數值，我們在製作腳電壓時可以讓整個腳電壓的切換序列都是 0127 或是整個都是 012 看誰最後的 THD 最低從 3 個中選擇 1 個來使用。但發現更好的方法是把三種切換序列都拿來用，看當下時間點都的 HDF 最低，就使用那個切換序列。

舉例來說，圖四十三是 3 種切換序列在弦波震幅 0.5 的 HDF 值，橫軸代表目標向量所在的角度，縱軸是當下的 HDF 值。可以看到在根據目標向量所在的角度，HDF 會一直變，而且不會有某一個切換序列一直保持著最小的值。例如在 60° 時，會是 0127 擁有最小的 HDF，但在 100° 時，則是 0121 擁有最小的 HDF。所以更好的方法就是選出當下 HDF 值最小的切換序列就使用那種切換序列來製作腳電壓，這樣下來，選到的 HDF 就一定是最小的值，如圖四十四，也因為 HDF(誤差)是最小，所以出來的電流失真率(ITHD)也會最小，也就是說混合型的失真率會比一區的好。

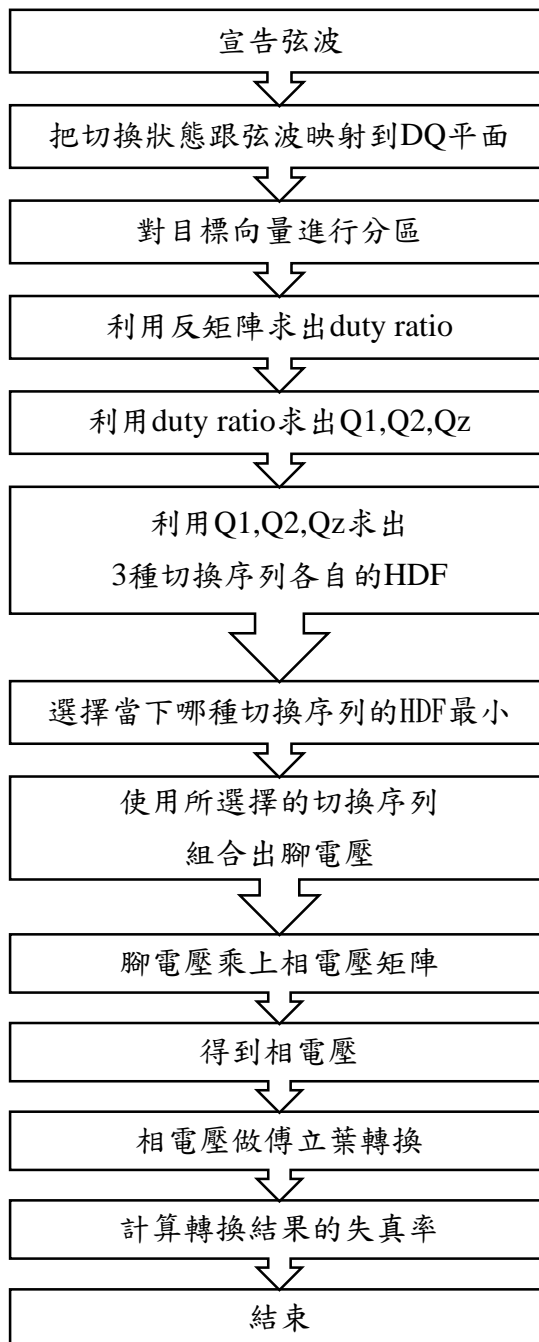


圖四十三：弦波頻率 50，震幅 0.5，三種切換序列各自的 HDF



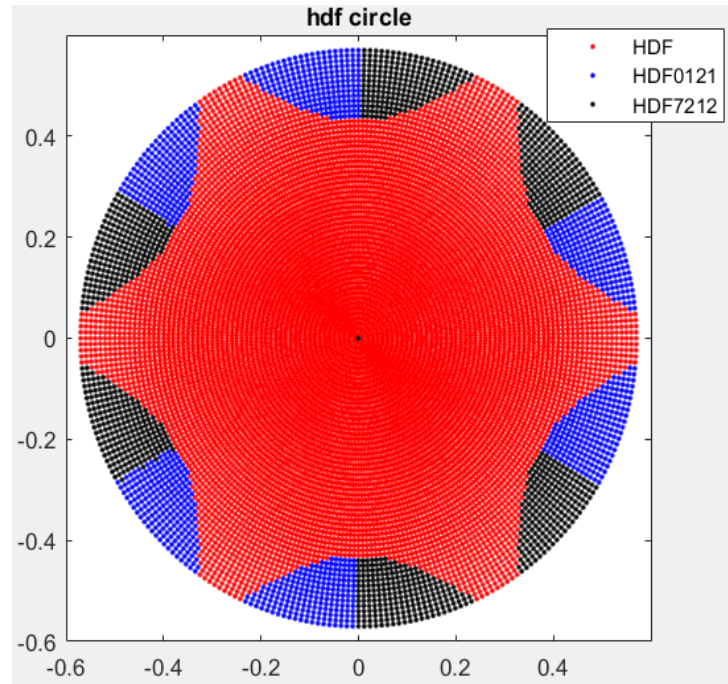
圖四十四：弦波頻率 50，震幅 0.5，選擇使用的 HDF

混合型脈寬調變流程圖：



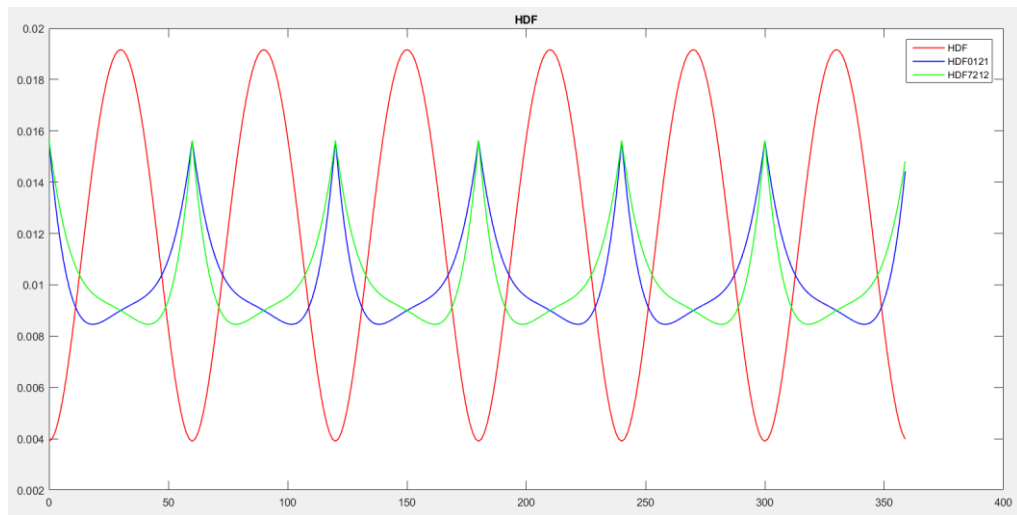
八.模擬結果

8-1.三相二階



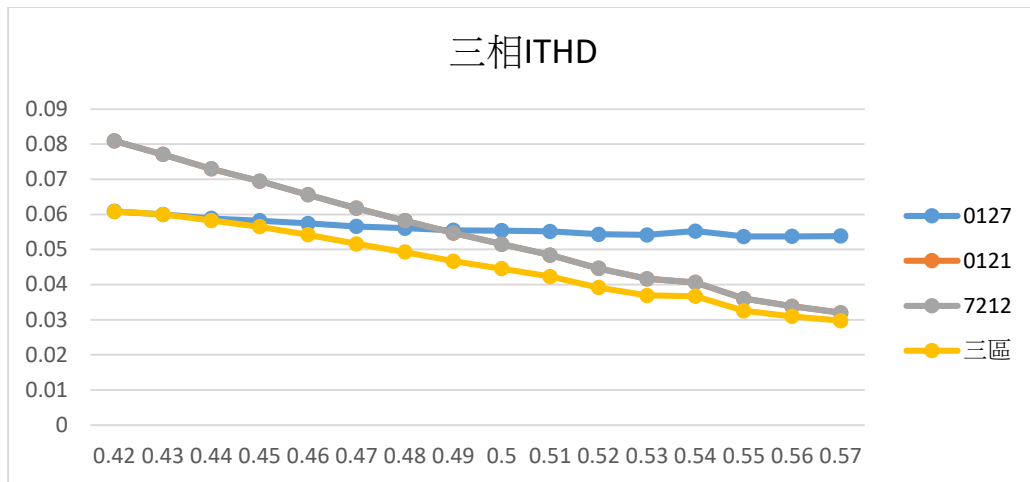
三相二階 DQ 平面 HDF 分布圖

上圖是三相二階的 3 種切換序列在不同震幅以及不同角度下 HDF 最低的分布圖，每個點代表目標向量映射到 DQ 平面的座標，而顏色表示最低的 HDF 是哪種切換序列。



運算頻率 36k 振幅 0.5 的三相二階 HDF 圖

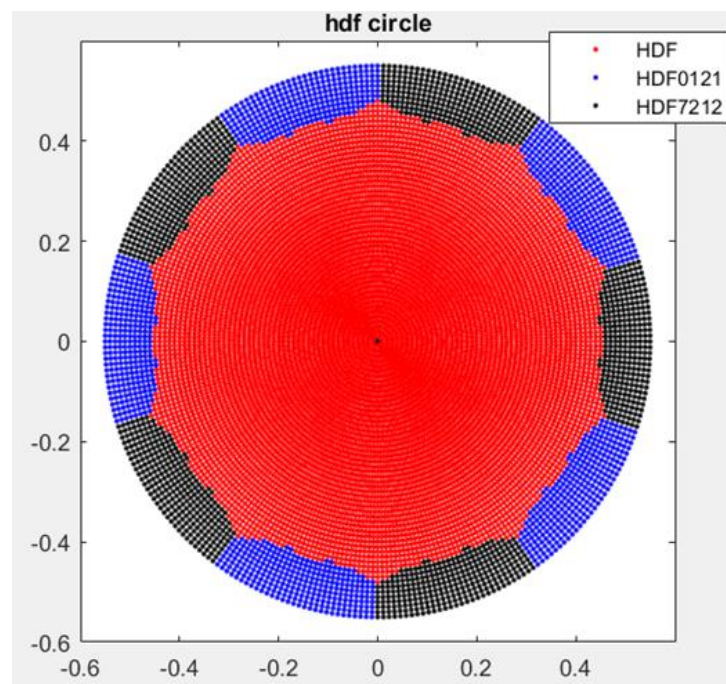
上圖是三相二階的 3 種切換序列在弦波震幅 0.5 的 HDF 值，橫軸代表目標向量所在的角度，縱軸是當下的 HDF 值。可以看到在根據目標向量所在的角度，HDF 會一直變，並大致以 60° 循環一次。最小的切換序列為 0° 到 11° 是 0127， 11° 到 30° 是 0121， 30° 到 49° 是 7212， 49° 到 60° 是 0127，而這樣的趨勢與三相二階 DQ 平面 HDF 分布圖在震幅 0.5 的圓符合。



運算頻率 36k 的三相二階 ITHD 圖

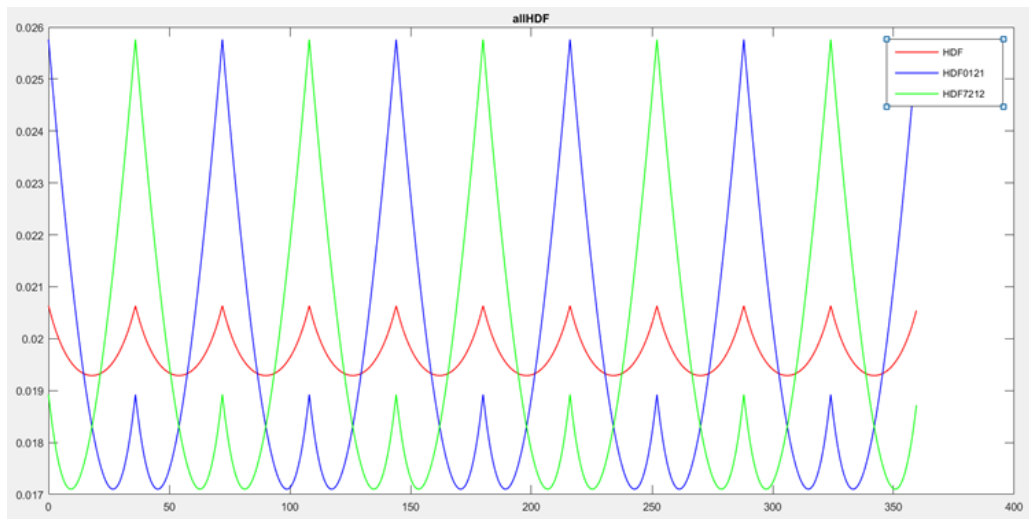
上圖是三相二階的 3 種切換序列以及混合型的電流失真率圖，可以看到混合型(三區)在不同振幅的電流失真率都會比一區(只使用單一切換序列)來的低，符合 7-3 節所講的混合型的特性以及優點。

8-2 五相二階



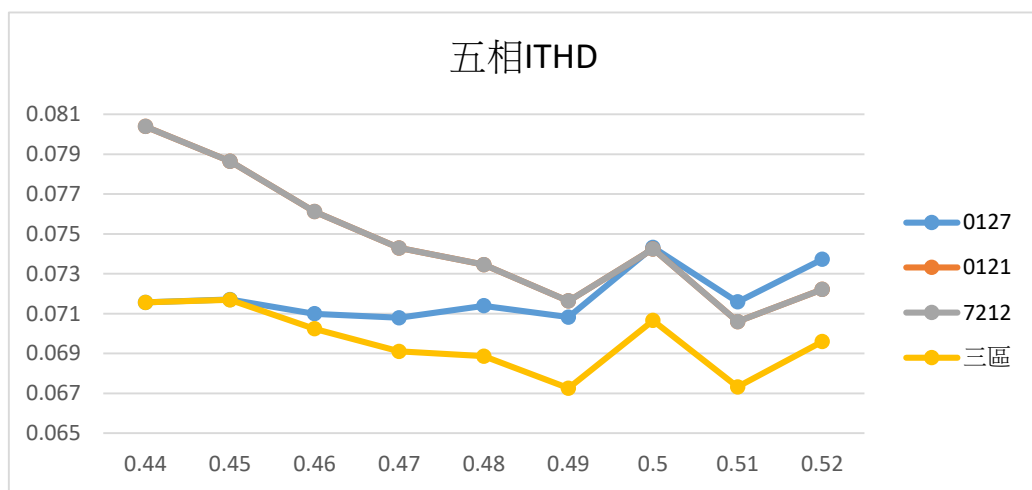
五相二階 DQ 平面 HDF 分布圖

上圖是五相二階的 3 種切換序列在不同震幅以及不同角度下 HDF 最低的分布圖，每個點代表目標向量映射到 DQ 平面的座標，而顏色表示最低的 HDF 是哪種切換序列。在震幅低時，都會選擇切換序列 0127，但在震幅高時就開始只選 0121 或 7212 了，不會選擇到 0127。



運算頻率 36k 振幅 0.5 的五相二階 HDF 圖

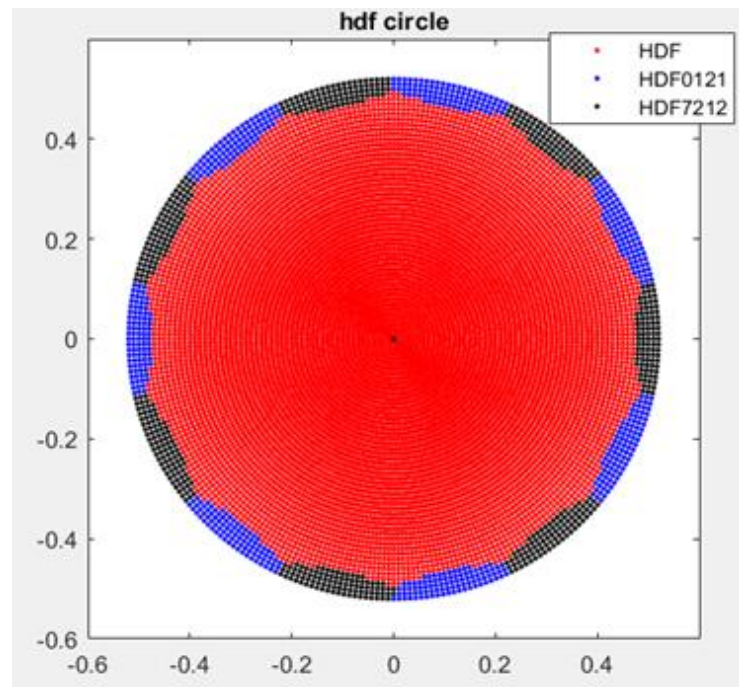
上圖是五相二階的 3 種切換序列在弦波震幅 0.5 的 HDF 值，橫軸代表目標向量所在的角度，縱軸是當下的 HDF 值。可以看到在根據目標向量所在的角度，HDF 會一直變，並大致以 72° 循環一次，按照 7212-0121-7212 的順序，且都不會選擇到 0127，而這樣的趨勢與五相二階 DQ 平面 HDF 分布圖在震幅 0.5 的圖符合。



運算頻率 36k 的五相二階 ITHD 圖

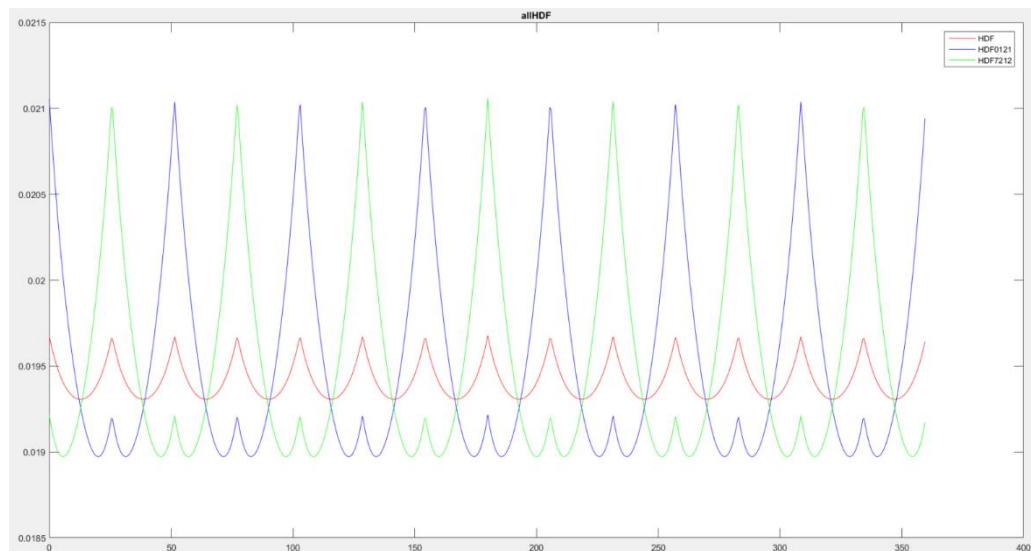
上圖是五相二階的 3 種切換序列以及混合型的電流失真率圖，可以看到混合型(三區)在不同振幅的電流失真率都會比一區(只使用單一切換序列)來的低，符合 7-3 節所講的混合型的特性以及優點。

8-3 七相二階



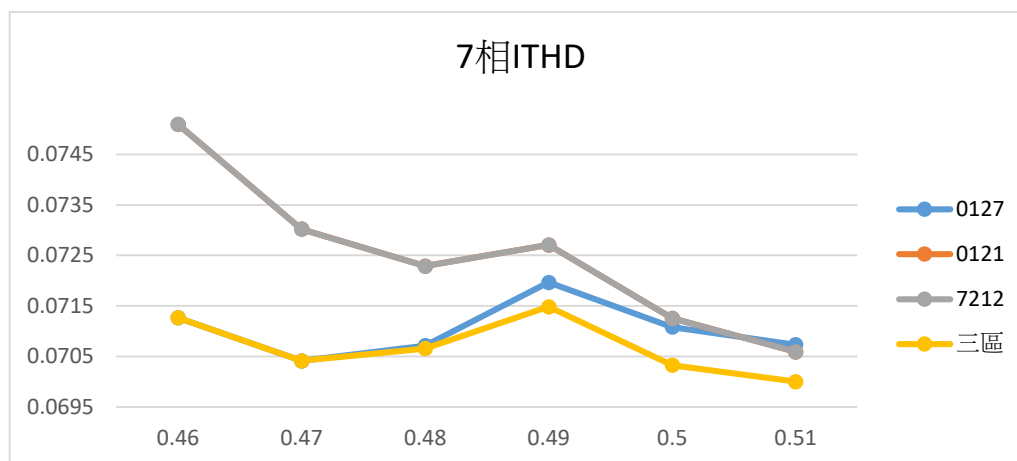
七相二階 DQ 平面 HDF 分布圖

上圖是七相二階的 3 種切換序列在不同震幅以及不同角度下 HDF 最低的分布圖，每個點代表目標向量映射到 DQ 平面的座標，而顏色表示最低的 HDF 是哪種切換序列。



運算頻率 36k 振幅 0.5 的七相二階 HDF 圖

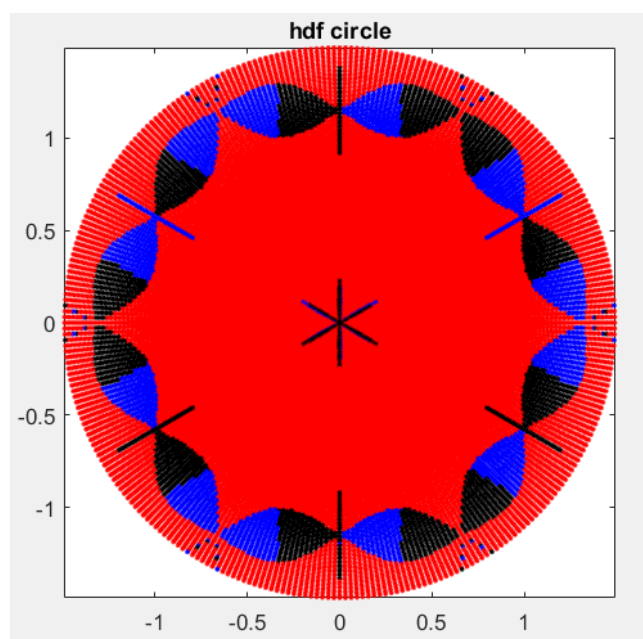
上圖是七相二階的 3 種切換序列在弦波震幅 0.5 的 HDF 值，橫軸代表目標向量所在的角度，縱軸是當下的 HDF 值。可以看到在根據目標向量所在的角度，HDF 會一直變，並大致以 51° 循環一次，按照 7212-0121-7212 的順序，且都不會選擇到 0127，而這樣的趨勢與七相二階 DQ 平面 HDF 分布圖在震幅 0.5 的圓符合。



運算頻率 36k 的七相二階 ITHD 圖

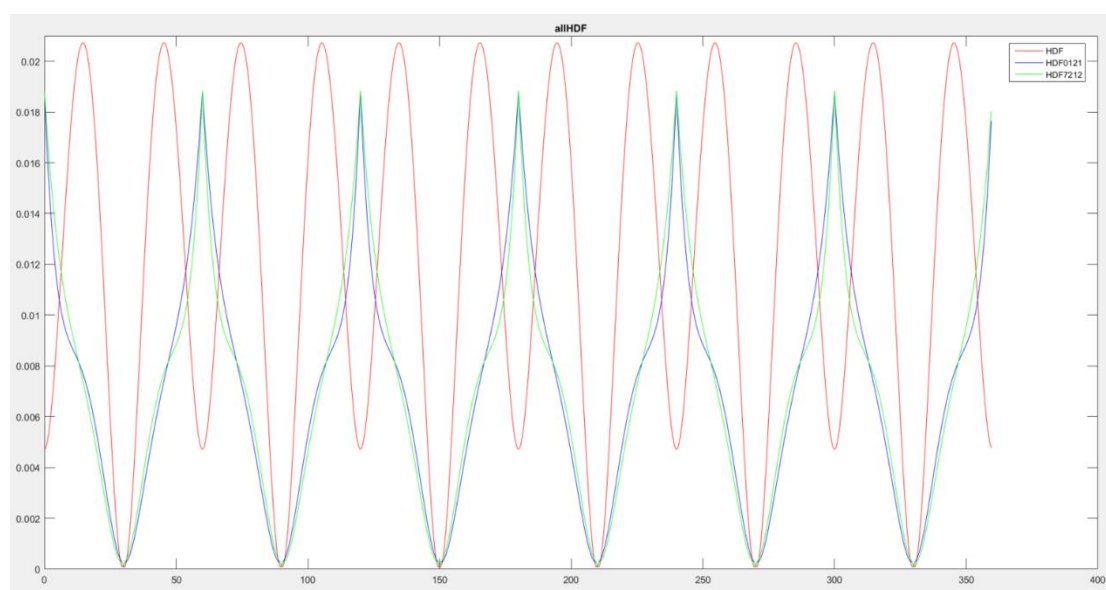
上圖是七相二階的 3 種切換序列以及混合型的電流失真率圖，可以看到混合型(三區)在不同振幅的電流失真率都會比一區(只使用單一切換序列)來的低，符合 7-3 節所講的混合型的特性以及優點。

8-4 三相三階



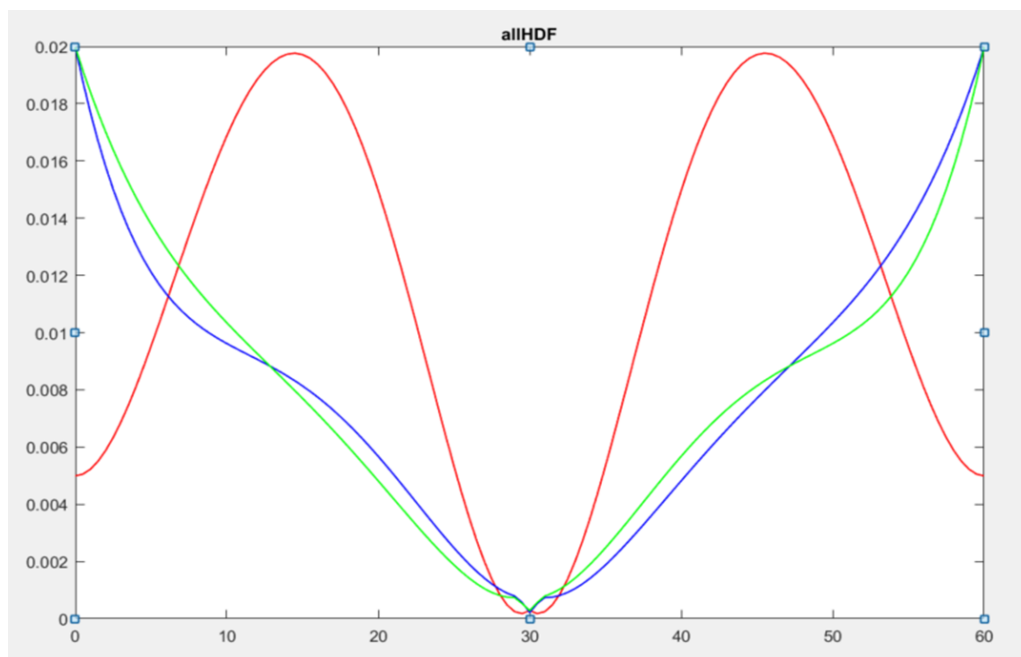
三相三階 DQ 平面 HDF 分布圖

上圖是三相三階的 3 種切換序列在不同震幅以及不同角度下 HDF 最低的分佈圖，每個點代表目標向量映射到 DQ 平面的座標，而顏色表示最低的 HDF 是哪種切換序列。



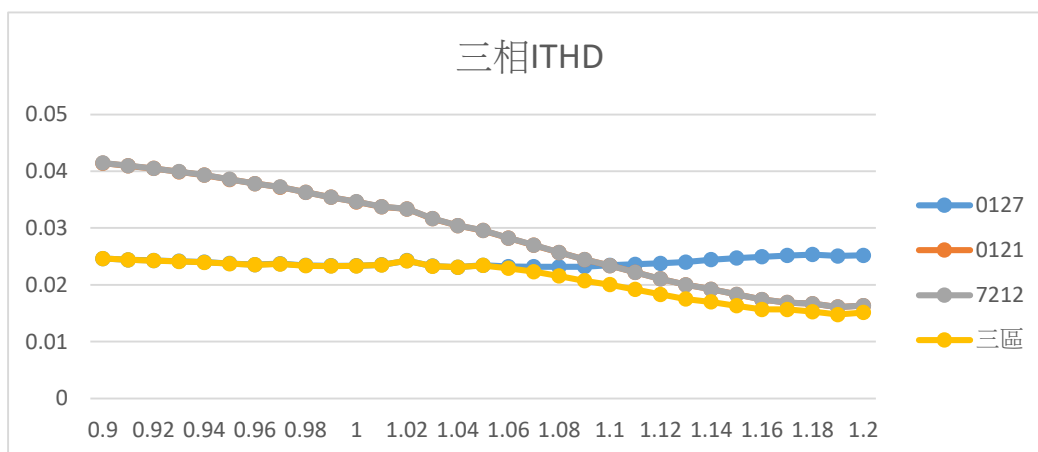
運算頻率 36k 振幅 1.14 的三相三階 HDF 圖

上圖是三相三階的 3 種切換序列在弦波振幅 1.14 的 HDF 值，橫軸代表目標向量所在的角度，縱軸是當下的 HDF 值。可以看到在根據目標向量所在的角度，HDF 會一直變，並大致以 60° 循環一次，其放大圖會在下一張圖說明。



運算頻率 36k 振幅 1.14 的三相三階 HDF 圖

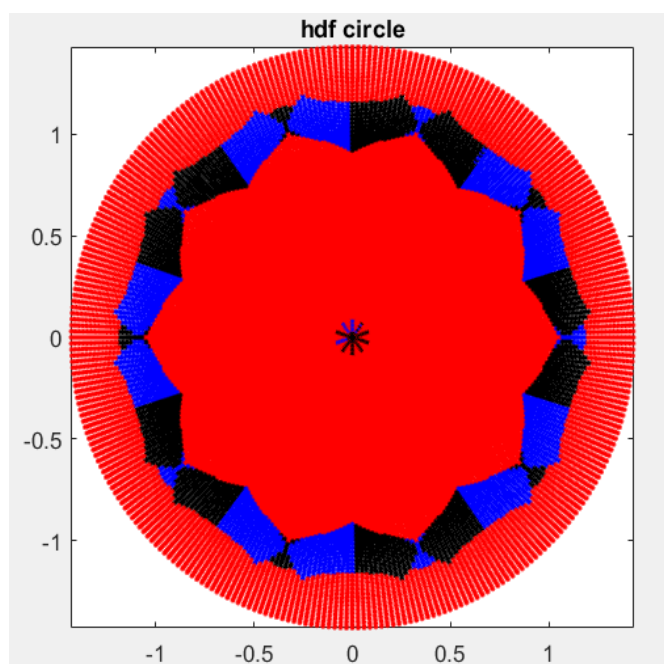
上圖是三相三階的 3 種切換序列在弦波震幅 1.14 的 HDF 值，並放大 0° 到 60° 以便觀察。最小的切換序列為 0° 到 8° 是 0127， 8° 到 13° 是 0121， 13° 到 28° 是 7212， 28° 到 32° 是 0127， 32° 到 47° 是 0121， 47° 到 52° 是 7212， 52° 到 60° 是 0127，而這樣的趨勢與三相三階 DQ 平面 HDF 分布圖在震幅 1.14 的圖符合。



運算頻率 36k 的五相二階 ITHD 圖

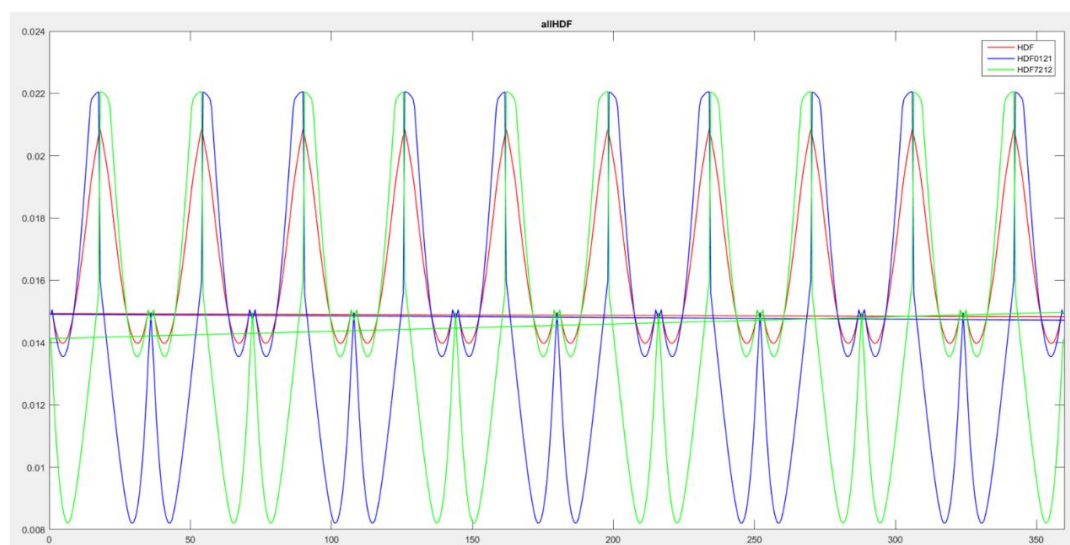
上圖是三相三階的 3 種切換序列以及混合型的電流失真率圖，可以看到混合型(三區)在不同振幅的電流失真率都會比一區(只使用單一切換序列)來的低，符合 7-3 節所講的混合型的特性以及優點。

8-5 五相三階



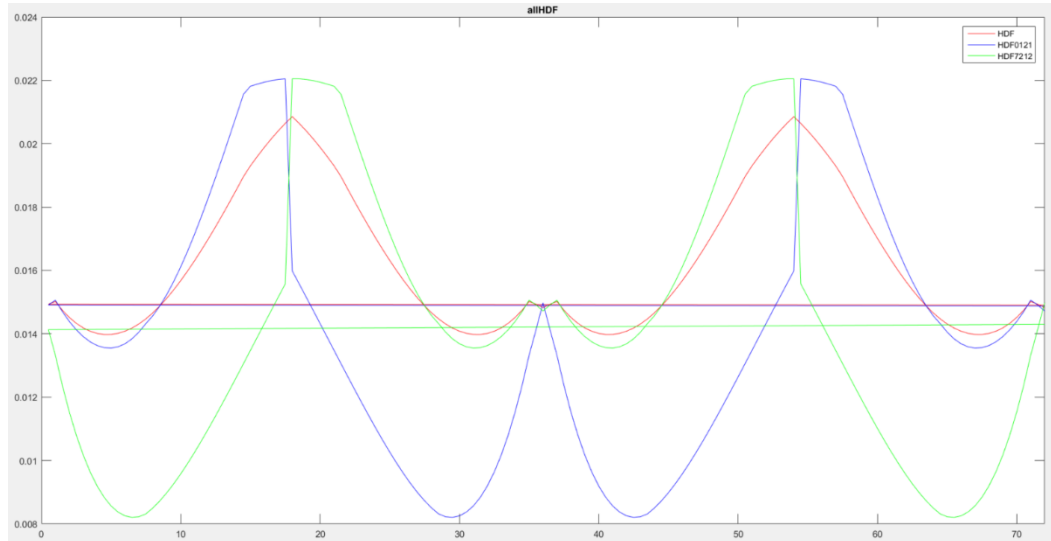
五相三階 DQ 平面 HDF 分布圖

上圖是五相三階的 3 種切換序列在不同震幅以及不同角度下 HDF 最低的分布圖，每個點代表目標向量映射到 DQ 平面的座標，而顏色表示最低的 HDF 是哪種切換序列。



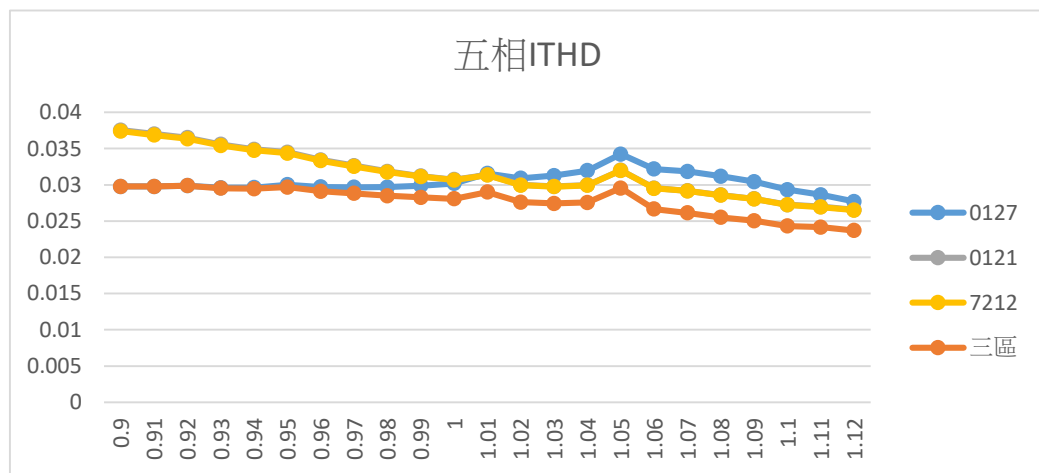
運算頻率 36k 振幅 1.1 的五相三階 HDF 圖

上圖是五相三階的 3 種切換序列在弦波振幅 1.1 的 HDF 值，橫軸代表目標向量所在的角度，縱軸是當下的 HDF 值。可以看到在根據目標向量所在的角度，HDF 會一直變，並大致以 72° 循環一次，其放大圖會在下一張圖說明。



運算頻率 36k 振幅 1.1 的三相三階 HDF 圖

上圖是三相三階的 3 種切換序列在弦波震幅 1.1 的 HDF 值，並放大 0° 到 72° 以便觀察。最小的切換序列為 0° 到 18° 是 7212， 18° 到 36° 是 0121， 36° 到 54° 是 0121， 54° 到 72° 是 7212，而這樣的趨勢與五相三階 DQ 平面 HDF 分布圖在震幅 1.1 的圖符合。



運算頻率 36k 的五相三階 ITHD 圖

上圖是五相三階的 3 種切換序列以及混合型的電流失真率圖，可以看到混合型(三區)在不同振幅的電流失真率都會比一區(只使用單一切換序列)來的低，符合 7-3 節所講的混合型的特性以及優點。

九.結論

本專題主旨在研究混合型脈波寬度調變系統，利用載波脈寬調變系統結合空間向量脈波寬度型調變系統，達到降低切換耗損及諧波失真的效果。

混合型脈波寬度調變系統與傳統的一區脈波寬調變系統的比較下，若在維持切換次數的情況下，電路損耗不變，改變不同的切換序列，利用最小誤差來調變脈寬確實能減少電流漣漪，並獲得最小失真率，進而產生高精準度的電流。在電流精準度提高後，馬達導通損耗會降低，運轉效率提高，輸出力矩會比較平順，轉起來比較順。

從模擬分析結果得知，弦波震幅較高時，特殊序列的誤差會比原始序列來的小，所以在這時選擇特殊序列作為切換序列可以有效降低電流失真率。

十.參考文獻

[1] <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E8%84%88%E8%A1%9D%E5%AF%AC%E5%BA%A6%E8%AA%BF%E8%AE%8A>

[2] <https://ieeexplore.ieee.org/document/5967903/>

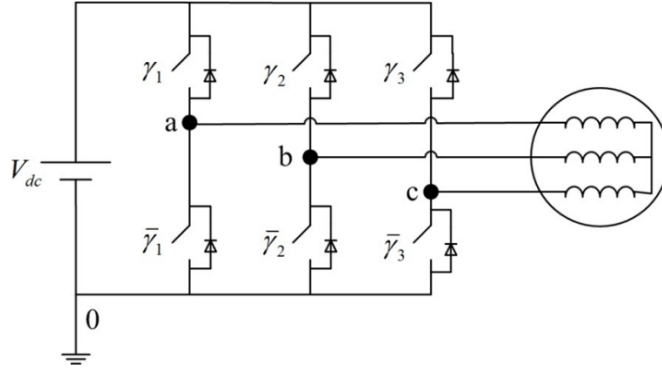
[3] <https://ieeexplore.ieee.org/document/4391042/>

十一.附錄

11-1 三相五相七相的差異及比較

11-1-1 三相二階：

電路圖：

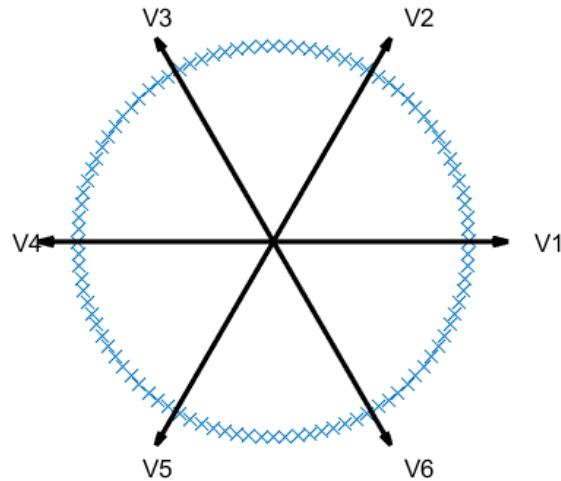


弦波：
 $\text{sinwave1} = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t);$
 $\text{sinwave2} = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 2 * \pi / 3);$
 $\text{sinwave3} = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 4 * \pi / 3);$

相電壓矩陣：
$$\begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix}$$

映射矩陣：
$$\begin{bmatrix} a & 2/3 * [\cos(0) \cos(a) \cos(2*a); \sin(0) \sin(a) \sin(2*a)]; 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

DQ 平面：

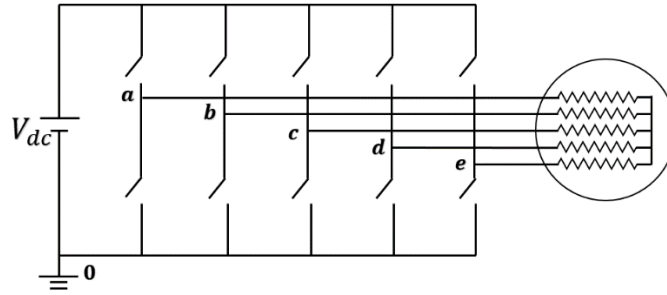


切換序列：0127、0121、7212

HDF：
 Part1： $(0)^2 + (0) * (0.5Qz) + (0.5Qz)^2$
 Part2： $(0.5Qz)^2 + (0.5Qz) * (Q1 + 0.5Qz) + (Q1 + 0.5Qz)^2$
 Part3： $(Q1 + 0.5Qz)^2 + (Q1 + 0.5Qz) * (-0.5Qz) + (-0.5Qz)^2$
 Part4： $(-0.5Qz)^2 + (-0.5Qz) * (0) + (0)^2$
 $\text{HDF0127_Q} = \text{Part1} + \text{Part2} + \text{Part3} + \text{Part4}$

11-1-2 五相二階：

電路圖：



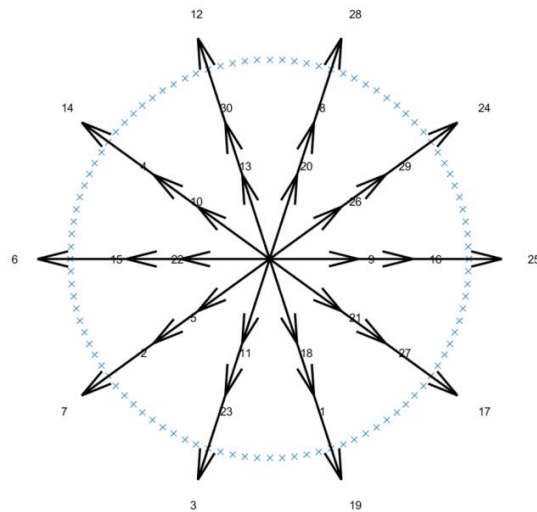
弦波：
 $s1 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t);$
 $s2 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 2 * \pi / 5);$
 $s3 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 4 * \pi / 5);$
 $s4 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 6 * \pi / 5);$
 $s5 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 8 * \pi / 5);$

相電壓矩陣： $\begin{bmatrix} 4/5 & -1/5 & -1/5 & -1/5 & -1/5 \\ -1/5 & 4/5 & -1/5 & -1/5 & -1/5 \\ -1/5 & -1/5 & 4/5 & -1/5 & -1/5 \\ -1/5 & -1/5 & -1/5 & 4/5 & -1/5 \\ -1/5 & -1/5 & -1/5 & -1/5 & 4/5 \end{bmatrix};$

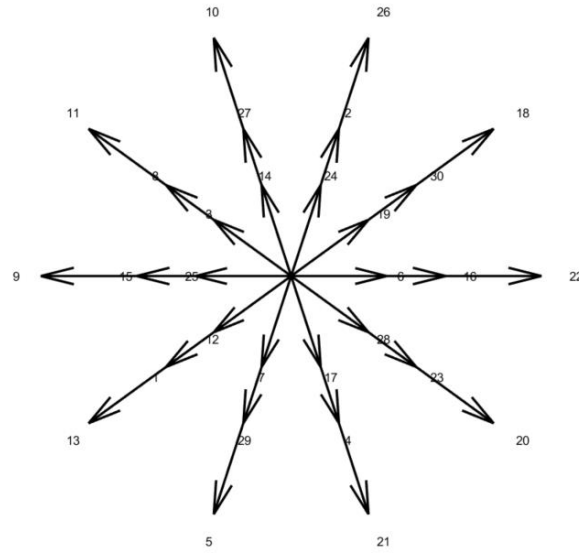
映射矩陣： $a = 2 * \pi / 5;$
 $\frac{2}{5} * \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos(a) & \cos(2*a) & \cos(3*a) & \cos(4*a) \\ \sin(0) & \sin(a) & \sin(2*a) & \sin(3*a) & \sin(4*a) \\ \cos(0) & \cos(2*a) & \cos(4*a) & \cos(6*a) & \cos(8*a) \\ \sin(0) & \sin(2*a) & \sin(4*a) & \sin(6*a) & \sin(8*a) \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};$

DQ 平面：

第一平面：



第二平面：



切换序列：012347、012343、743212

HDF：Part1： $(0)^2 + (0) \cdot (0.5Qz) + (0.5Qz)^2$

Part2： $(0.5Qz)^2 + (0.5Qz) \cdot (Q1 + 0.5Qz) + (Q1 + 0.5Qz)^2$

Part3： $(Q1 + 0.5Qz)^2 + (Q1 + 0.5Qz) \cdot (Q1 + Q2 + 0.5Qz) + (Q1 + Q2 + 0.5Qz)^2$

Part4： $(Q1 + Q2 + 0.5Qz)^2 + (Q1 + Q2 + 0.5Qz) \cdot (Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz) + (Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz)^2$

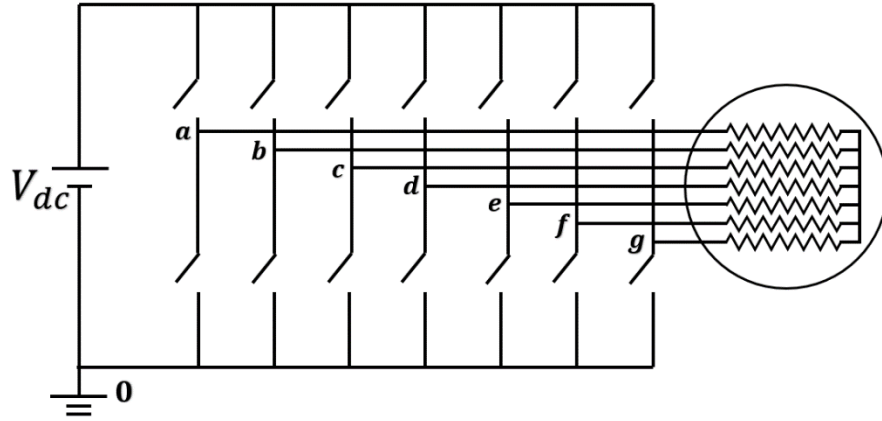
Part5： $(Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz)^2 + (Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz) \cdot (-0.5Qz) + (-0.5Qz)^2$

Part6： $(-0.5Qz)^2 + (-0.5Qz) \cdot (0) + (0)^2$

HDF012347_Q = Part1 + Part2 + Part3 + Part4 + Part5 + Part6

11-1-3 七相二階：

電路圖：



弦波： $s_1 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t)$;

$$s_2 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 2 * \pi / 7);$$

$$s_3 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 4 * \pi / 7);$$

$$s_4 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 6 * \pi / 7);$$

$$s_5 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 8 * \pi / 7);$$

$$s_6 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 10 * \pi / 7);$$

$$s_7 = \text{amp} * \cos(2 * \pi * f * t - 12 * \pi / 7);$$

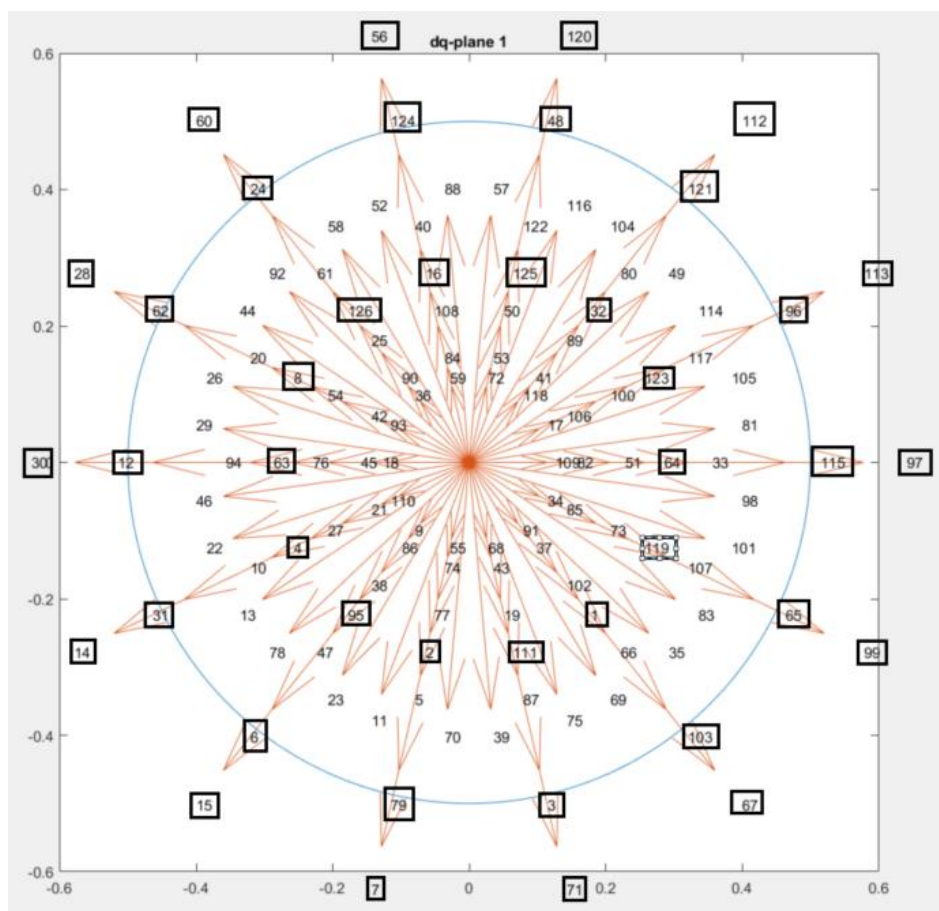
相電壓矩陣： $\begin{bmatrix} 6/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 \\ -1/7 & 6/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 \\ -1/7 & -1/7 & 6/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 \\ -1/7 & -1/7 & -1/7 & 6/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 \\ -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & 6/7 & -1/7 & -1/7 \\ -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & 6/7 & -1/7 \\ -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & -1/7 & 6/7 \end{bmatrix}$

映射矩陣： $a = 2 * \pi / 7$;

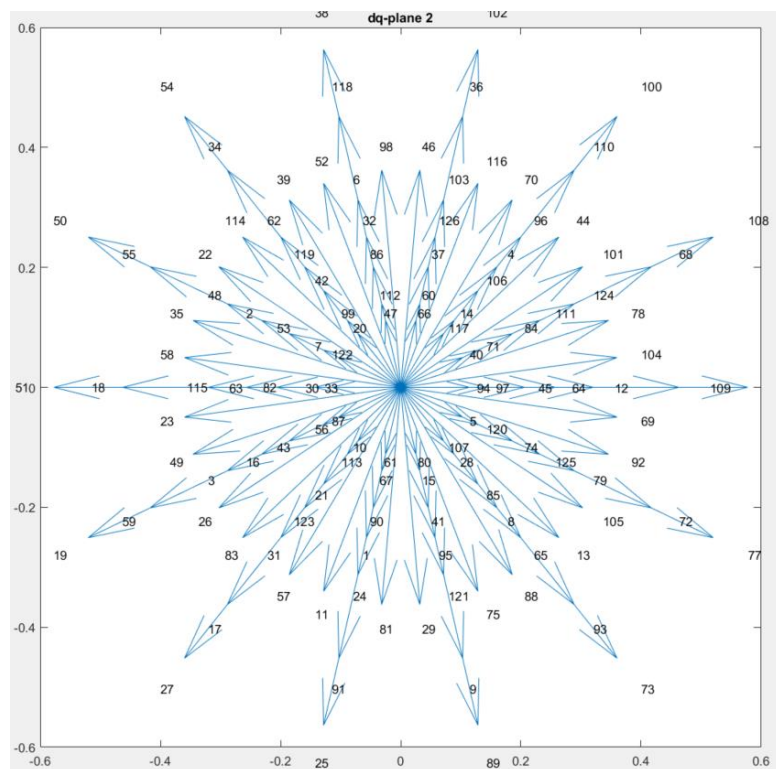
$$\begin{bmatrix} 2/7 * [\cos(0) & \cos(a) & \cos(2*a) & \cos(3*a) & \cos(4*a) & \cos(5*a) & \cos(6*a) \\ \sin(0) & \sin(a) & \sin(2*a) & \sin(3*a) & \sin(4*a) & \sin(5*a) & \sin(6*a) \\ \cos(0) & \cos(2*a) & \cos(4*a) & \cos(6*a) & \cos(8*a) & \cos(10*a) & \cos(12*a) \\ \sin(0) & \sin(2*a) & \sin(4*a) & \sin(6*a) & \sin(8*a) & \sin(10*a) & \sin(12*a) \\ \cos(0) & \cos(3*a) & \cos(6*a) & \cos(9*a) & \cos(12*a) & \cos(15*a) & \cos(18*a) \\ \sin(0) & \sin(3*a) & \sin(6*a) & \sin(9*a) & \sin(12*a) & \sin(15*a) & \sin(18*a) \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1] \end{bmatrix};$$

DQ 平面：

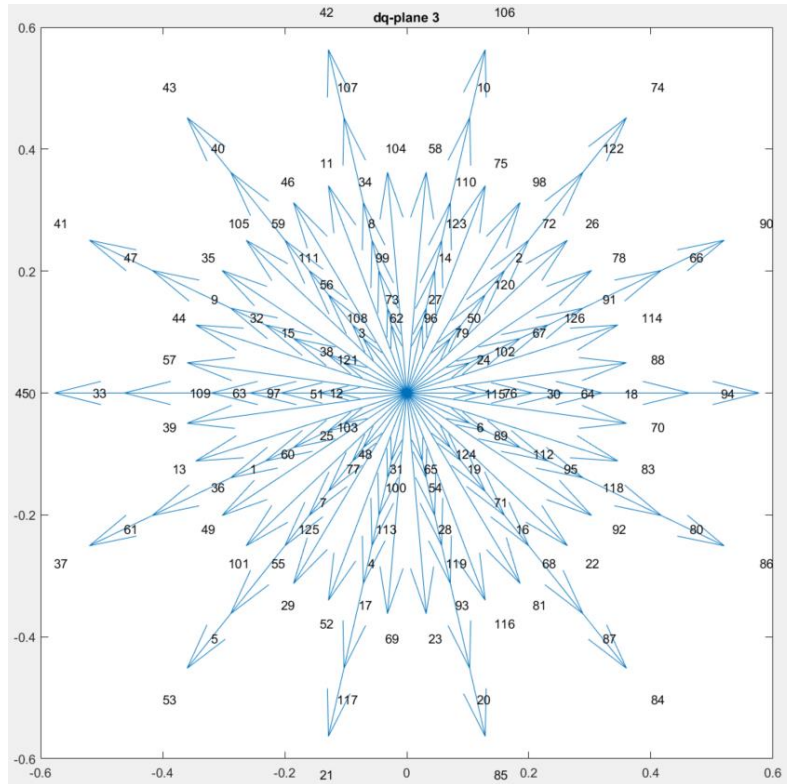
第一平面：



第二平面：



第三平面：



切换序列：01234567、01234565、76543212

HDF：Part1： $(0)^2 + (0) \cdot (0.5Qz) + (0.5Qz)^2$

Part2： $(0.5Qz)^2 + (0.5Qz) \cdot (Q1 + 0.5Qz) + (Q1 + 0.5Qz)^2$

Part3： $(Q1 + 0.5Qz)^2 + (Q1 + 0.5Qz) \cdot (Q1 + Q2 + 0.5Qz) + (Q1 + Q2 + 0.5Qz)^2$

Part4： $(Q1 + Q2 + 0.5Qz)^2 + (Q1 + Q2 + 0.5Qz) \cdot (Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz) + (Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz)^2$

Part5： $(Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz)^2 + (Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz) \cdot (-0.5Qz) + (-0.5Qz)^2$

Part6： $(Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz)^2 + (Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz) \cdot (-0.5Qz) + (-0.5Qz)^2$

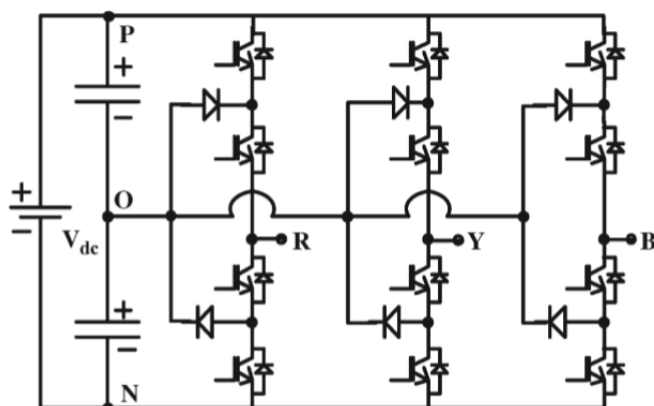
Part7： $(Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz)^2 + (Q1 + Q2 + Q3 + 0.5Qz) \cdot (-0.5Qz) + (-0.5Qz)^2$

Part8： $(-0.5Qz)^2 + (-0.5Qz) \cdot (0) + (0)^2$

HDF012347_Q = Part1 + Part2 + Part3 + Part4 + Part5 + Part6 + Part7 + Part8

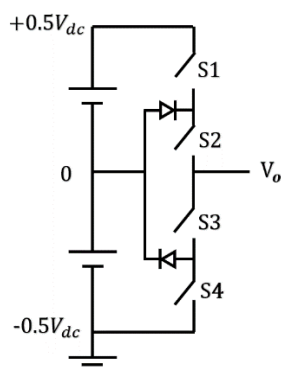
11-2 三階電路說明

電路圖：



圖四十五：三相三階電路

上圖是一個三相三階電路，是三相二階電路的延伸，其中三相三階電路是由 12 個開關所組成，是三相二階的兩倍，輸入是直流電，令為 V_{dc} ，輸出也是接三相馬達，這邊用 RL 負載表示。



S1	S2	S3	S4	V_o
1	1	0	0	$+0.5V_{dc}(+)$
0	1	1	0	$0(0)$
0	0	1	1	$-0.5V_{dc}(-)$

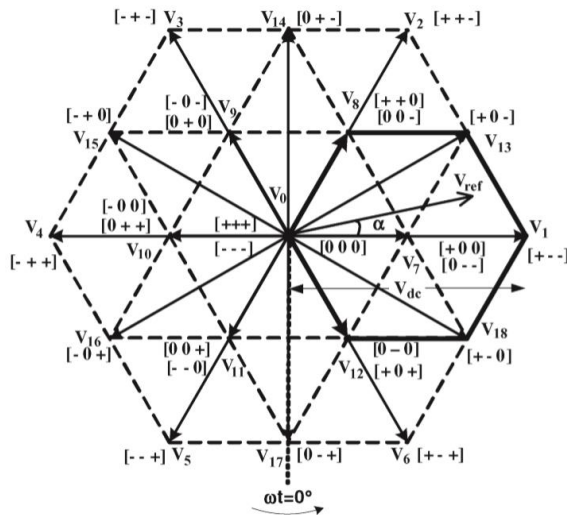
圖四十六：半橋三階電路

表三：三階開關與輸出電壓關係

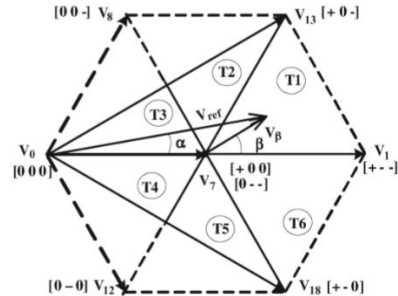
在講三相三階電路之前一樣先說運作模式，在一個半橋電路下，結合二階的觀念後，開關狀態及輸出電壓可以整理成表三。當 S1, S2 都導通，S3, S4 都斷開時，上半部會形成一個迴路，輸出電壓(V_o)為 $+0.5V_{dc}$ ，以符號+表示。當 S2, S3 導通時，中間電流會經過兩個二極體，形成一個迴路，輸出電壓 V_o 為 0，以符號 0 表示。當 S1, S2 都斷開，S3, S4 都導通時，下半部會形成一個迴路，輸出電壓(V_o)為 $-0.5V_{dc}$ ，以符號-表示。總結來說，在一行之中電路開關狀態有 3 種可能，並以+0-表示。而在三相三階電路中因為有三行，所以開關切換狀態共有 3^3 種可能。

再來是輸出的部分，這部分也是跟二階一樣，把輸出電壓接上負載，並整理出相電壓矩陣，而整理出來的結果也會跟二階一樣是

$$V_{dc} \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix}。$$



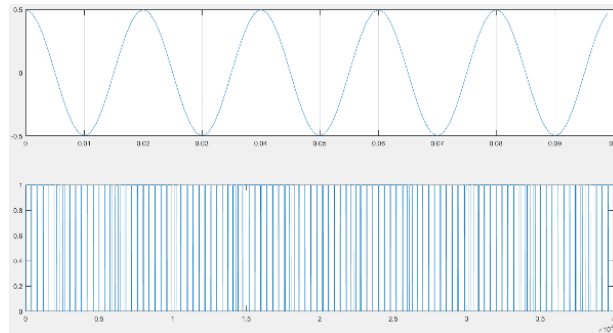
圖四十七：三階 DQ 平面上基本向量



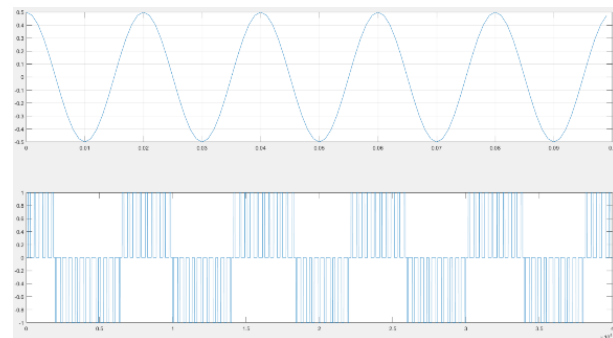
圖四十八：三階第一區基本向量

再來是映射到 DQ 平面上的基本向量，可以發現從二階的 6 根基本向量變成到三階的 24 根基本向量，複雜了許多，但大方向還是不變的，一樣還是藉由相鄰的基本向量來合成出目標向量，如圖四十八。

而三階與二階最大的差異就在於可以組合出弦波的成分有多少，也就是腳電壓的可能性有多少。舉例來說，二階的腳電壓只有 0 或 1 的可能，指能夠利用脈波寬度來判別類比訊號的數值，如圖四十九，但三階的腳電壓就有 +0-三種可能，可以用+和 0 來表示弦波處於上半週，0 和-表示弦波處於下半週，再加上脈波寬度來判別類比訊號的值，如圖五十，更能清楚的表示類比訊號的樣貌。所以才可以讓三階的輸出電流失真率、品質、切換耗損、震幅幅度，等等，各方面都比二階來的好。



圖四十九：二階弦波與腳電壓

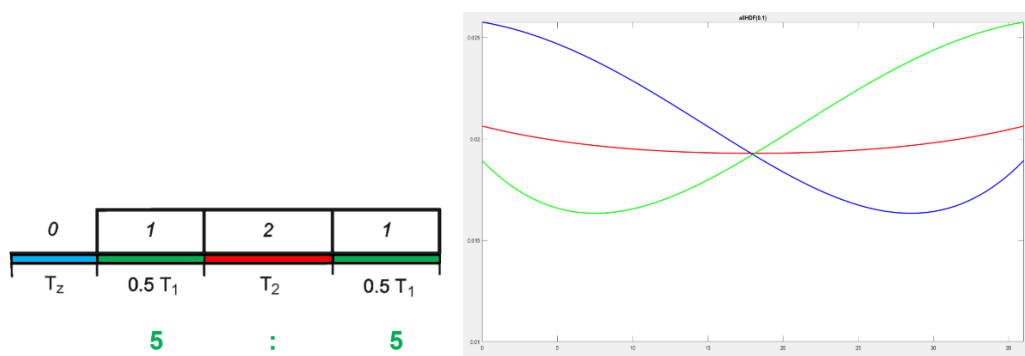


圖五十：三階弦波與腳電壓

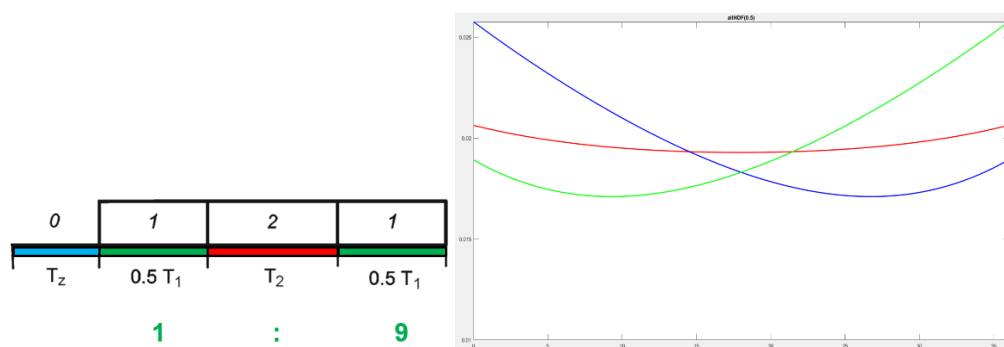
11-3 新三區與新五區

在優化切換序列 0127 後，有了新的切換序列 0121 與 7212 兩種，於是就可以選擇最低的 HDF 來使用特殊序列。但在研究特殊序列後，發現有方法來更進一步的降低 HDF 進而降低失真率，於是就有了新三區與新五區。

原本的特殊序列 0121 的比例是 0.5:0.5，如圖五十一，當改變比例變成 0.1:0.9 後，如圖五十四，發現在 5° 到 10° 有比 0.5:0.5 更低的 HDF 值，這正是我們想要的，所以就有了新的研究可以做，讓比例從 0.1:0.9 到 0.9:0.1，看哪種比例的 HDF 曲線跟 0127 的 HDF 曲線面積差最多，就表示它在大部分情況擁有最低的 HDF 值，就使用那種比例，而新使用的比例就稱為新三區。



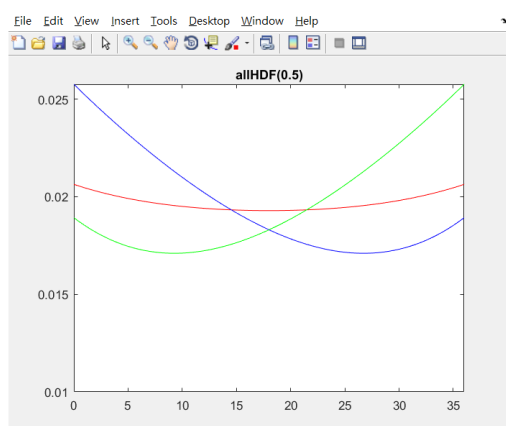
圖五十一：舊三區切換序列比例 圖五十二：舊三區 HDF(0° 到 60°)



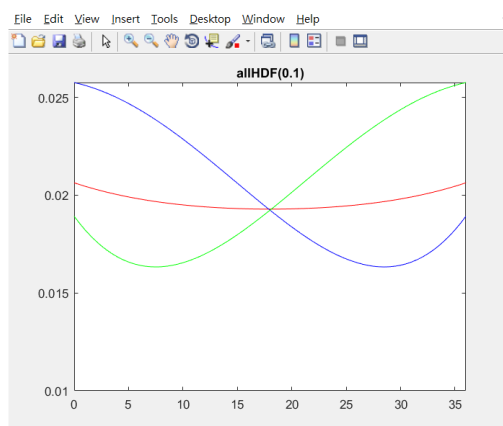
圖五十三：新三區切換序列比例 圖五十四：新三區 HDF(0° 到 60°)

但這樣還不夠，我們已經到了為了減少 HDF 而喪心病狂的地步，所以我們固定新三區的曲線，繼續讓比例從 0.1:0.9 到 0.9:0.1，看哪種比例의 HDF 曲線跟新三區의 HDF 曲線面積差最多，就表示它在大部分情況擁有比新三區更低의 HDF 值，就使用那種比例，而更新的比例就稱為新五區。

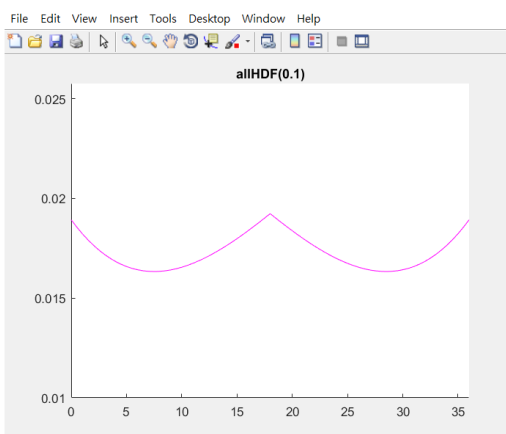
舉例來說，圖五十二是比例 0.5:0.5 的 HDF，也就是舊三區，而圖五十四是比例 0.1:0.9 的 HDF，發現在 0.1:0.9 時特殊序列跟 0127 上下夾的面積比 0.5:0.5 時更多，也就是說在比例 0.1:0.9 時可以有更低의 HDF，於是把 0.1:0.9 另為新三區。但這還不夠，我們固定新三區의 HDF，重複更改比例，發現在 0.4:0.6 時，特殊序列跟新三區上下夾的面積比新三區時更多，於是把 0.4:0.6 另為新五區。



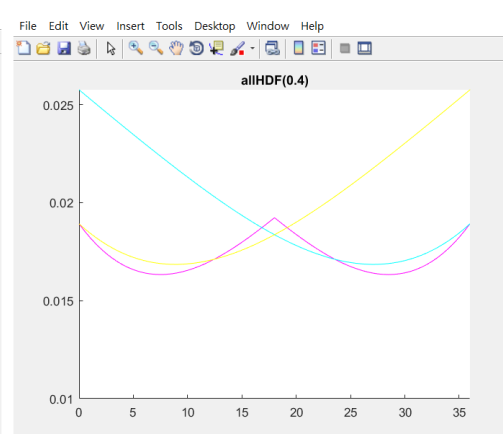
圖五十二：舊三區 HDF
0127, 0121(5:5), 7212(5:5)



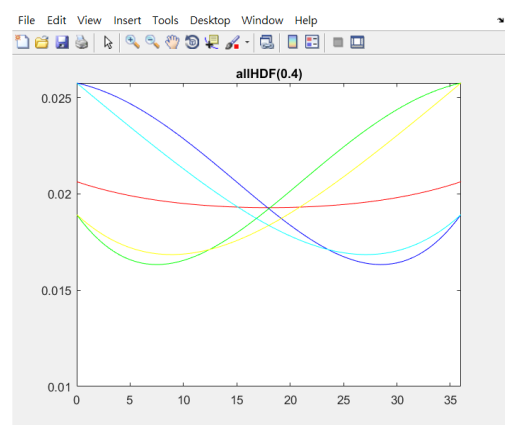
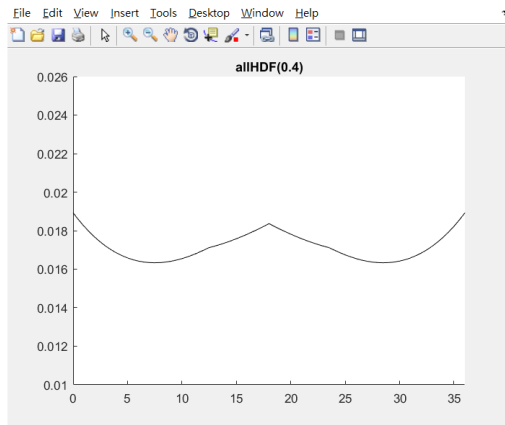
圖五十四：新三區 HDF
0127, 0121(1:9), 7212(1:9)



圖五十五：新三區所使用的 HDF



圖五十六：新五區 HDF
0127, 0121(4:6), 7212(4:6)



圖五十七：新五區所使用的 HDF

圖五十八：新五區所有的 HDF

也就是說新五區是看 5 條 HDF，當下誰擁有最低的 HDF，便使用它的
 切換序列。

11-4 新三區與新五區模擬結果

三相二階：

面積	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.44	0	0	0	0.266205	0.670088	0.517149	0	0	0
0.45	0	0	0.55478	1.502487	2.248336	2.111005	1.01442	0	0
0.46	0	0.190611	2.008399	3.271544	4.29134	4.180736	2.842913	0.502124	0
0.47	0	1.520378	3.913917	5.426838	6.685251	6.590661	5.049443	2.173068	0
0.48	0	3.308522	6.144522	7.888823	9.350816	9.259654	7.52324	4.209101	0.028448
0.49	0.897608	5.385316	8.623464	10.58984	12.23053	12.12495	10.19309	6.469303	1.280847
0.5	2.454429	7.655506	11.2874	13.47838	15.27202	15.13628	12.99878	8.876319	2.981853
0.51	4.201828	10.05241	14.08179	16.50749	18.42474	18.23848	15.88116	11.36257	4.822336
0.52	6.028947	12.51291	16.95357	19.62725	21.64362	21.38441	18.7899	13.86437	6.704641
0.53	7.85938	14.97828	19.8556	22.78826	24.87996	24.52352	21.67319	16.32797	8.556225
0.54	9.621093	17.3936	22.73319	25.94148	28.08199	27.60236	24.47627	18.6978	10.30946
0.55	11.25332	19.70382	25.53901	29.04012	31.19652	30.58092	27.15431	20.91558	11.90259
0.56	12.69134	21.85119	28.2146	32.03265	34.18271	33.39145	29.64209	22.9308	13.27425
0.57	13.8731	23.78231	30.70572	34.85976	36.97471	35.9927	31.8958	24.67815	14.36081
sum	68.88105	138.3349	190.616	223.2211	246.1326	241.6343	209.1346	151.0072	74.22145

三相二階新三區面積表格整理

ITHDavg	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.44	0.058851	0.058851	0.058851	0.058615	0.058281	0.058383	0.058851	0.058851	0.058851
0.45	0.058205	0.058205	0.057786	0.057079	0.056502	0.05658	0.057367	0.058205	0.058205
0.46	0.057458	0.057247	0.055921	0.055014	0.054218	0.054251	0.055191	0.056896	0.057458
0.47	0.056577	0.055459	0.05374	0.052621	0.051612	0.051646	0.05276	0.054834	0.056577
0.48	0.05609	0.053798	0.05171	0.050441	0.049275	0.049273	0.050524	0.052925	0.056025
0.49	0.054987	0.051861	0.049466	0.048018	0.046691	0.046733	0.048116	0.050812	0.054323
0.5	0.053935	0.050364	0.047714	0.046015	0.04459	0.044654	0.046229	0.04922	0.053212
0.51	0.052666	0.048693	0.045769	0.043825	0.042292	0.042396	0.044131	0.047433	0.0518
0.52	0.050835	0.04637	0.043087	0.040871	0.039178	0.039369	0.041384	0.045036	0.049862
0.53	0.049549	0.044713	0.041103	0.038738	0.036958	0.037203	0.039417	0.043378	0.048522
0.54	0.049952	0.044808	0.041026	0.038468	0.036728	0.037083	0.039485	0.04355	0.048839
0.55	0.04739	0.041795	0.037427	0.034458	0.032554	0.033033	0.035732	0.040409	0.046315
0.56	0.046857	0.040919	0.036183	0.032922	0.030981	0.031665	0.03468	0.039656	0.045817
0.57	0.046505	0.040266	0.035215	0.031655	0.029723	0.030534	0.033832	0.039048	0.045496
sum	0.739856	0.693349	0.655	0.628741	0.609582	0.612802	0.637699	0.680252	0.731303

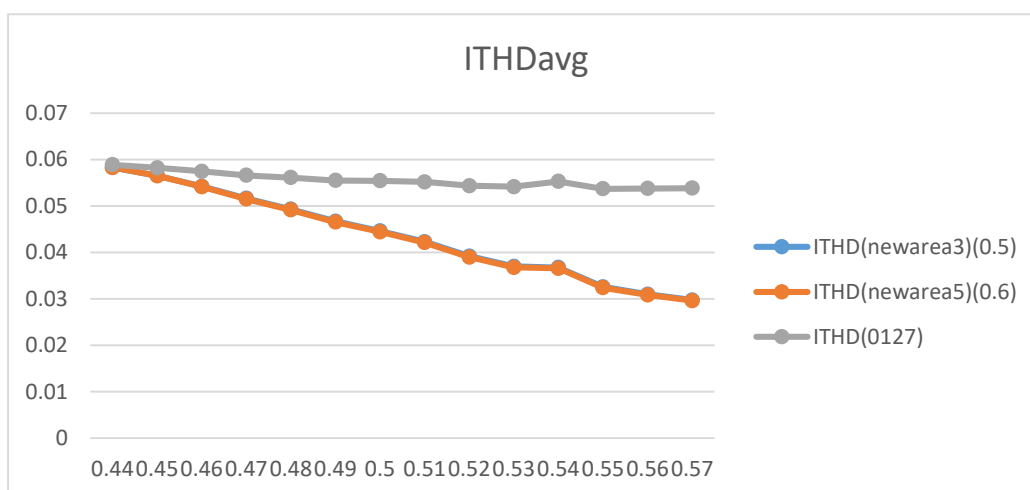
三相二階新三區 ITHD 表格整理

面積	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.44	0	0	0	0	0	0.001512	0	0	0
0.45	0	0	0	0	0	0.039301	0	0	0
0.46	0	0	0	0	0	0.09183	0	0	0
0.47	0	0	0	0	0	0.138002	0.00096	0	0
0.48	0	0	0	0	0	0.176928	0.012285	0	0
0.49	0	0	0	0	0	0.204687	0.030796	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0.224338	0.050092	0	0
0.51	0	0	0	0	0	0.233352	0.066103	0	0
0.52	0	0	0	0	0	0.231578	0.074892	0	0
0.53	0	0	0	0	0	0.219326	0.078148	0	0
0.54	0	0	0	0	0	0.197857	0.074848	0	0
0.55	0	0	0	0	0	0.182802	0.076638	0.003418	0
0.56	0	0	0	0	0	0.150063	0.063405	0.003136	0
0.57	0	0	0	0	0	0.127209	0.059048	0.003247	0
sum	0	0	0	0	0	2.218784	0.587215	0.009801	0

三相二階新五區面積表格整理

ITHDavg	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.44	0.058281	0.058281	0.058281	0.058281	0.058281	0.058277	0.058281	0.058281	0.058281
0.45	0.056502	0.056502	0.056502	0.056502	0.056502	0.056466	0.056502	0.056502	0.056502
0.46	0.054218	0.054218	0.054218	0.054218	0.054218	0.054138	0.054218	0.054218	0.054218
0.47	0.051612	0.051612	0.051612	0.051612	0.051612	0.051495	0.051612	0.051612	0.051612
0.48	0.049275	0.049275	0.049275	0.049275	0.049275	0.049126	0.049261	0.049275	0.049275
0.49	0.046691	0.046691	0.046691	0.046691	0.046691	0.046519	0.046664	0.046691	0.046691
0.5	0.04459	0.04459	0.04459	0.04459	0.04459	0.0444	0.044538	0.04459	0.04459
0.51	0.042292	0.042292	0.042292	0.042292	0.042292	0.042095	0.042234	0.042292	0.042292
0.52	0.039178	0.039178	0.039178	0.039178	0.039178	0.038978	0.039109	0.039178	0.039178
0.53	0.036958	0.036958	0.036958	0.036958	0.036958	0.036756	0.036876	0.036958	0.036958
0.54	0.036728	0.036728	0.036728	0.036728	0.036728	0.036551	0.036657	0.036728	0.036728
0.55	0.032554	0.032554	0.032554	0.032554	0.032554	0.032376	0.032476	0.032548	0.032554
0.56	0.030981	0.030981	0.030981	0.030981	0.030981	0.030837	0.030916	0.030975	0.030981
0.57	0.029723	0.029723	0.029723	0.029723	0.029723	0.029602	0.029667	0.029719	0.029723
sum	0.609582	0.609582	0.609582	0.609582	0.609582	0.607616	0.609009	0.609566	0.609582

三相二階新五區 ITHD 表格整理



運算頻率 36k 的三相二階 ITHD 圖

五相二階：

面積	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.45	0.664527	0.517925	0.345203	0.158849	0.008811	0	0	0	0
0.46	2.160504	2.011312	1.798507	1.518382	1.174644	0.787919	0.414804	0.155997	0.06046
0.47	3.862096	3.747406	3.548669	3.247062	2.832692	2.310054	1.70777	1.106263	0.64085
0.48	5.584613	5.52493	5.356772	5.057059	4.601592	3.984574	3.21333	2.344988	1.520158
0.49	7.214056	7.215133	7.077351	6.758466	6.253759	5.563229	4.686877	3.624702	2.463488
0.5	8.635955	8.649444	8.468409	8.09285	7.522769	6.758164	5.799037	4.645386	3.297211
0.51	9.685448	9.654587	9.420385	8.982842	8.341957	7.497731	6.450163	5.199253	3.745002
0.52	10.24596	10.16537	9.872505	9.367378	8.649986	7.720328	6.578405	5.224216	3.657762
sum	48.05316	47.4861	45.8878	43.18289	39.38621	34.622	28.85039	22.30081	15.38493

五相二階新三區面積表格整理

ITHDavg	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.44	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567
0.45	0.071276	0.071364	0.071456	0.071584	0.071696	0.071707	0.071707	0.071707	0.071707
0.46	0.069646	0.069734	0.069848	0.07002	0.070242	0.070447	0.070676	0.070857	0.070919
0.47	0.068535	0.06859	0.068671	0.068846	0.069107	0.069374	0.069736	0.070079	0.070343
0.48	0.068325	0.068351	0.068423	0.068601	0.068868	0.069165	0.069586	0.070035	0.070457
0.49	0.0669	0.066892	0.066758	0.066953	0.067248	0.067581	0.068042	0.068658	0.069389
0.5	0.070063	0.070051	0.070113	0.070311	0.070613	0.070957	0.071418	0.071977	0.072579
0.51	0.066585	0.066594	0.066702	0.066896	0.067258	0.067662	0.068191	0.06887	0.06954
0.52	0.068854	0.068882	0.069006	0.069235	0.069606	0.069999	0.070488	0.071106	0.071814
sum	0.62175	0.622026	0.622543	0.624013	0.626205	0.628459	0.63141	0.634856	0.638316

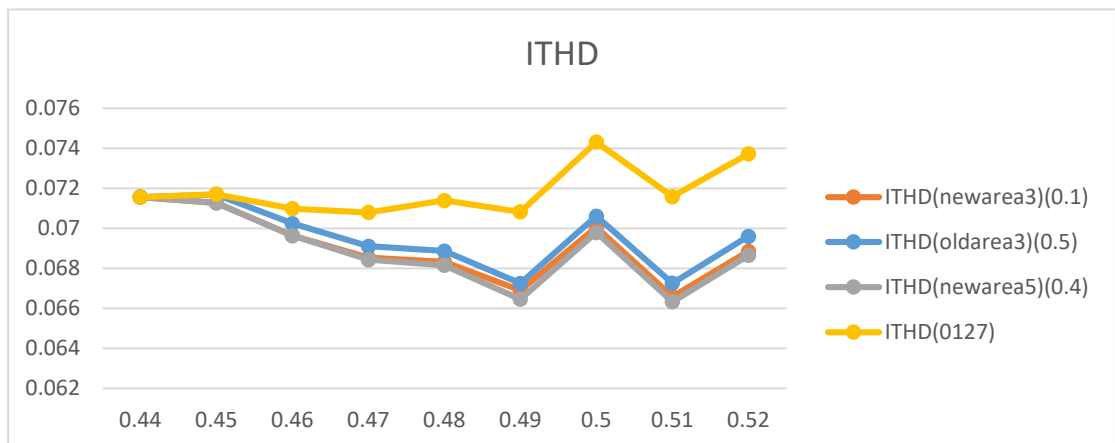
五相二階新三區 ITHD 表格整理

面積	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.45	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.46	0	0.024048	0.025591	0.012129	3.47E-18	0	0	0	0
0.47	0	0.079727	0.121543	0.118203	0.076949	0.021236	0	0	0
0.48	0	0.15796	0.259252	0.294506	0.256428	0.161602	0.04724	0	0
0.49	0	0.244761	0.408549	0.464313	0.426109	0.32033	0.176762	0.038772	0
0.5	0	0.285698	0.442137	0.485196	0.437843	0.326283	0.185331	0.059266	0.000651
0.51	0	0.273433	0.415643	0.446736	0.389015	0.273563	0.138548	0.029438	0
0.52	0	0.258741	0.386877	0.40404	0.336903	0.219964	0.094782	0.009054	0
sum	0	1.324369	2.059593	2.225122	1.923247	1.322976	0.642663	0.136531	0.000651

五相二階新五區面積表格整理

ITHDavg	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.44	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567	0.071567
0.45	0.071276	0.071276	0.071276	0.071276	0.071276	0.071276	0.071276	0.071276	0.071276
0.46	0.069646	0.06963	0.069632	0.069637	0.069646	0.069646	0.069646	0.069646	0.069646
0.47	0.068535	0.068476	0.068441	0.068434	0.068458	0.068498	0.068535	0.068535	0.068535
0.48	0.068325	0.068232	0.068176	0.068153	0.068174	0.068228	0.068298	0.068325	0.068325
0.49	0.0669	0.066758	0.066479	0.066457	0.066487	0.066544	0.066627	0.066763	0.0669
0.5	0.070063	0.069911	0.069826	0.069799	0.069833	0.069884	0.069957	0.070027	0.070043
0.51	0.066585	0.066439	0.066365	0.066331	0.066374	0.066423	0.066556	0.066646	0.066585
0.52	0.068854	0.068726	0.068664	0.068654	0.068686	0.068739	0.068776	0.06882	0.068854
sum	0.62175	0.621015	0.620427	0.620307	0.6205	0.620804	0.621237	0.621603	0.62173

五相二階新五區 ITHD 表格整理



運算頻率 36k 的五相二階 ITHD 圖

七相二階：

面積	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.47	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.48	0.337325	0.300121	0.257708	0.211446	0.1639398	0.11933	0.082531	0.056619	0.040427
0.49	0.99523	0.960986	0.913493	0.851195	0.7734274	0.681079	0.577666	0.470518	0.37089
0.5	1.482242	1.464013	1.428336	1.369175	1.2841152	1.173156	1.036296	0.873556	0.694159
0.51	1.582864	1.56657	1.523382	1.453301	1.3563257	1.232457	1.081696	0.90404	0.699492
sum	4.397661	4.291689	4.122918	3.885116	3.5778081	3.206022	2.778189	2.304734	1.804968

七相二階新三區面積表格整理

ITHDavg	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.46	0.070836	0.070836	0.070836	0.070836	0.0708363	0.070836	0.070836	0.070836	0.070836
0.47	0.07089	0.07089	0.07089	0.07089	0.0708899	0.07089	0.07089	0.07089	0.07089
0.48	0.070648	0.070668	0.070686	0.070711	0.0707422	0.070763	0.070782	0.070801	0.070808
0.49	0.070317	0.070335	0.070359	0.070392	0.0704376	0.070474	0.070526	0.070583	0.070637
0.5	0.070021	0.070028	0.070017	0.070046	0.0700939	0.07014	0.070203	0.070311	0.070395
0.51	0.069884	0.069889	0.069906	0.069939	0.0699915	0.070068	0.070135	0.070222	0.070312
sum	0.422596	0.422647	0.422694	0.422814	0.4229914	0.423171	0.423372	0.423642	0.423878

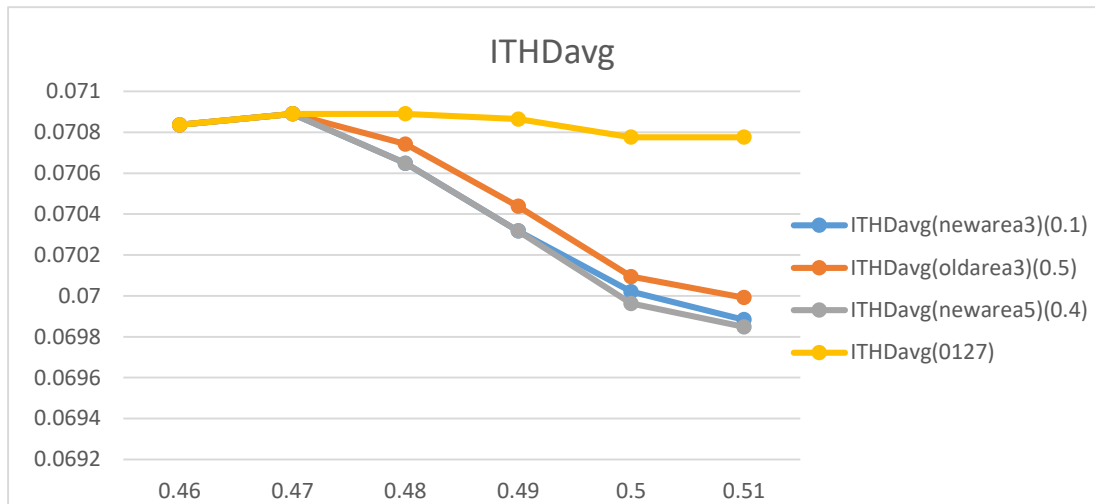
七相二階新三區 ITHD 表格整理

面積	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.47	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.48	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.49	0	0.008467	0.011849	0.010326	0.005365	0.000522	0	3.47E-18	3.47E-18
0.5	0	0.030186	0.052097	0.061605	0.058657	0.046174	0.027755	0.007894	0
0.51	0	0.038509	0.060408	0.067812	0.063297	0.050057	0.032003	0.013938	0.001752
sum	0	0.077162	0.124355	0.139743	0.127319	0.096753	0.059758	0.021832	0.001752

七相二階新五區面積表格整理

ITHDavg	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.46	0.070836	0.070836	0.070836	0.070836	0.070836	0.070836	0.070836	0.070836	0.070836
0.47	0.07089	0.07089	0.07089	0.07089	0.07089	0.07089	0.07089	0.07089	0.07089
0.48	0.070648	0.070648	0.070648	0.070648	0.070648	0.070648	0.070648	0.070648	0.070648
0.49	0.070317	0.070314	0.070315	0.070317	0.070319	0.070319	0.070317	0.070317	0.070317
0.5	0.070021	0.070004	0.069968	0.069963	0.069964	0.06997	0.06998	0.070016	0.070021
0.51	0.069884	0.069864	0.069852	0.069848	0.069851	0.069883	0.069892	0.069901	0.069908
sum	0.422596	0.422556	0.42251	0.422502	0.422508	0.422546	0.422564	0.422609	0.42262

七相二階新五區 ITHD 表格整理



運算頻率 36k 的七相二階 ITHD 圖