

# 五相逆變器之最佳零序注入調變法則

## Five-Phase Modulator with Optimal Zero-Sequence Injection

陳鏗元<sup>1\*</sup>、彭文陽<sup>2</sup>、魏志綸<sup>3</sup>、陳龍德<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 元智大學電機系 副教授

<sup>2</sup> 工研院機械所 控制核心技術組 組長

<sup>3</sup> 元智大學電機系

<sup>4</sup> 工研院機械所 控制核心技術組 工程師

**摘要：**五相逆變器可應用於工業中五相馬達變速驅動，空間向量脈寬調變及不連續脈寬調變為兩種常見之逆變器調變方法，對於三相逆變器，大家已經熟知不連續調變較適合大調變參數時之驅動，而小調變參數時則為空間向量調變較好，然而對於五相逆變器，並沒有一個可依循的方法提供此兩調變器之抉擇，因此本文針對不同的調變參數及參考訊號之相位角，發展一調變器抉擇方法，首先推導調變器失真參數數學模型，此參數正比於電流失真度，接下來於每一載波週期內，計算兩調變器之失真參數有效值，並採用較低失真參數之調變器，得到一低電流失真之調變法。

**Abstract :** Five-phase voltage source inverter drives have recently been applied to various industrial applications for variable speed motor drives. Both space-vector PWM (SVPWM) and discontinuous PWM (DPWM) are commonly used modulators. Under the three-phase setting, it is well known that SVPWM is preferred for small modulation indices whereas DPWM is better for large modulation indices. However little detailed discussions on five-phase setting are reported. This paper developed a method to select either SVPWM or DPWM under different reference amplitudes and angles. Firstly, a generalized expression of PWM harmonic flux which is proportional to current distortion is derived. Secondly, by selecting the modulator that corresponds to minimum rms harmonic flux for every carrier period, optimal injection pulse-width modulation (OIPWM) is constructed.

**關鍵詞：**脈波寬度調變、零序列注入、五相逆變器

**Keywords :** Pulse-width modulation, Zero-sequence injection, Five-phase inverter

### 前言

多相電壓源反向器可應用於工業中多相變速馬達之驅動，且相較於三相馬達，多相馬達之力矩漣波較低、運轉效率較高、反向器電路元件之

功率需求較低，並且具有容錯運轉之特性，因此，多相電壓源反向器相當適合應用於電動車驅動、風力發電、抑或船與火車之動力牽引系統中 [1-5]。多相反向器之驅動調變法則，最常見的有空間向量脈寬調變以及不連續脈寬調變，主要原因為這

兩種調變方法相當適合實現於數位控制器中，且目前一般之微處理器也具備與此兩調變器相容之脈波寬度產生功能。此兩調變器於三相系統、五相系統以及多相系統之關聯性討論也分別於文獻 [6-8]、文獻 [9-10] 以及文獻 [11-12] 中完整呈現，由分析結果可以知道，此兩調變器皆可以採用三角波比較法產生脈波訊號，而唯一不同處在於零相量注入之大小互異。而文獻 [6] 與 [13] 更分析了三相系統中，此兩調變器的電流失真，分析結果可以知道於相同切換次數運作下，空間向量調變器於小訊號時候有較小的電流失真，反之，不連續調變器則於大訊號時候有較低的電流失真，因此，文獻 [6] 與 [13] 針對三相系統提出一混合型之脈寬調變器，同時享有此兩調變器之優點。然而，到目前為止，尚無一個明確的方法知道五相系統運作時候，該如何抉擇此兩調變器，以得到最低的電流失真度。

因此，本文主要探討五相系統中，此兩調變器的諧波失真參數，此失真參數首先計算瞬時電壓誤差，再將此電壓誤差積分得到一曲線，最後計算此曲線於一週期內之有效值，此有效值則稱作諧波失真參數，由於對於電感性之負載，電流失真正比於電壓失真之積分，因此，此諧波失真參數將正比於電流失真度。

在三相系統中，此失真參數也被拿來運用於多階層反向器之驅動，使反向器在共模電壓為零的切換模式下，仍然能確保較低的電流失真度 [17-18]，而於文獻 [19] 中，此失真參數被用來降低驅動三相馬達時候的力矩漣波，然而，這幾項應用皆為三相系統，且諧波失真參數之計算皆必須在  $d-q$  平面上運算，因此牽扯到數個  $2 \times 3$  之矩陣乘法，數學運算量較大，也無法直接擴充應用於五相系統。

本文則直皆採用弦波訊號以及切換訊號，即可計算諧波失真參數，免除了多個矩陣乘法，且也相當容易擴充至多相系統之諧波失真參數的分析，由分析結果可以知道，諧波失真參數除了與五相弦波之振幅有關，也與相位角有關，因此參

考此失真參數，於每一個載波週期內，採用失真參數較小的那一種調變器，則可以讓電流失真度最低，且由於空間向量脈寬調變器與不連續調變器之差異只有零相量注入值不同，因此，即時運作上可以順暢地切換於此兩調變器之中，並不會造成銜接上的問題，在此將本文所提出的調變器稱為零注入變換調變器。

### 空間向量脈寬調變與不連續脈寬調變

此部份簡短介紹電壓源反向器之電路與切換運作，並說明空間向量脈寬調變與不連續脈寬調變之運作。

#### 1. 五相電壓源反向器電路

圖 1(a) 為五相電壓源反向器之電路示意圖，其中  $V_{an}, V_{bn}, \dots$  為反向器之輸出相電壓，可以看到此電路主要由五臂半橋構成，對於每一臂半橋電路，可以有兩種切換狀態：上導通下截止、下導通上截止（此兩種狀態分別以 1 和 0 表示）。此五相系統之切換狀態可以用一個五位元之二進位數字表示  $S_1 S_2 S_3 S_4 S_5$ ，而對於給定的切換狀態（5 位元），此切換狀態所產生的負載相電壓可以由下式計算得到。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \\ V_{dn} \\ V_{en} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4/5 & -1/5 & -1/5 & -1/5 & -1/5 \\ -1/5 & 4/5 & -1/5 & -1/5 & -1/5 \\ -1/5 & -1/5 & 4/5 & -1/5 & -1/5 \\ -1/5 & -1/5 & -1/5 & 4/5 & -1/5 \\ -1/5 & -1/5 & -1/5 & -1/5 & 4/5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \end{bmatrix} = \mathbf{S}_c \mathbf{s} \quad (1)$$

#### 2. 五相電壓源反向器電路

載波型脈寬調變 (Carrier-Based PWM, CBPWM) 主要優點為實現簡易，且通常為微處理器內建函數，因此，常見之空間向量脈寬調變以及不連續脈寬調變法則與載波型脈寬調變之間的關聯性以分析已經發展相當成熟，且廣為人知：給定一組五相參考相電壓  $\vec{S}^* = [\vec{s}_1^* \vec{s}_2^* \vec{s}_3^* \vec{s}_4^* \vec{s}_5^*]^T$ ，若將此五個參考電壓都加上一個零序訊號  $v_{zs} = 0.5(-\min(\vec{S}^*) - \max(\vec{S}^*))$ ，再與高頻三角波比較，以產生切換訊號，則此五相切換訊號會與空間向

## 更完整的內容

詳見【機械工業雜誌】422 期・107 年 5 月號

---

機械工業雜誌・每期 220 元・一年 12 期 2200 元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

訂書專線：03-591-9339

傳 真：03-582-2011

機械工業雜誌・官方網站：[www.automat.tw](http://www.automat.tw)

機械工業雜誌・信箱：[jmi@itri.org.tw](mailto:jmi@itri.org.tw)