



三相 UPS 電路架構及效率提升

廖仁詮 郭朝龍

台達電子工業股份有限公司

摘要

台灣由於電子科技及半導體產業的進步發展，製程所需之精密儀器設備對電源品質的要求日益提高，也帶動了對三相大容量 UPS 的需求。在能源危機及溫室效應的議題下，如何提升 UPS 運轉效率、減少能耗及降低營運成本，變成 UPS 廠商很重要的一個課題。因此，本文將從介紹三相 UPS 的電路架構開始，從 PFC (功率因數校正) 及 Inverter (逆變器) 電路架構的比較、控制方法的優化、主要元器件的選擇及高效率的經濟模式 (ECO mode) 運轉，來提高 UPS 的效率。同時文中亦對現今國際上的 UPS 效率法規做一簡介。

一、前言

不斷電系統 UPS 主要的目的為提供穩定電源，供給重要負載使用，以防止在電源品質不良的情況下，造成重要資料之損失。影響電力品質的因素包括：電



壓過高或過低、突波及雜訊、電壓閃爍、三相不平衡、諧波失真、頻率異常及市電中斷。雖然 UPS 的主要功能是提供穩定的輸出電源，但在能源危機及溫室效應的議題下，UPS 除了必須提供穩定電源之外，也需在不影響可靠度的前提下，儘可能地提高 UPS 的轉換效率。效率提升的優點除了環境議題之外，還包括了支出較低的電費，節省營運成本。以一台 200KW 的 UPS 為例子，當效率由 92% 提高至 96%，在滿載運轉的情況下一年約可省下八萬度的用電。同時，由於 UPS 效率的提升造成發熱量的減少，因此亦可節省機房內冷氣空調設備的裝置費及空調用電電費。所以如何提升 UPS 效率，現今變成一個很重要的課題。

在本文中，第二節將探討三相 UPS 的基本架構，簡單地介紹 UPS 的組成及工作模式，第三節介紹現今國際上 UPS 的相關效率法規，第四節則介紹 UPS 雙級轉換中的 PFC 電路架構，分析其特性並比較其優缺點，第五節介紹常見於 UPS 的逆變器電路架構，分別介紹其特性並比較其優缺點，第六節則探討 UPS 控制方法與效率間的關係，第七節針對 UPS 中的關鍵零組件:功率開關元件及磁性元件的選用，作一簡單的探討與比較，第八節則介紹 UPS 的高效率經濟模式運轉，第九節則作一結論。

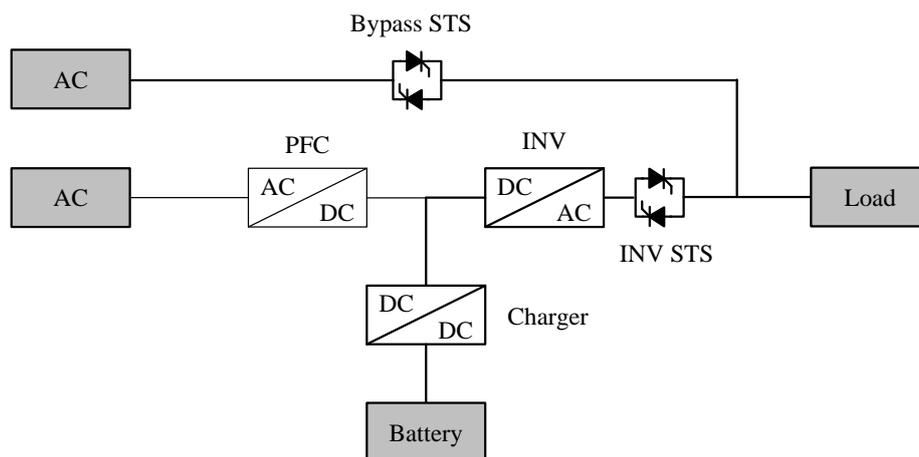


二、 UPS 之基本架構

UPS 以工作型態來分類的話，可以分成在線式(On Line UPS)，在線互動式(Line-Interactive UPS)及離線式(Off Line UPS)。離線式 UPS 在正常情況下，負載由市電直接輸出，市電中斷時，負載則由電池透過逆變器供給。在線互動式 UPS 與離線式 UPS 的主要差別為：在線互動式 UPS 在輸入電壓不穩定時，能透過電壓調整，提供負載一穩定之輸出，若市電中斷或頻率異常，再由電池供電。在線式 UPS 透過雙級轉換，使得 UPS 輸出不受輸入電壓的品質影響，穩定地提供負載一純淨的電源。當市電中斷，在線式 UPS 亦藉由電池供電給負載。這三種工作型態的 UPS，若以效率來區分的話，則離線式 UPS > 在線互動式 UPS > 在線式 UPS；若以供應負載的電源品質來區分的話，則在線式 UPS > 在線互動式 UPS > 離線式 UPS。

目前市場上之三相 UPS 主要為在線式 UPS，因此以下再針對三相在線式 UPS 的基本架構作一簡單介紹。三相 UPS 的基本架構主要包括：靜態旁路開關(Bypass static switch, Bypass STS)，功率因數校正電路(Power factor correction circuit, PFC)，逆變器(Inverter, INV)，逆變器靜態開關(Inverter

static switch, INV STS)以及充電器(Charger) 所組成，如圖一所示。UPS 在正常情況下，主要透過市電→功率因數校正電路→逆變器→負載的路徑輸出，以確保供電的品質，並同時對電池充電。當市電中斷時，則 UPS 會轉由電池供電，逆變器負責將此直流電壓轉換成純淨的交流弦波電壓，提供給負載使用；若市電恢復，則 UPS 轉由市電供電。如果逆變器出現異常故障，則 UPS 轉由旁路供電。因此，UPS 能提供客戶的重要負載一個穩定且不間斷之電源，使客戶不至於因為市電中斷，而產生巨大的損失。UPS 主要扮演一個介於市電與負載間電能轉換的橋樑，而在此交流轉直流再轉為交流電源的轉換過程中，功率損耗及轉換電能損失油然而生。因此，各國也訂定了相關的規範，以規範 UPS 的轉換效率。下節將針對 UPS 的相關國際效率法規做一介紹。



圖一 三相在線式 UPS 的基本架構

三. UPS 之國際效率法規

關於 UPS 的國際效率法規，本節主要介紹中國大陸，歐洲及美國能源之星的規範。圖二為中國質量驗證中心(China Quality Certification Centre, CQC) 在 2011 年四月針對 UPS 所定出的效率規範，由圖中可看出，針對大型在線式 UPS (大於 100kVA) 的效率規範為 92%。

圖三為歐洲在 2011 年三月針對 UPS 所設定的效率規範，由圖三可看出，歐洲的規範除了依據功率等級區分之外，亦同時針對輕重載皆有其效率的規範。舉例來說，一台 200KVA 的 UPS，在 25%負載時，效率要求為 90%，50%負載時，效率要求為 92.5%，75%及 100% 負載時，效率要求為 93.5%。

圖四為能源之星針對 UPS 的效率規範草稿，能源之星的規範與中國 CQC 的規範類似，主要依操作模式及額定功率區分。能源之星中的 VFD(Voltage Frequency Dependent)相當於前文所提之離線式 UPS，VI(Voltage

Independent)即為在線互動式 UPS，而 VFI(Voltage Frequency Independent)則相當於在線式 UPS。以一 200KVA 在線式 UPS 為例，能源之星對其效率的規範須大於 $0.0099 \times \ln(P) + 0.805$ ，即為 92.58%。

為了達成國際法規對 UPS 的效率規範以及節能環保的要求，UPS 的設計者需在 PFC 電路架構、INV 電路架構、UPS 的控制方法、功率半導體元件的選擇、磁性元件的選擇上去作一最佳化的設計，如此才能提供客戶一高效率之 UPS。接下來，本文將依序針對：PFC 電路架構、INV 電路架構、UPS 的控制方法、功率半導體元件的選擇、磁性元件的選擇以及經濟模式運轉控制，作一分析比較。

China Efficiency Requirement

CQC3108-2011
2011-04-01



分 类	微型在线式	小型在线式	中型在线式	大型在线式	ECO 状态*
技术要求	≥84%	≥88%	≥90%	≥92%	≥97%
*10kVA 及以上者必须具备 ECO 功能					

微型：額定輸出容量 < 3 kVA。

小型：額定輸出容量 3~10 kVA，不含 10 kVA。

中型：額定輸出容量 10 kVA~100 kVA，不含 100 kVA。

大型：額定輸出容量 ≥ 100 kVA。

圖二 中國 CQC 的 UPS 效率規範

Mode	from 1-1-2011 to 31-12-2012			
	UPS range: • 10 – < 20 kVA	UPS range: • 20 – < 40 kVA	UPS range: • 40 – < 200 kVA	UPS range: • 200 kVA
Normal mode Minimum efficiency measured according to EN 62040-3 Annex AA				
25 % of nominal power	85,5%	85,5 %	87,8 %	89,8 %
50 % of nominal power	89,8 %	90,3 %	91,3 %	92,3 %
75 % of nominal power	91,3 %	91,8 %	92,5 %	93,3%
100 % of nominal power	91,5 %	92 %	92,5%	93,3 %
Mode	from 1-1-2013 to 31-12-2014			
	UPS range: • 10 – < 20 kVA	UPS range: • 20 – < 40 kVA	UPS range: • 40 – < 200 kVA	UPS range: • 200 kVA
Normal mode Minimum efficiency measured according to EN 62040-3 Annex AA				
25 % of nominal power	86,5%	87,5 %	89,0 %	90,0 %
50 % of nominal power	91,0 %	91,5 %	92,0 %	92,5 %
75 % of nominal power	92,0 %	92,5 %	93,0 %	93,5%
100 % of nominal power	92,0 %	92,5%	93,0%	93,5 %

圖三 歐洲的 UPS 效率規範

Minimum Average Efficiency Requirement ($Eff_{AVG MIN}$), Where:				
• P is the Output Power in watts (W), and				
• ln is the natural logarithm.				
UPS Class	Output Power	Input Dependency		
		VFD	VI	VFI
Consumer	$P \leq 1500 W$	0.97		
Commercial	$1500 W < P \leq 10,000 W$	0.97	0.96	$0.0099 \times \ln(P) + 0.805$
Data Center	$P > 10,000 W$	0.97	0.95	$0.0099 \times \ln(P) + 0.805$

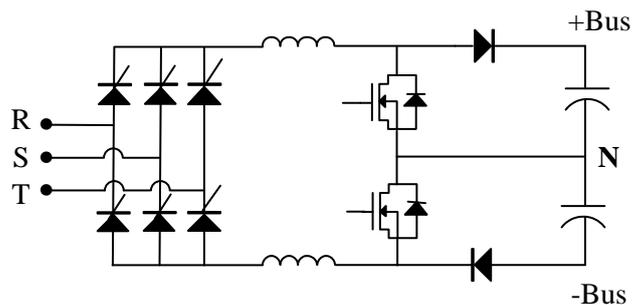
圖四 能源之星的 UPS 效率規範

四. PFC 之電路架構

功率因數校正電路的主要目的是提供一穩定的直流電源並降低市電輸入端諧波的產生，減少虛功的損耗。功率因數校正電路在 UPS 中有多種不同的電路架構，每種架構及對效率的影響各有其優缺點，所以各有其適用的場合，以下將詳細說明：

1. 三相兩開關三電平昇壓轉換器(Two-switch Three-level Boost Converter)

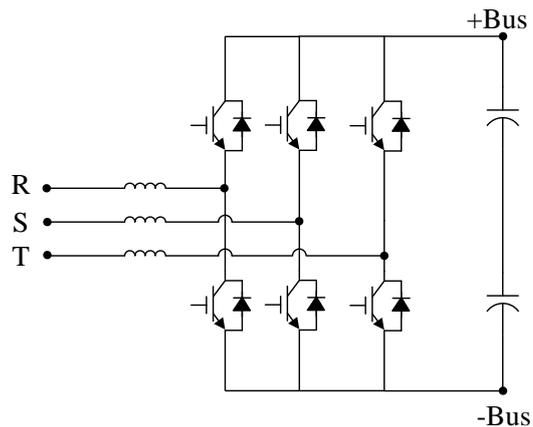
三相兩開關三電平昇壓轉換器如圖五所示，三相電源輸入後經由三相 SCR 整流，再經由電感、IGBT 及二極體整流成穩定的直流電源。此電路架構由於僅使用兩顆 IGBT，因此具有低成本的優點，但也因為僅使用兩顆 IGBT，使其功率等級無法做大。此架構的缺點為其輸入的電流諧波失真較大。兩開關三電平架構的優點為其使用的開關元件僅需承受 BUS 電壓，因此可以使用較低耐壓的開關，進而提升其轉換效率。



圖五 三相兩開關三電平昇壓轉換器(Two-switch Three-level Boost Converter)

2. 三相六開關昇壓轉換器(Three-phase Six-switch Boost Converter)

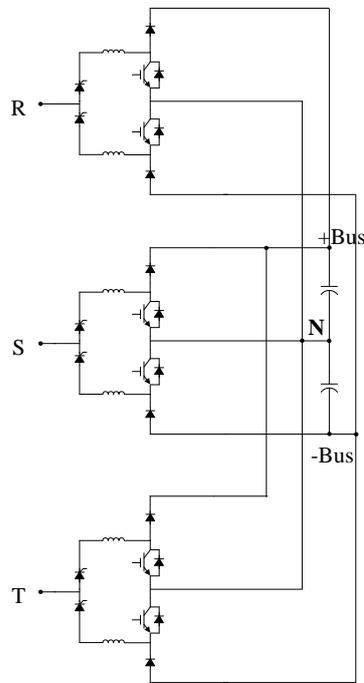
三相六開關昇壓轉換器是一常見之三相 PFC 架構，由六顆主動開關及三顆電感組成，如圖六所示。能適用於高功率等級的應用。三相六開關昇壓轉換器的主要缺點為其開關須承受大於 2 倍的 Bus 電壓，導致切換損失大幅增加。因此，三相六開關昇壓轉換器一般來說其工作的切換頻率都不高，以降低其切換損失 (Switching Loss)。



圖六 三相六開關昇壓轉換器(Six-switch Boost Converter)

3. 三電平昇壓轉換器(Thee-level Boost Converter)

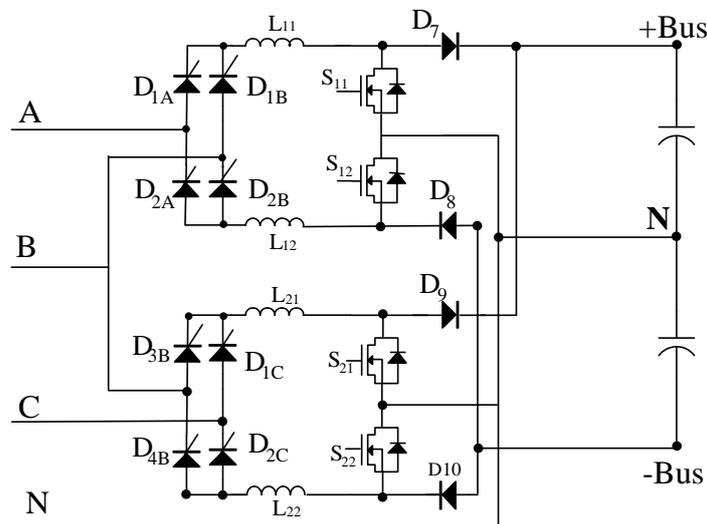
三電平昇壓轉換器在三相應用中，如圖七所示。共需六個開關、六顆快速二極體、六顆慢速二極體以及三顆電感所組成。三電平昇壓轉換器的開關元件僅須承受 Bus 電壓，所以能選用較低耐壓的開關元件，有效地降低開關切換損失，進而提升其轉換效率。



圖七 三電平昇壓轉換器(Thee-level Boost Converter)

4. 三相四開關昇壓轉換器(Three-phase Four-switch Boost Converter)

三相四開關昇壓轉換器其原理同三電平昇壓轉換器，如圖八所示。其主要特點為簡化三電平昇壓轉換器，使其僅需要四顆開關元件就能達成與三電平轉換器同樣的效果。因此，更能適用於高功率密度的場合。三相四開關昇壓轉換器為台達電子提出的專利架構，能使 UPS 產品達到高效率，高功率密度的目標。



圖八 三相四開關昇壓轉換器(Three-phase Four-switch Boost Converter)

表一比較了上述所提之四個 PFC 電路，分別從電流諧波失真程度的優劣、效率、磁性元件數量、半導體元件成本及是否具有雙向的電力流通能力進行比較。

由表中可知，此四種電路架構各有其優缺點，設計者應該針對應用的場合及產品的定位，選擇一適合的電路架構。

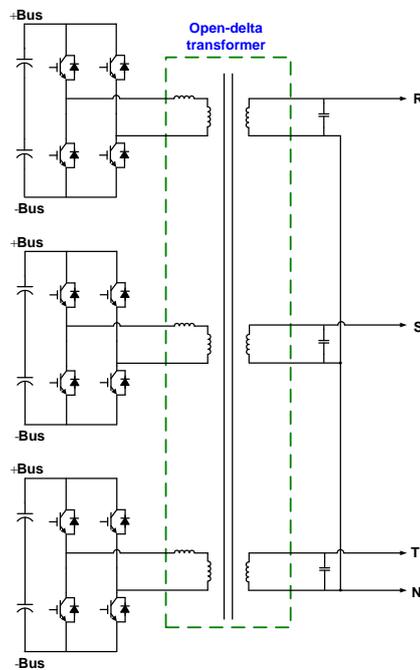
表一 PFC 電路架構比較

電路架構	電流諧波 失真	效率	磁性元件數量	半導體元件成本	雙向電力流通
三相兩開關 三電平昇壓 轉換器	差	高	2	低	否
三相六開關 昇壓轉換器	佳	高	3	中	可
三電平昇壓 轉換器	佳	較高	6	高	否
三相四開關 昇壓轉換器	佳	較高	4	中	否

五. Inverter 之電路架構

1. 三相全橋隔離逆變器(Three-phase Isolated Full-Bridge Inverter)

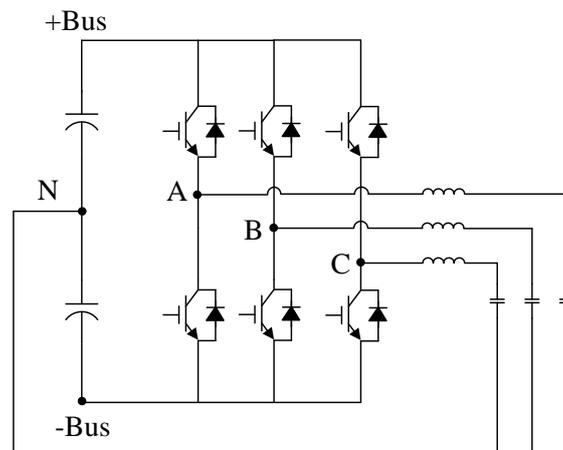
三相全橋隔離逆變器如圖九所示。其 Bus 電壓較低，主要透過輸出隔離變壓器昇壓並產生 N 線，以提供負載使用。由於其輸出隔離變壓器的尺寸及重量皆大，且變壓器有很大的功率損失，所以三相全橋隔離逆變器之效率相對較低。



圖九 三相全橋隔離逆變器(Three-phase Isolated Full-Bridge Inverter)

2. 三相兩電平逆變器(Three-phase Two-level Inverter)

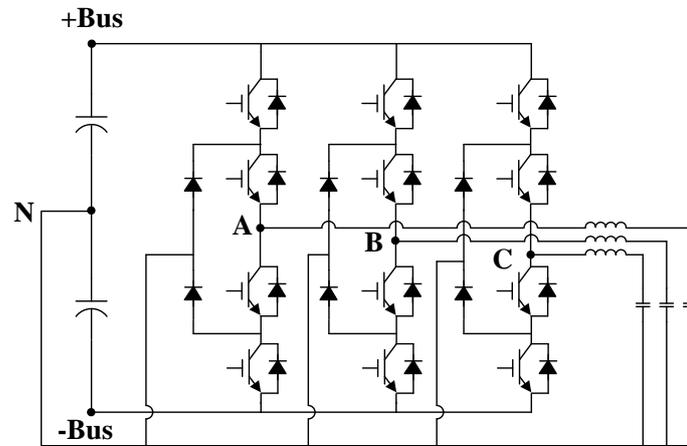
三相兩電平逆變器如圖十所示。其主要缺點為開關元件耐壓須大於 2 倍 Bus 電壓，使其切換頻率受到限制。因此，如何從切換頻率的選擇與控制演算法的改變，以提升兩電平架構的轉換效率，為設計者的主要課題。



圖十 三相兩電平逆變器(Three-phase Two-level Inverter)

3. 三相三電平逆變器(Three-phase Three-level Inverter)

三相三電平逆變器如圖十一所示。其與三電平昇壓轉換器類似，其開關元件僅須承受 Bus 電壓，具有先天高效率的優勢。三相三電平逆變器的架構雖然需要較多的開關元件，但三電平架構具有電感電流連波小、開關元件跨壓小及低功率損耗的優點，使得三電平的架構常見於高效率 UPS 的架構中。



圖十一 三相三電平逆變器(Three-phase Three-level Inverter)

表二比較了上述所提之三個逆變器電路架構，分別從輸出電壓諧波失真程度的優劣、效率、磁性元件數量、半導體元件成本及是否具有雙向的電力流通能力進行比較，而目前逆變器的主要趨勢為採用無變壓器的架構為主。

表二 Inverter 電路架構比較

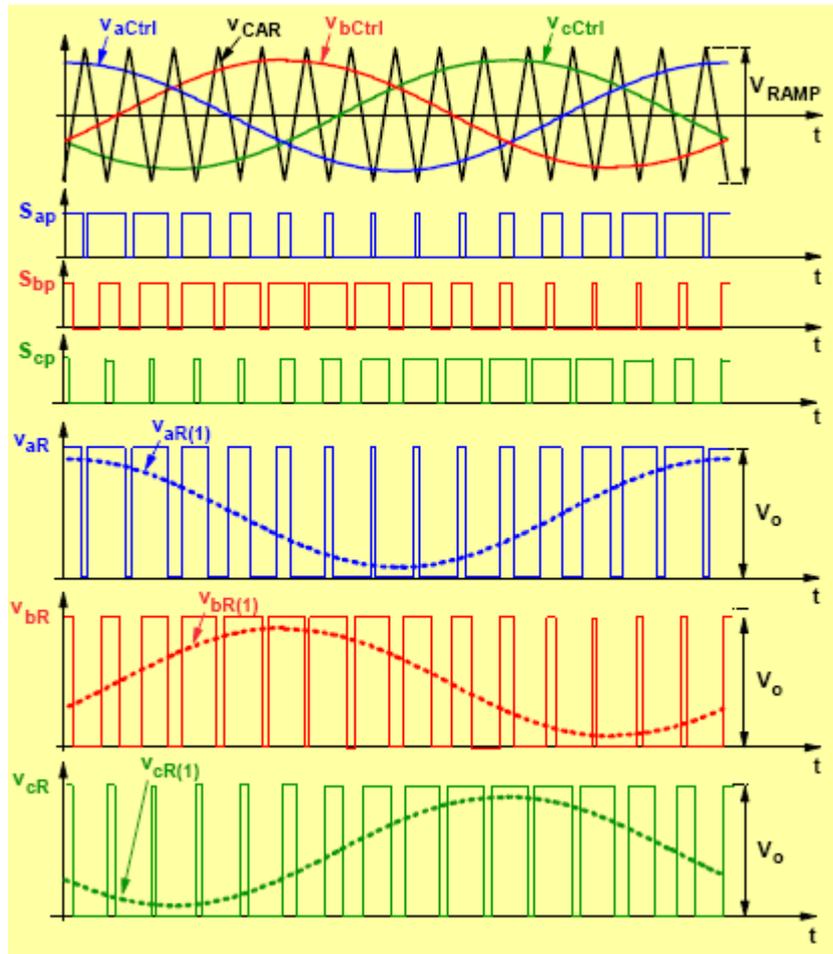
電路架構	電壓諧波 失真	效率	磁性元件數量	半導體元件成本	雙向電力流通
三相兩電平 逆變器	佳	高	3	低	可

三相三電平 逆變器	佳	最高	3	高	可
三相全橋隔離 逆變器	佳	差	3(大)	高	可

六. UPS 之控制方法

在 UPS 逆變器的控制上，脈波寬度調變的模式一般採用正弦脈波寬度調變(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)，如圖十二所示。由控制訊號(V_{ctrl})與三角波比較以產生 PWM 訊號，藉以驅動開關元件。正弦脈波寬度調變在逆變器的應用中，對於 BUS 電壓的利用率為 0.866，也就是說，在 380Vac 的系統中 BUS 電壓至少要大於 620V。由於此控制方式 BUS 電壓利用率較低，因此需要比較高的 BUS 電壓，進而增加開關元件的切換損失。同時，由於較高的 BUS 電壓，開關元件的電壓應力也會隨之增加，需增加一些吸收電壓突波的

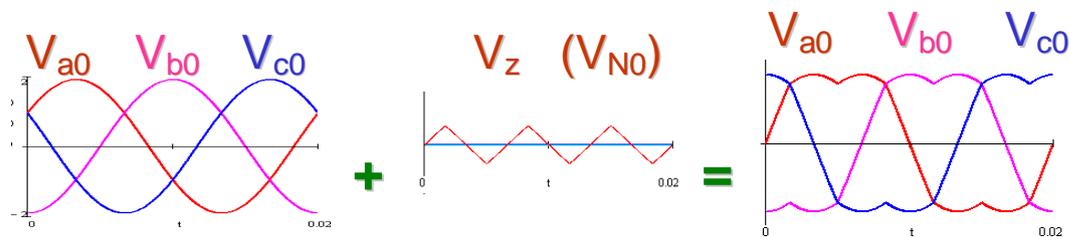
Snubber 電路，此電路又會導致多餘的功率損耗。因此，若能藉由一些控制方法上的改變，進而提升 BUS 電壓的利用率，則系統效率也會隨之提高。



圖十二 三相 SPWM 控制方式

圖十三所示為在原本的控制訊號 (v_{ctrl}) 上注入一個三次諧波 V_z ，再將此新的控制訊號與三角波比較，產生 PWM 訊號進而驅動開關元件。諧波注入法能

有效地提升 BUS 電壓的利用率從 0.866 提高到到 1。也就是說，原先需要 620V BUS 電壓的系統，若加入諧波注入法之後，BUS 電壓只需要 540V。BUS 電壓若從 620V 降至 540V 在效率上的影響會有多少？舉個例子來說，在一個 200kW 的逆變器，若切換頻率為 5kHz，則 540V 的 BUS 電壓開關元件的切換損失，將比 620V BUS 電壓的系統少了 250W。



圖十三 三相 SPWM 控制+諧波注入

由以上例子可知，控制方法上的改良，能使 UPS 的轉換效率向上提升，使 UPS 更能符合高效率節能的要求。一般 UPS 的架構中，主要影響整機損耗的關鍵，除了架構的選擇及控制方法外，另外還有功率元件及磁性元件的選擇及設計，亦會對效率產生重大的影響，下一節將詳述之。

七. 功率開關元件及磁性元件選擇

1. 功率開關元件

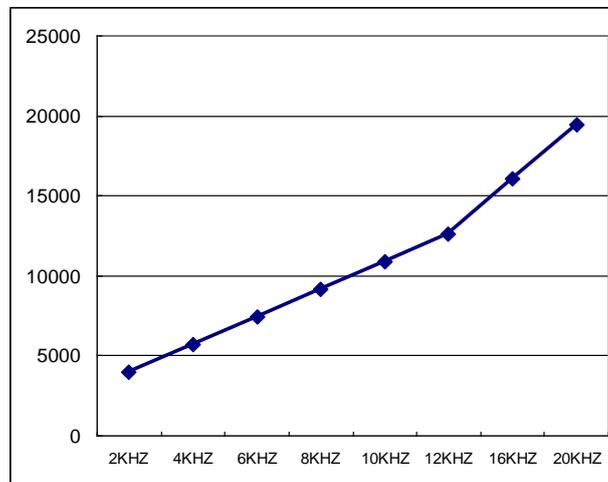
功率開關元件在 UPS 中比較常見的有金氧半場效電晶體(MOSFET)及絕緣柵雙極電晶體(IGBT) 。簡單地區分這兩種元件使用場合的話，MOSFET 主要應用在耐壓耐流較小的場合；而 IGBT 則能適應較大的耐壓及耐流。

目前 MOSFET 應用在 UPS 的主流為 CoolMOS，主要是因為 CoolMOS 具有較低的 $R_{ds,on}$ 及較低的導通損失，使得 CoolMOS 能承載較高的電流，因而常見於小功率 UPS(小於 20kVA)的應用。IGBT 雖然在切換的速度跟切換損失上都不如 MOSFET，但 IGBT 具有較高的功率處理能力，所以在一般較高功率的場合，IGBT 仍然扮演一個很重要的角色。

以下將以 200kW 的 UPS 為例，針對 IGBT 的損耗部份，做一分析比較。而此比較的基礎在 PFC 的部份，是採用三相六開關昇壓轉換器架構，INV 的部份則為三相兩電平逆變器架構。在此比較基礎下，我們將進行不同切換頻率下的

IGBT 損耗比較、不同 BUS 電壓下的 IGBT 損耗比較、以及不同廠牌的 IGBT 模組的損耗比較。

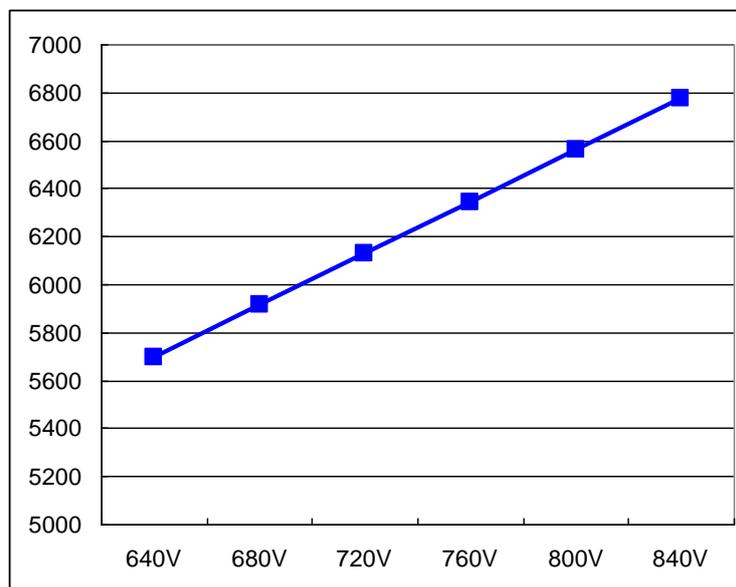
圖十四針對不同切換頻率下的 IGBT 損耗作一比較，由圖可以看出，切換頻率越高則 IGBT 的損耗越大，2kHz 切換頻率下的 IGBT 損耗大概為 20kHz 切換頻率下損耗的五分之一。切換頻率低雖然 IGBT 損耗較小，但相對地需要付出的代價有：較大的磁性元件，導致較大的磁性元件損耗以及較差的響應速度跟頻寬。切換頻率的選擇雖然直接影響到 UPS 的效率，但還必須與其他條件作一交叉比對，才能找出一個對整機效率較好的切換頻率點。



圖十四 不同切換頻率下的 IGBT 損耗分析

(200kW UPS, 輸入及輸出電壓:380/220V, BUS 電壓:800V)

圖十五針對不同 BUS 電壓下的 IGBT 損耗作一比較。由圖可以看出，BUS 電壓越高則 IGBT 損耗越大，BUS 電壓的高低主要影響 IGBT 的切換損失，在導通損失的部份則沒什麼差別。由圖中可知，如何使 UPS 具有較低的 BUS 電壓，亦是 UPS 能否具有較高效率的一項重要指標。



圖十五 不同 BUS 電壓下的 IGBT 損耗分析

(200kW UPS, 輸入及輸出電壓:380/220V, 切換頻率:5kHz)

表三針對不同 IGBT 模組在同一測試條件下的損耗作一比較。由表中可以看出，縱然是相同包裝、相同規格的 IGBT 模組，但在功率損耗上，依然會有所差距。

而此差距甚至達到 20%。因此，不同廠家 IGBT 間的特性差異及正確選用，亦是在提升 UPS 的效率上，必須特別注意並被探討的一環。

表三 不同廠牌 IGBT 損耗分析

(200kW UPS, 輸入及輸出電壓:380/220V, 切換頻率:5kHz)

	A	B	C	D	E
PFC Conduction loss	1165	1290	1066	1020	1141
PFC Switching loss	2208	2542	2391	2479	1948
INV Conduction loss	1087	1105	1017	1022	1165
INV Switching loss	2133	2428	2294	2383	1857
Total loss	6593	7365	6768	6904	6111

2. 磁性元件

磁性元件的損耗，亦是佔 UPS 整機損耗的一個相當大的百分比。磁性元件的選擇，主要取決於切換頻率及電路架構。而磁性元件設計時，則取決於切換時的漣波電流大小，而漣波電流的大小則取決於電路架構的不同及切換頻率的高

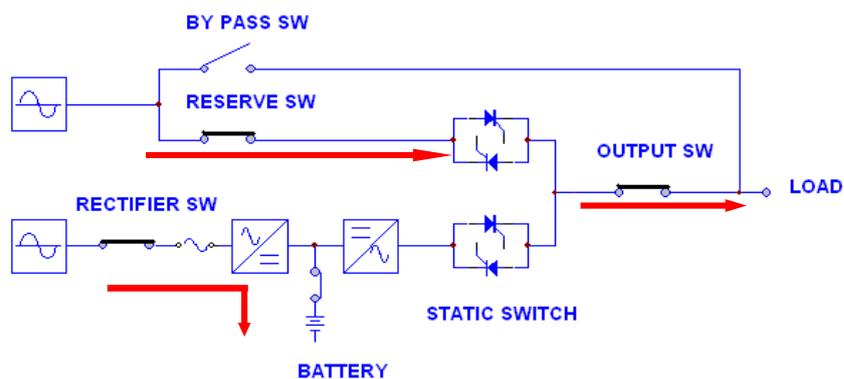


低。舉例來說，三相兩電平逆變器需要的電感值就比三相三電平逆變器來的大，主要的原因為三相兩電平逆變器電感上的跨壓較大。而切換頻率的大小亦會直接影響到電感上的漣波電流。一般來說，切換頻率越高，需要的磁性元件感量越小，相對來說，磁性元件的損耗亦較小。

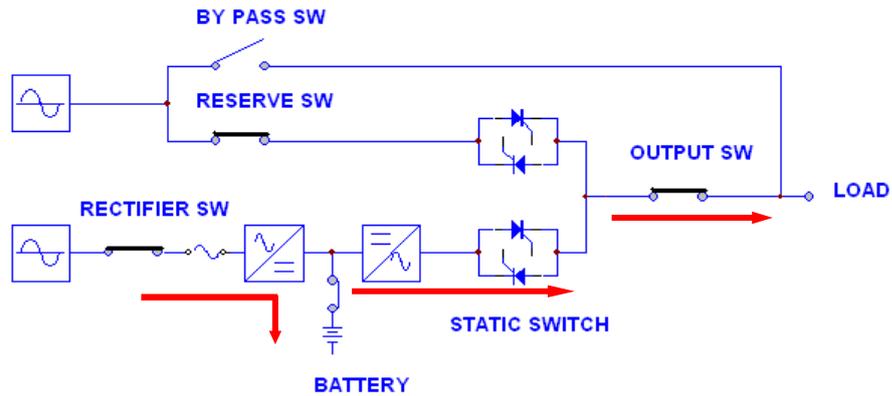
除了切換頻率及電路架構的影響之外，另外一個影響磁性元件損耗的一個關鍵因素則為磁性元件的材質。一般常見的磁性元件材質包括有：矽鋼片(Silicon Steel)、非晶質合金(Amorphous Alloy)、鐵粉磁芯(Iron Powder Core)等等。不同材質的鐵心，各有其適用的場合。所以，如何選擇一適當的磁性材料，在UPS的效率上，亦扮演一相當重要的角色。矽鋼片一般用於較低的切換頻率場合，若切換頻率較高，則矽鋼片的鐵損會急遽增加，進而大幅降低UPS的效率。非晶質合金與鐵粉磁芯目前廣泛地應用於UPS中，主要因其具有較低的鐵損。由於鐵粉磁芯的種類有很多種，如MPP、High Flux、Mega Flux及Sendust等，如何從中選出一適合的鐵芯及適合實際應用的場合，亦是影響UPS效率的關鍵。

八. 高效率經濟模式運轉

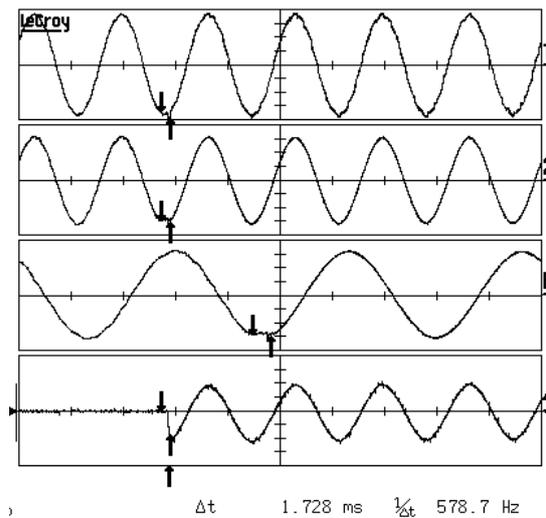
經濟模式(ECO mode)的工作模式為：當市電正常時，負載由市電直接供給，平常逆變器處於空載狀態；當市電異常時，負載則轉由逆變器供電，如圖十六、圖十七所示。經濟模式的優點主要為高效率節能，一般經過雙級轉換的 UPS 效率約為 92%~94%左右，當 UPS 工作在經濟模式時，其效率可提高到超過 98%。經濟模式的主要缺點為市電異常時，旁路轉換至逆變器供電的過程，會有一個轉換時間，尤其當負載為變壓器等感性負載時，若轉換時市電與逆變器電壓不鎖相，則有可能造成轉換失敗及斷電的風險。台達電子專利的經濟模式轉換控制方法，利用快速地鎖相控制及偵測機制，能大幅降低轉換的時間，並解決不鎖相轉換失敗的風險，如圖十八所示。



圖十六 市電正常時的經濟模式



圖十七 市電異常時的經濟模式



Test Condition:

BYPASS MODE→INV. MODE

CH1:R Phase Bypass Voltage (100V/DIV)

CH2:R Phase O/P Voltage (100V/DIV)

CH3:R Phase O/P Voltage ZOOM (100V/DIV)

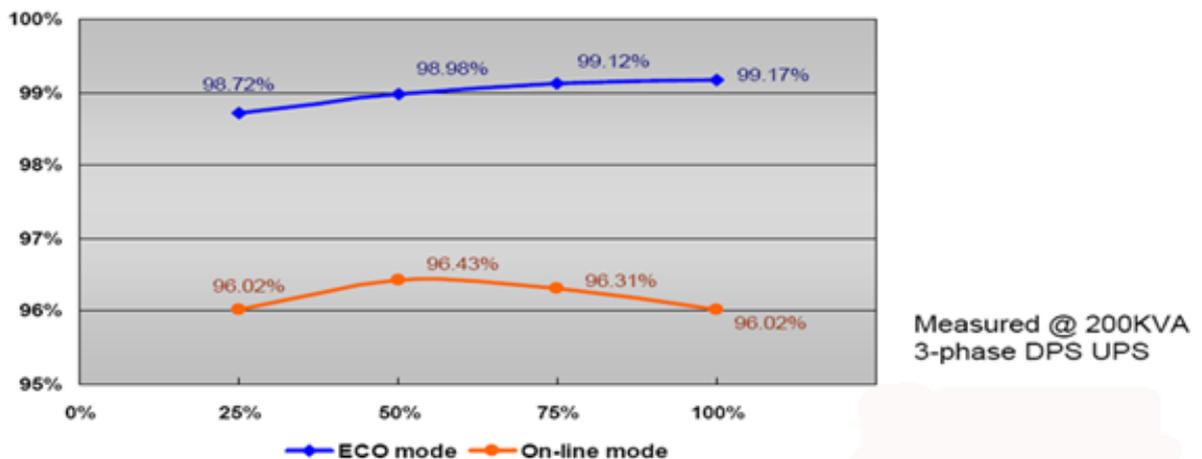
CH4:R Phase INV. Current (100A/DIV)

轉換時間: 1.728ms

圖十八 經濟模式轉換波型

九. 結論

本文主要介紹三相 UPS 電路架構以及探討如何從電路架構、控制方法與關鍵零組件間的結合，以提升 UPS 的轉換效率。台達電子的三相大功率 UPS 藉由上述電路架構的探討比較、控制方法與功率元器件間的最佳化，能成功地達到高效率的目標及高性能的要求。圖十九為經由認證單位所實測的 200kVA 效率曲線，在雙級轉換模式 (on-line mode) 供電時，最高效率可達 96.43%，在經濟模式 (on-line mode) 供電時，最高效率可達 99.17%。



圖十九 台達電子 UPS 效率曲線

十. 參考文獻

1. Relationship Between Space-Vector Modulation and Three-Phase Carrier-Based PWM: A Comprehensive Analysis, IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 49, NO. 1, February 2002
2. High Performance Power Converter Systems for Nonlinear and Unbalanced Load/Source, Thesis , Virginia Tech, 1999
3. Analysis and Comparison of Space Vector Modulation Schemes for Three-leg and Four-leg Voltage Source Inverters, Virginia tech. thesis, 1997