

# 電源供應設計研討會

比較三相工業系統的 AC/DC 電源  
轉換拓樸

作者

Riccardo Ruffo、Kelvin Le 和 Harald Parzhuber



# 課程大綱

- 電源轉換系統概覽
- 三相升壓轉換器拓撲概覽與運作原理
- 功率損耗、共模雜訊與整流器應力比較
- 實驗結果 (二階、T 型、Vienna，主動中性點箝位 [ANPC])
- 結論

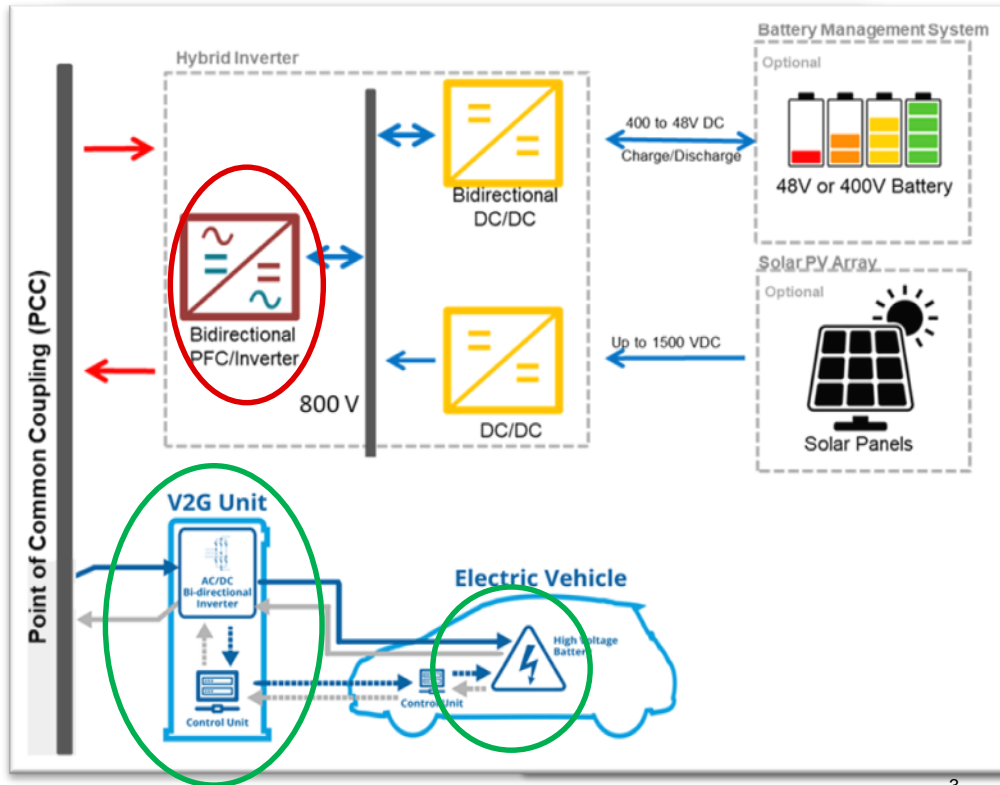
# 概覽：附 AC/DC 轉換器的終端設備

能源永續與安全，加速推動下列需求：

- 再生能源：風能與太陽能
- 能源儲存系統
- 電動車 (EV) 與充電器

重要終端設備的挑戰：

- 電網穩定性/可靠性
- 電源品質
- 快速高效的電動車充電效率



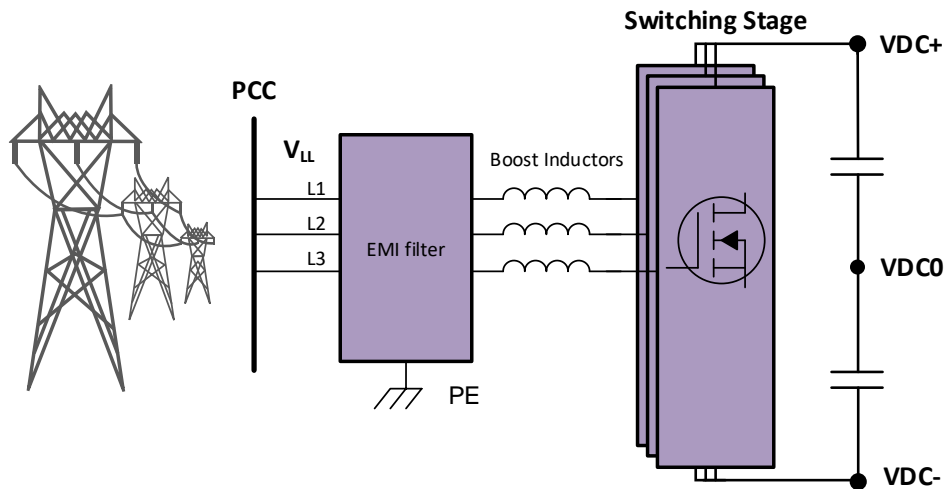
# 概覽：現有 AC/DC 拓撲

## AC/DC 升壓轉換器優勢：

- 效能更高 (電流更低)
- 注入電網的電磁干擾 (EMI) 雜訊降低
- 可有效處理電網的突波

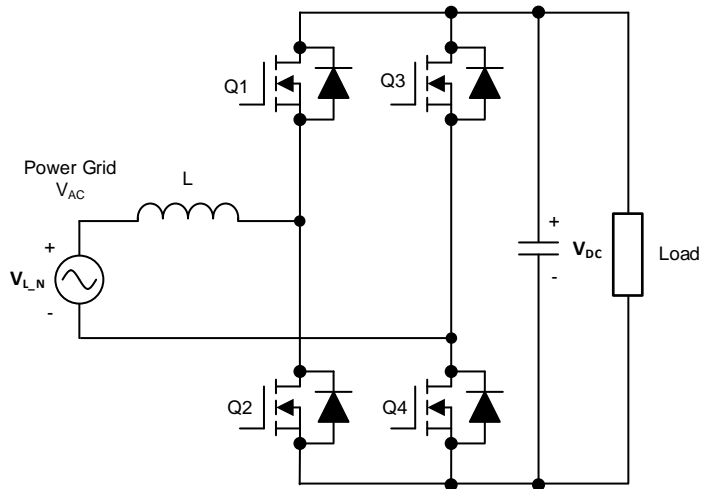
## AC/DC 升壓轉換器需要：

- 升壓功率因數校正 (PFC) ( $V_{DC} \gg \sqrt{2} V_{LL}$ )
- 電網側的感應行為
- DC 側的電容行為
- 三相優勢：電流、尺寸、電源漣波

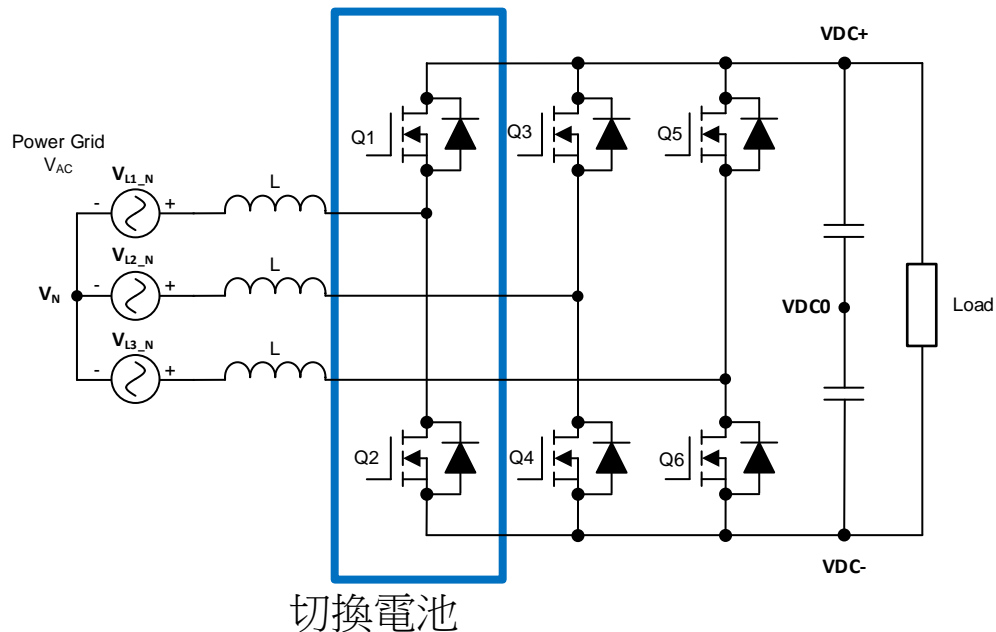


# 概覽

## 單相二階 PFC



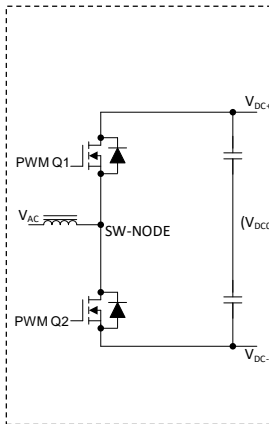
## 三相二階 PFC



附註：高頻時，電網的中性點幾乎能虛擬連接到中點

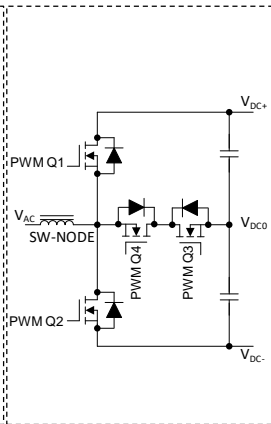
# AC/DC 功率級的多階拓撲概覽

2L 二階轉換器

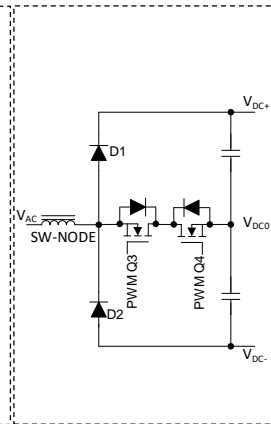


需要兩個連接到  
DC 鏈路的連線

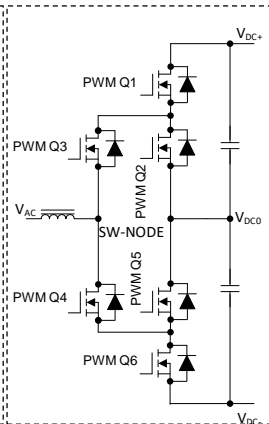
3L 三階 T 型



3L Vienna 整流器

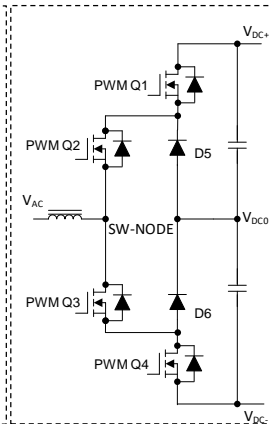


3L ANPC

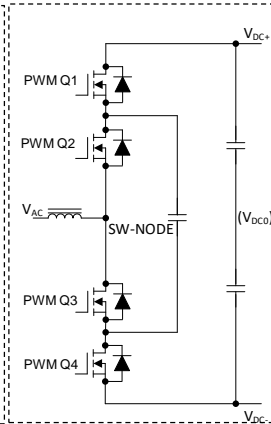


需要三個連接到  
DC 鏈路的連線

3L 中性點箝位  
(NPC)

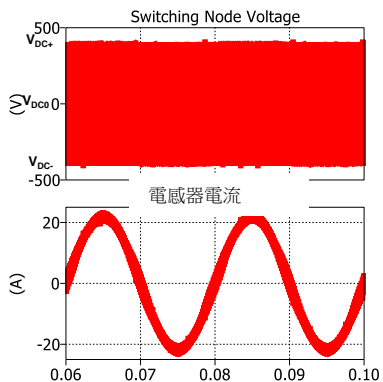
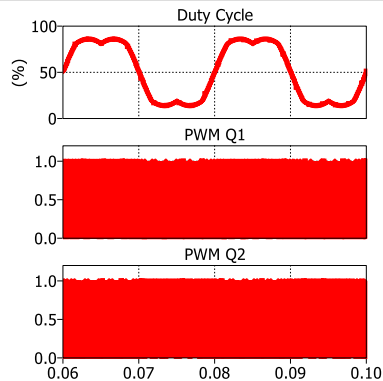
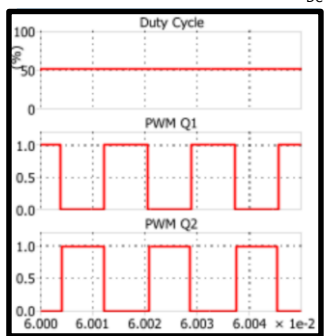
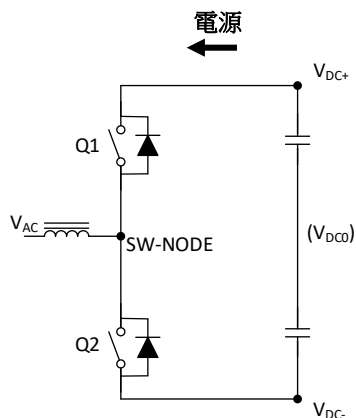


FC3L 飛馳電容器



需要兩個連接到  
DC 鏈路的連線

# 2L 轉換器：基本操作原理 (逆變器)



對於正弦波 ( $V_{DC0} \leq V_{AC} \leq V_{DC+}$ )，工作週期  $>50\%$ ：

- Q1 和 Q2 正在切換  $f_{PWM}$
- 輸出電壓係由脈衝寬度調變器 (PWM) 的工作週期予以定義 (Q1 的開啟時間通常超過 Q2)
- Q1 和 Q2 之間的失效時間

對於負正弦波 ( $V_{DC-} \leq V_{AC} \leq V_{DC0}$ )，工作週期  $<50\%$ ：

- Q1 和 Q2 正在切換  $f_{PWM}$
- 輸出電壓再由 PWM 的工作週期予以定義 (Q1 的關閉時間通常超過 Q2)

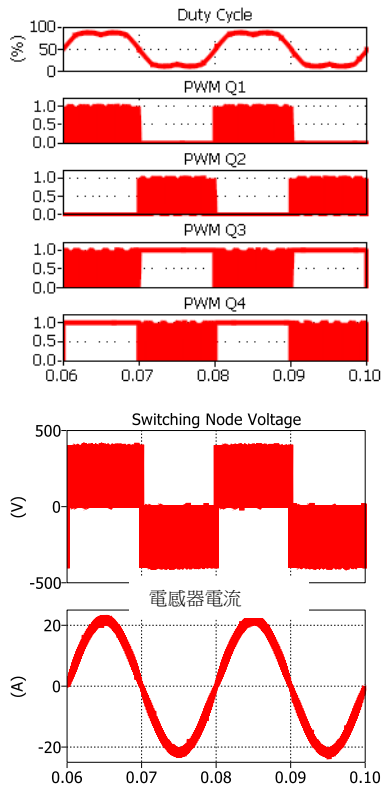
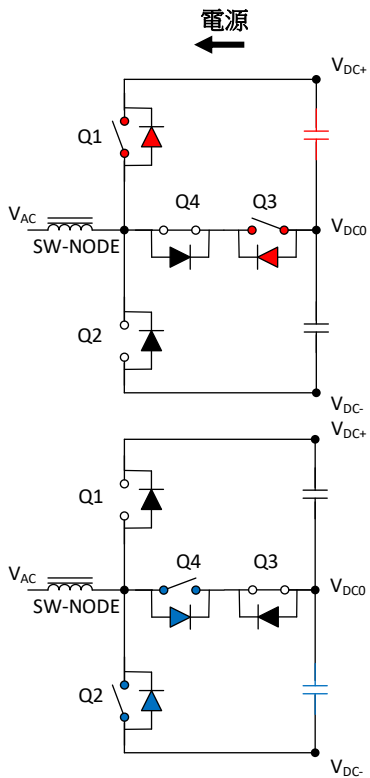
在零相交點時，工作週期為 50%

若輸出漣波頻率  $f_{HF-RIPPLE}$  等於  $f_{PWM}$ ：

- $f_{漣波}$  定義濾波元件 (磁性或電容) 的尺寸

Q1 和 Q2 須為  $V_{DC}$  ( $V_{DC} = 800\text{ V}$  時，額定電壓為 **1200-V**)

# 3L T 型：基本操作原理 (逆變器)



對於正弦波 ( $V_{DC0} \leq V_{AC} \leq V_{DC+}$ ) :

- Q4 會永久處於開啟狀態；Q2 會永久處於關閉狀態
- 以紅色顯示的 Q1 和 Q3 正在切換  $f_{PWM}$

• 應將 Q1 和 Q3 之間的失效時間納入原因考量

對於負正弦波 ( $V_{DC-} \leq V_{AC} \leq V_{DC0}$ ) :

- Q3 會永久處於開啟狀態，Q1 會永久處於關閉狀態
- 以藍色顯示的 Q2 和 Q4 正在切換  $f_{PWM}$

• 應將 Q2 和 Q3 之間的失效時間納入原因考量

若輸出漣波頻率  $f_{HF-RIPPLE}$  等於  $f_{PWM}$  :

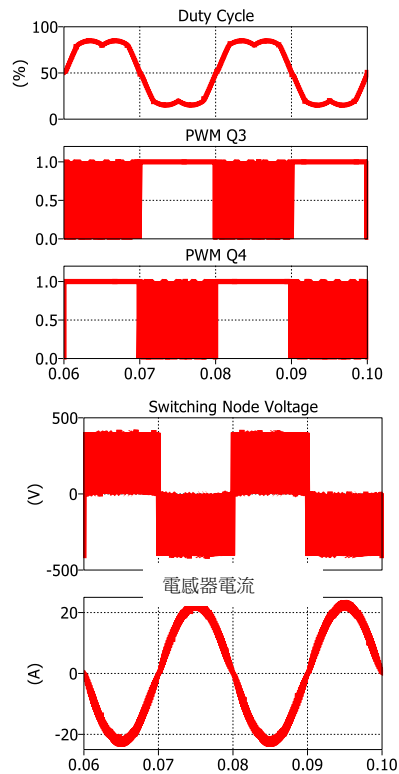
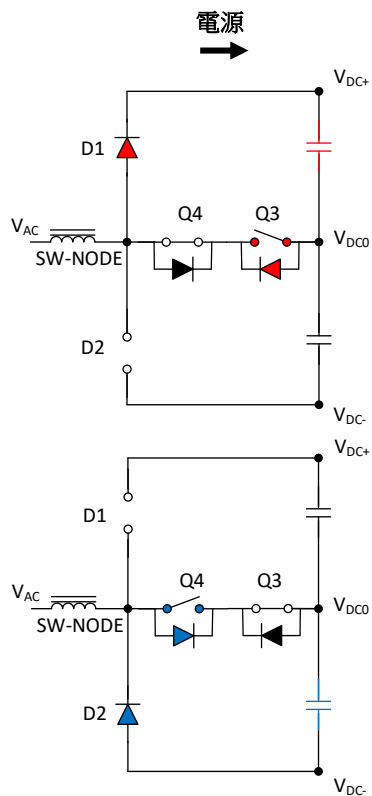
- $f_{HF-RIPPLE}$  定義濾波元件 (磁性或電容) 的尺寸

Q1 和 Q2 須為  $V_{DC}$  ( $V_{DC} = 800\text{ V}$  時，額定電壓為 1200-V)

Q3 和 Q4 可以是  $1/2 V_{DC}$  額定電壓 ( $V_{DC} = 800\text{ V}$  時，額定電壓為 600 V)



# 3L Vienna 整流器：基本操作原理 (PFC)



對於正弦波 ( $V_{DC0} \leq V_{AC} \leq V_{DC+}$ ) :

- 由於 PFC 操作，因此電流是負電流
- Q4 會永久處於開啟狀態
- 以紅色顯示的 Q3 會於  $f_{PWM}$  切換

對於負正弦波 ( $V_{DC-} \leq V_{AC} \leq V_{DC0}$ ) :

- 由於 PFC 操作，因此電流是正電流
- Q3 會永久處於開啟狀態
- 以藍色顯示的 Q4 會於  $f_{PWM}$  切換

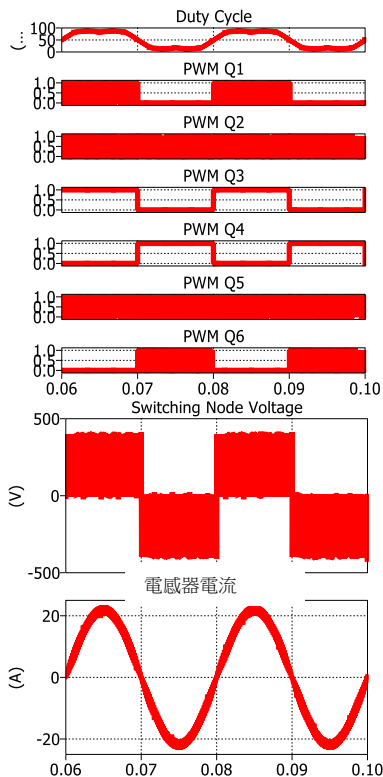
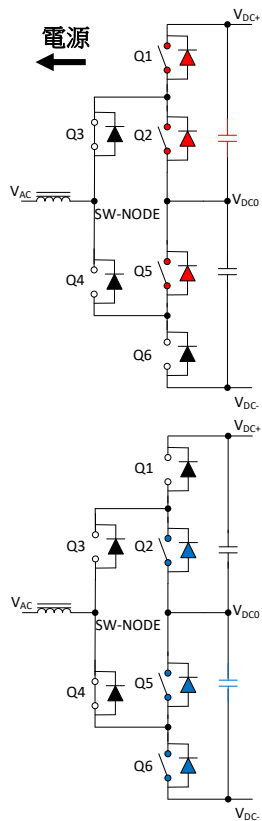
若輸出漣波頻率  $f_{HF-RIPPLE}$  等於  $f_{PWM}$  :

- $f_{HF-RIPPLE}$  定義濾波元件 (磁性或電容) 的尺寸

D1 和 D2 須為  $V_{DC}$  ( $V_{DC} = 800\text{ V}$  時，額定電壓為 1200 V)

Q3 和 Q4 可以是  $1/2 V_{DC}$  額定電壓 ( $V_{DC} = 800\text{ V}$  時，額定電壓為 600 V)

# 3L ANPC : 基本操作原理 (逆變器)



對於正弦波 ( $V_{DC0} \leq V_{AC} \leq V_{DC+}$ ) :

- Q3 會永久處於開啟狀態，Q4 會處於關閉狀態
- 以紅色顯示的 Q1 和 Q2 正在切換  $f_{PWM}$
- 另外，Q5 正在與 Q1 切換

對於負正弦波 ( $V_{DC-} \leq V_{AC} \leq V_{DC0}$ ) :

- Q4 會永久處於開啟狀態，Q3 會處於關閉狀態
- 以藍色顯示的 Q5 和 Q6 正在切換  $f_{PWM}$
- 另外，Q2 正在與 Q6 切換

若輸出漣波頻率  $f_{HF-RIPPLE}$  等於  $f_{PWM}$  :

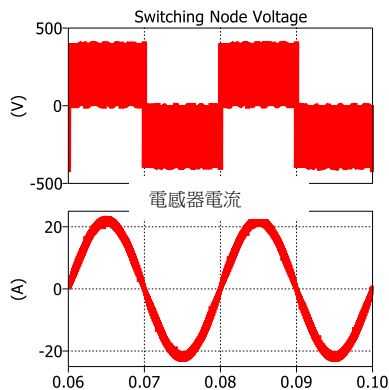
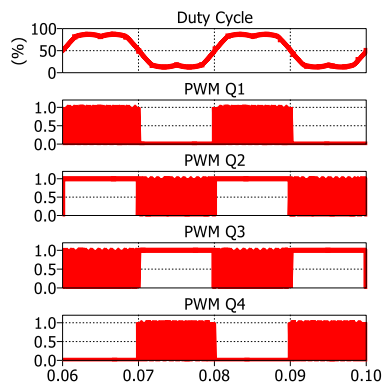
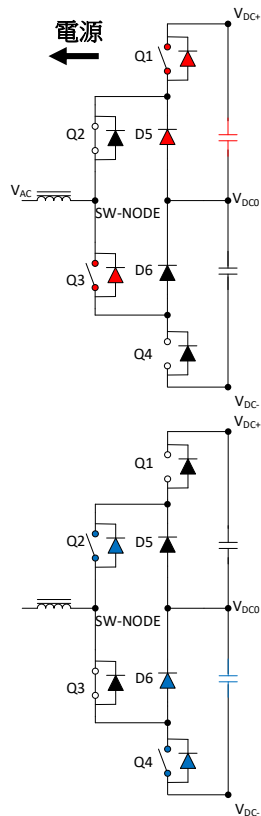
- 同樣的， $f_{HF-RIPPLE}$  定義濾波元件的尺寸

所有開關都可以是  $1/2 V_{DC}$  ( $V_{DC} = 800 V$  時，則額定電壓為  $600 V$ )

Q2 和 Q3 會於  $f_{AC}$  (50 或 60 Hz) 切換

重要關機排序 – 電壓平衡至  $1/2 V_{DC}$

# 3L NPC : 基本操作原理 (逆變器)



對於正弦波 ( $V_{DC0} \leq V_{AC} \leq V_{DC+}$ ) :

- Q2 會永久處於開啟狀態；Q4 會處於關閉狀態
- 以紅色顯示的 Q1 正在切換  $f_{PWM}$

對於負正弦波 ( $V_{DC-} \leq V_{AC} \leq V_{DC0}$ ) :

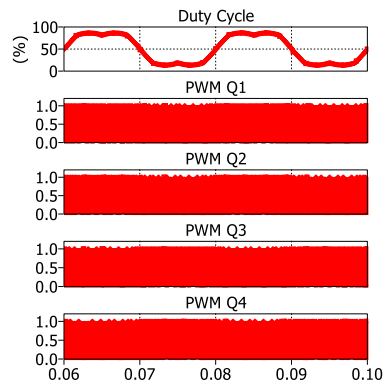
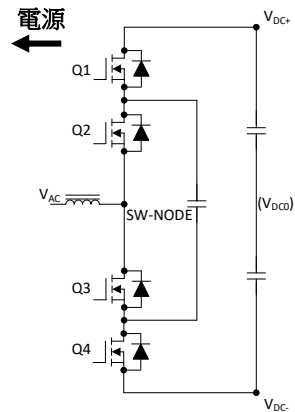
- Q3 會永久處於開啟狀態；Q1 會處於關閉狀態
- 以藍色顯示的 Q4 會切換  $f_{PWM}$

若輸出漣波頻率  $f_{HF-RIPPLE}$  等於  $f_{PWM}$  :

所有開關都可以是  $1/2 V_{DC}$  ( $V_{DC} = 800 V$  時，則額定電壓為  $600 V$ )

重要關機排序 - 電壓平衡至  $1/2 V_{DC}$

# FC3L：基本操作原理 (逆變器)



所有 FET 正在切換  $f_{PWM}$

成對的 Q1 和 Q4，以及 Q2 和 Q3 彼此互補

對於正弦波 ( $V_{DC0} \leq V_{AC} \leq V_{DC+}$ )：

- 在 +峰值時，Q1 和 Q4 以及 Q2 和 Q3 彼此呈 180 度的相位轉移，且 Q1 和 Q2 比 Q3 和 Q4 更常處於開啟狀態

對於負正弦波 ( $V_{DC-} \leq V_{AC} \leq V_{DC0}$ )：

- 在 -峰值時，Q1 和 Q4 以及 Q2 和 Q3 彼此呈 180 度的相位轉移，且 Q1 和 Q2 比 Q3 和 Q4 更常處於關閉狀態

於零交點：

- Q1 和 Q4 以及 Q2 和 Q3 的工作週期分別為 50%

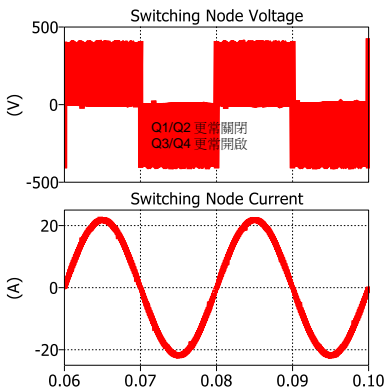
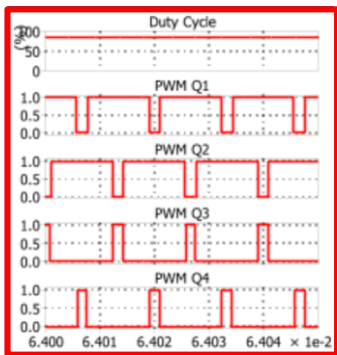
若輸出漣波頻率  $f_{HF-RIPPLE}$  等於  $2 \times f_{PWM}$ ：

- 定義尺寸較小的濾波元件 (磁性或電容)

所有開關都可以是  $1/2 V_{DC}$  ( $V_{DC} = 800 V$  時，則額定電壓為 600 V)

一開始就將飛馳電容器充電至  $1/2 V_{DC}$  乃是關鍵

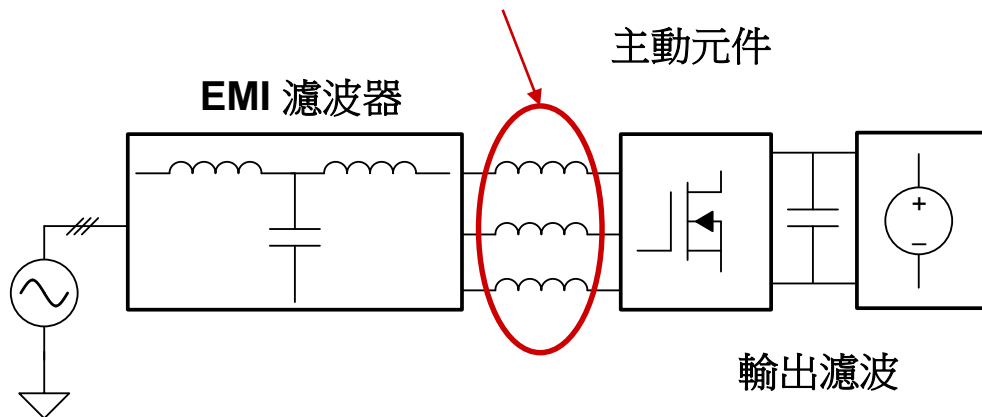
重要關機排序 – 電壓平衡至  $1/2 V_{DC}$



# 比較概覽

- 設計三階轉換器時，應考量：
  - 輸入濾波
  - 輸出濾波
  - 主動元件選擇
  - 控制
  - 驅動程序
  - 量測
- 轉換器尺寸、效率與成本大致取決於：
  - **主動元件與冷卻**
  - **輸出濾波 (電容器)**
  - **輸入濾波 (EMI 濾波)**

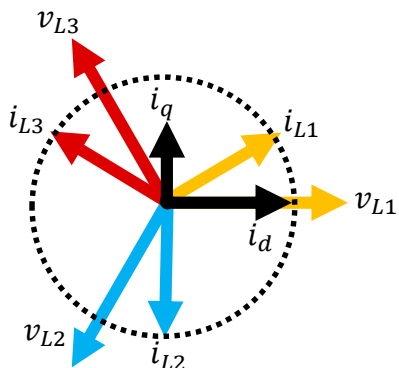
使用三階轉換器時，所需電感減半



- 對 **11-kVA** 系統進行的研究
- 允許功率損耗上限為 **130 W**

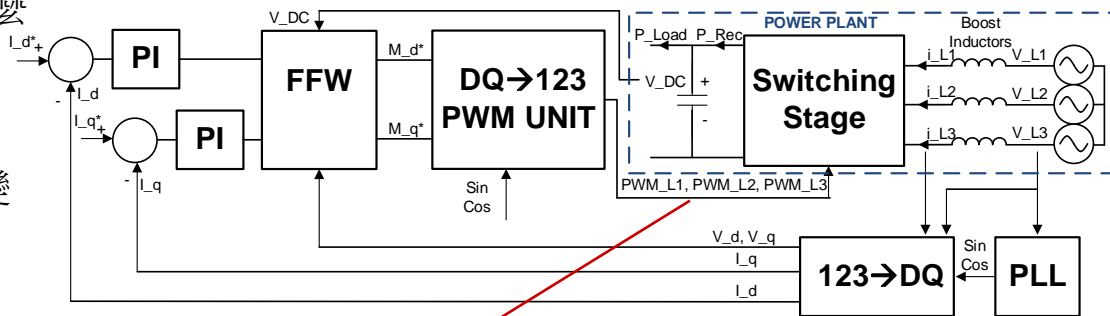
# 功率損耗比較：使用方法

- 三相轉換器可以作為 PFC 或逆變器來運作
- 作為 PFC 或逆變器運作時，損耗有什麼差別？
- 功率損耗怎麼分散到各元件的？
- 目標逆變器 11 kW：保持電流振幅不變，並變更角度

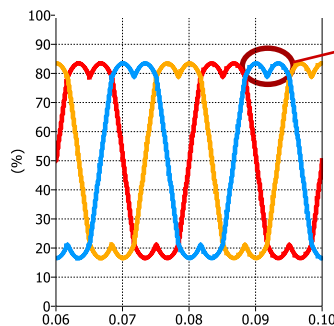


DC 鏈路電壓量測

電流與電壓電網量測



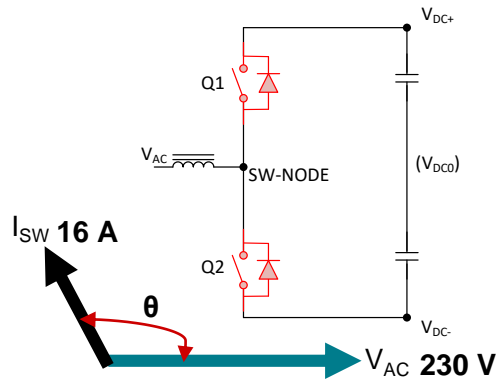
應用於切換階段的工作週期



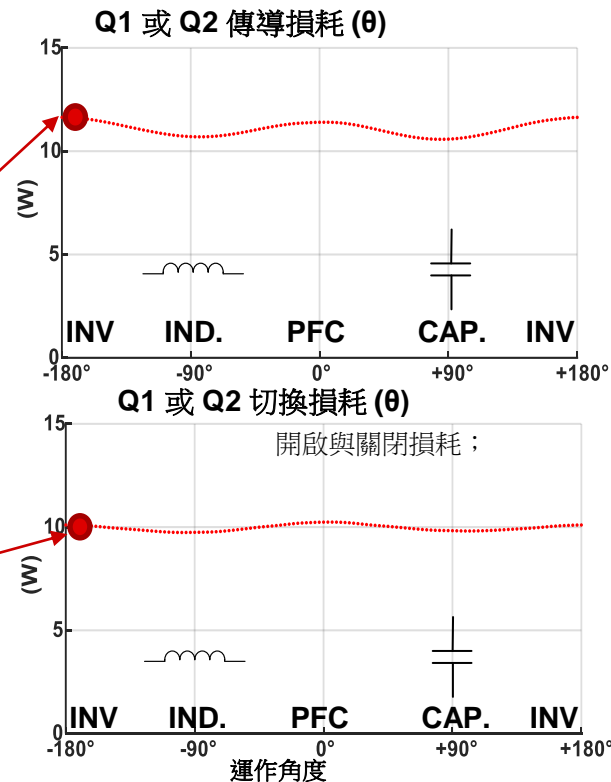
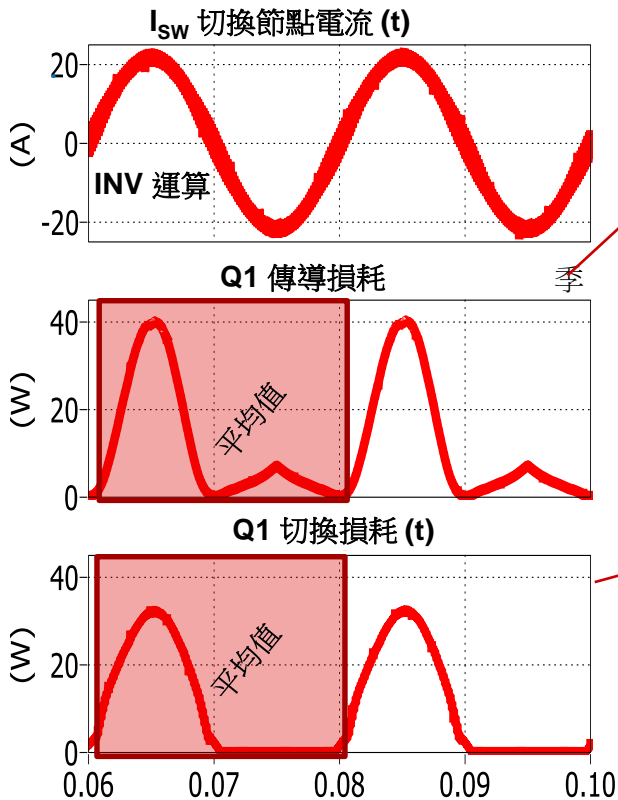
由於空間向量調變引入的三次諧波，因此形狀不是正弦

DC 電動車充電應用中電流感測的設計考量

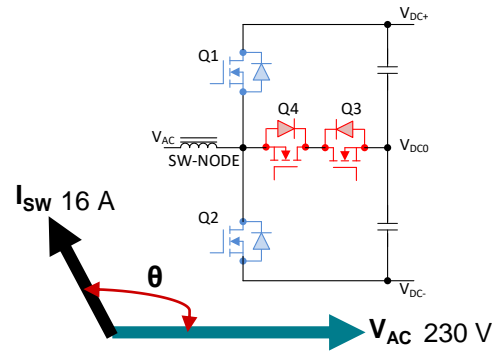
# 功率損耗比較：二階轉換器



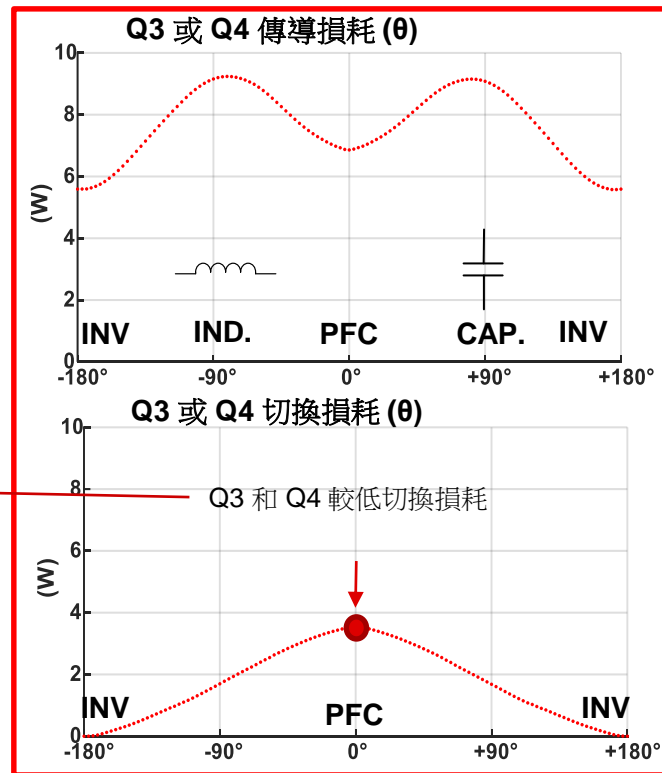
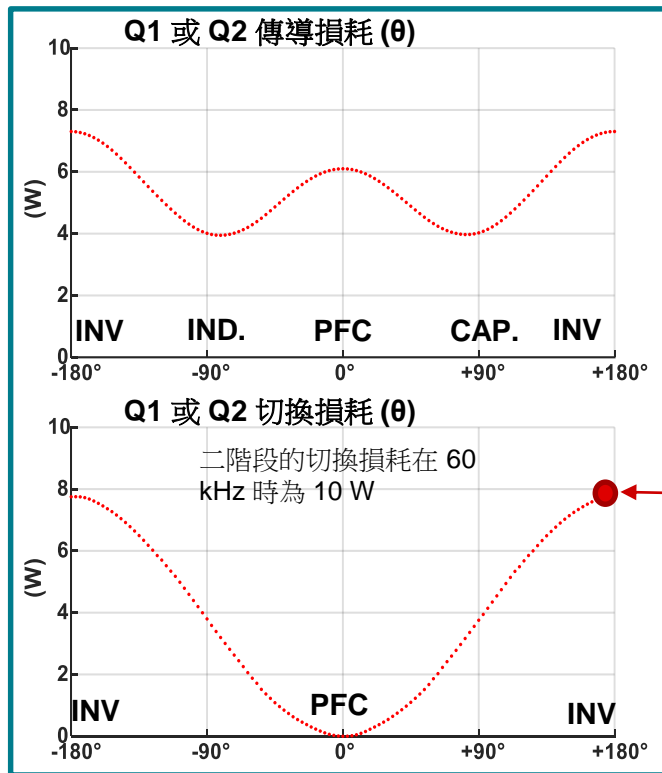
- 雙向 (11 kVA)
- 75 mΩ、1.2 kV，碳化矽 (SiC)
- 傳導及切換損耗是外推的
- 半週期期間的切換損耗為空
- 角度函數的損耗沒有改變
- 總損耗：60 kHz 時為 130 W



# 功率損耗比較：T 型

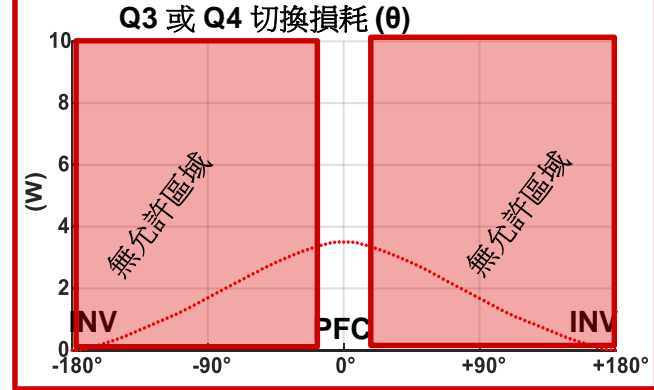
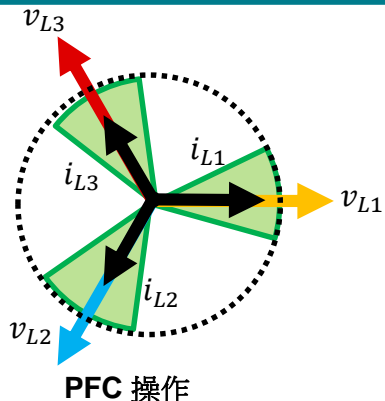
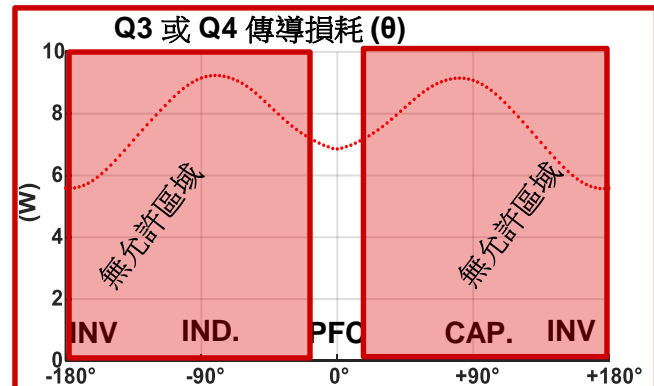
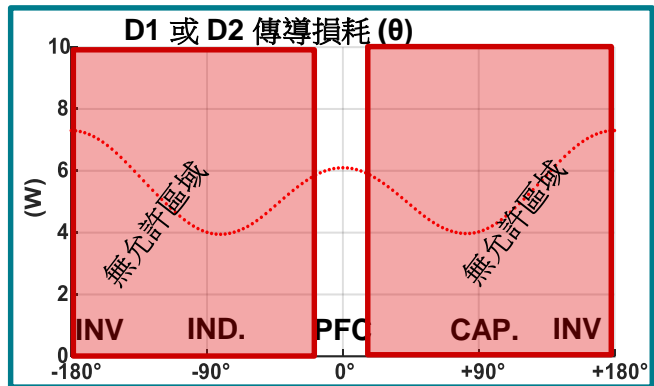
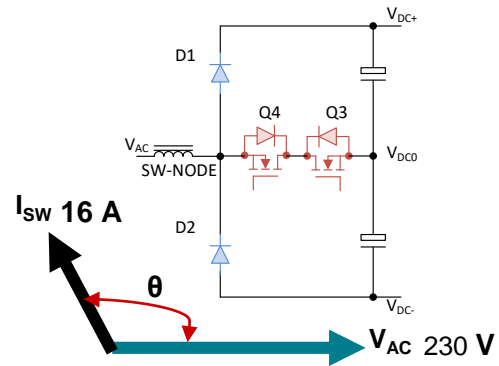


- 雙向 (11 kVA)
- 75 mΩ、1.2 kV，SiC
- 60 mΩ、650 V，SiC
- Q1 和 Q2 在 0 度時沒有切換損耗
- Q3 和 Q4 在 ±180 度時沒有切換損耗
- 總損耗：100 kHz 時為 130 W



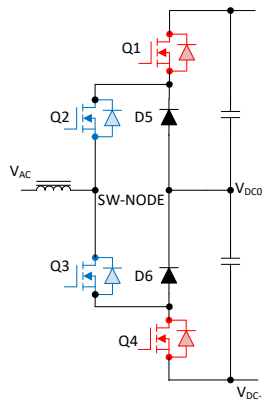


# 功率損耗比較：Vienna 整流器

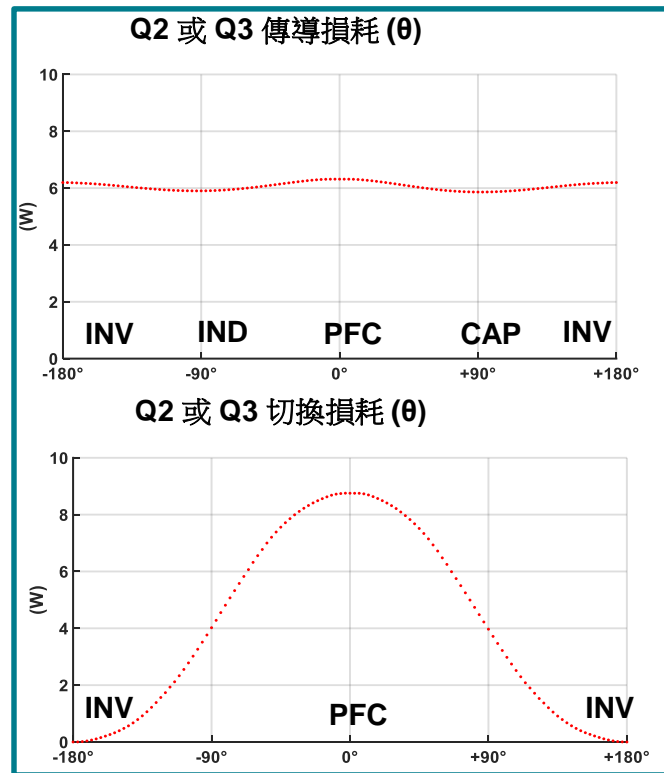
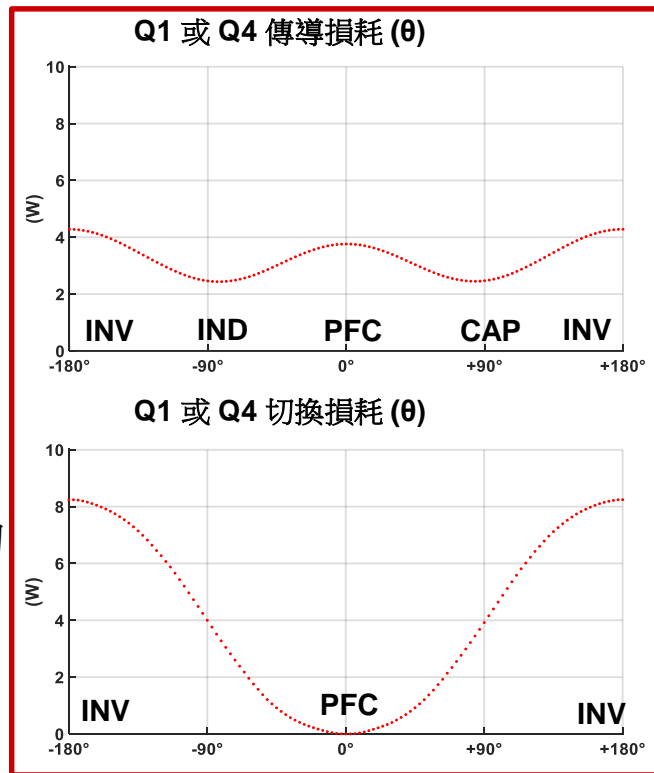


- 單相 (11 kVA)
- 蕭特基絕緣層二極體，30 A、1.2 kV，SiC
- 60 mΩ、650 V，SiC
- Q3 和 Q4 必有切換損耗
- 轉換器運作限制角度為  $\pm 30$  度
- 總損耗：95 kHz 時為 130 W

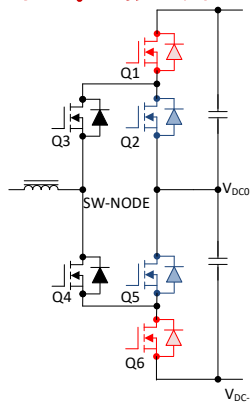
# 功率損耗比較：NPC



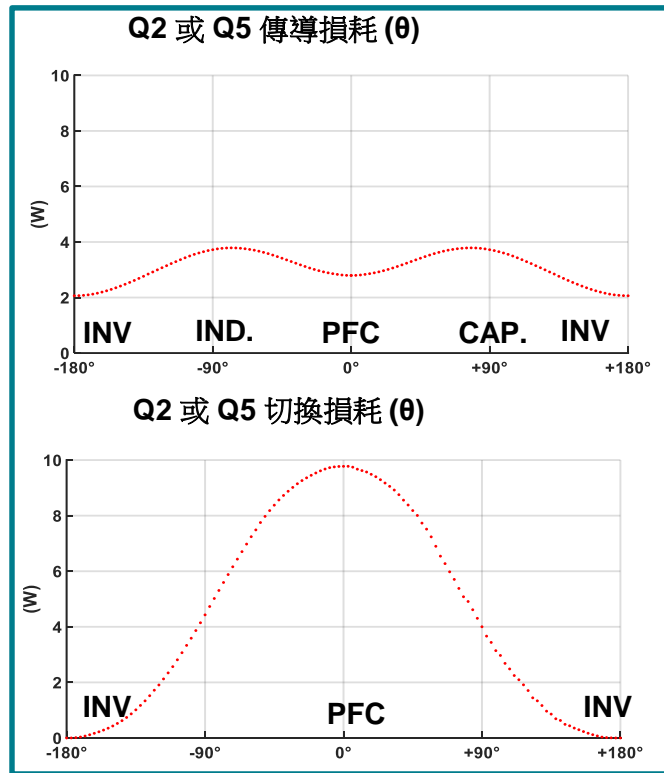
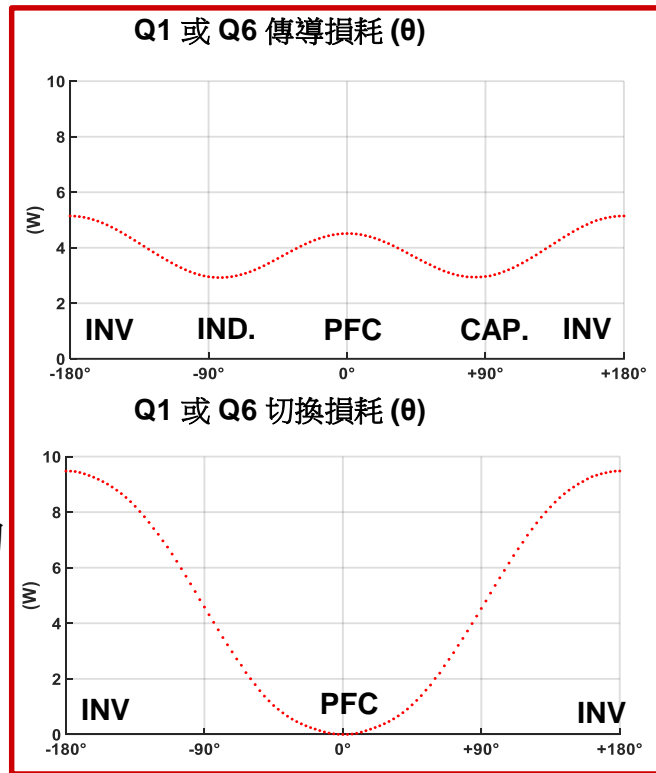
- 雙向 (11 kVA)
- SBD, 30 A、650 V, SiC
- 35 mΩ、650 V, SiC
- Q1 和 Q4 在 0 度時沒有切  
換損耗
- Q2 和 Q3 在 ±180 度時沒  
有切換損耗
- 總損耗：98 kHz 時為 130  
W



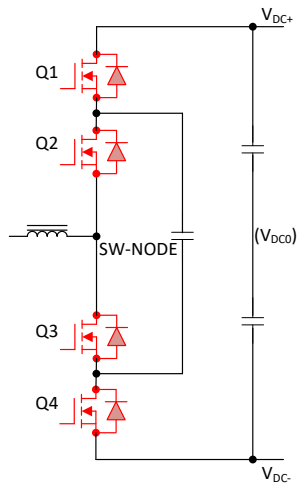
# 功率損耗比較：ANPC PWM 1



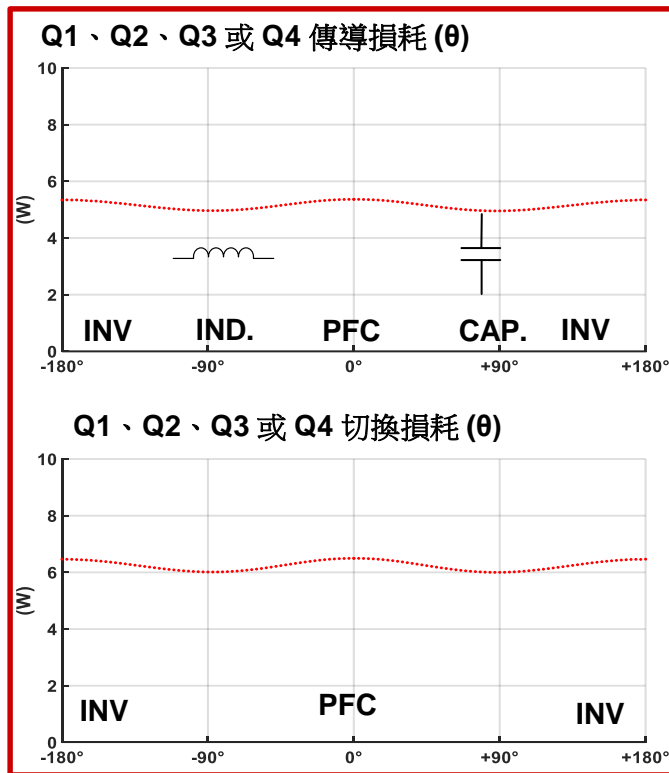
- 雙向 (11 kVA)
- 35 mΩ、650 V，SiC
- 35 mΩ、650 V，矽
- Q1 和 Q4 在 0 度時沒有切換損耗
- Q5 和 Q6 在 ±180 度時沒有切換損耗
- 總損耗：108 kHz 時為 130 W



# 功率損耗比較：飛馳電容器

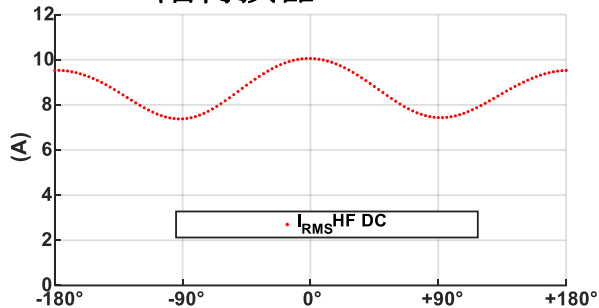


- 雙向 (11 kVA)
- 35 mΩ、600 V，SiC
- 傳導與切換損耗，通常是角度函數的常數
- 一般而言，由於採用雙頻輸出，這種拓撲的效率更高
- 總損耗：69 kHz 時為 130 W

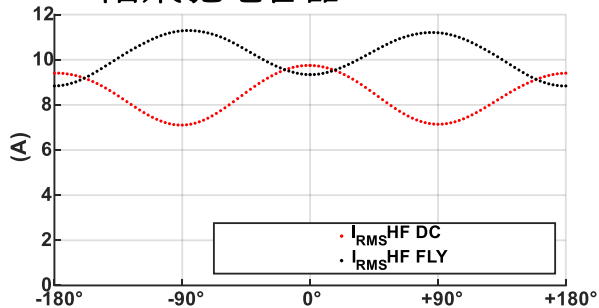


# 三相 AC/DC 中的電流漣波比較

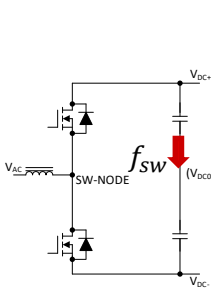
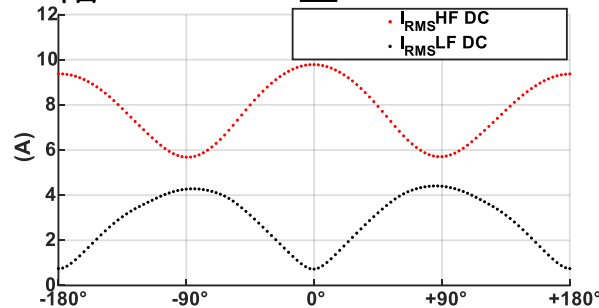
## 二階轉換器



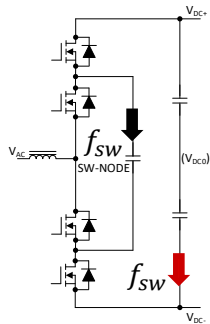
## 三階飛馳電容器



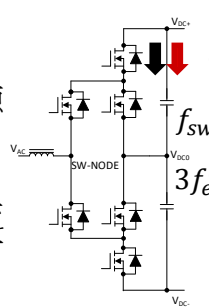
## 三階 ANPC, T 型, NPC



- 電網對稱時，來自三相 AC 電流的直流電不會引起電源漣波
- 電解電容器的最低數量
- 薄膜電容器能篩選漣波電流



- 電網對稱時，來自三相 AC 電流的直流電不會引起電源漣波
- 不需要電解電容器
- 薄膜電容器能篩選漣波電流
- 飛馳電容器僅在切換頻率下出現

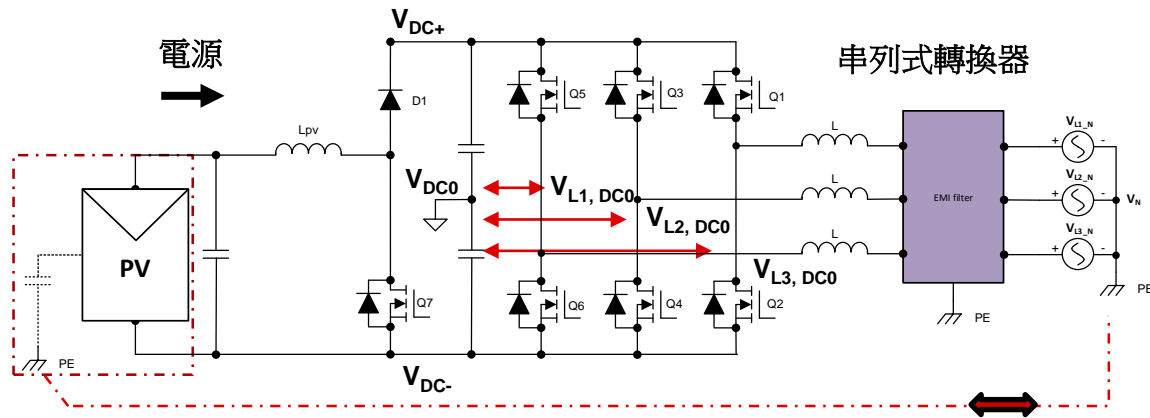


- 電容器半週期充電與放電引起的低頻電源漣波
- 無效功率需要的電解電容器
- 薄膜電容器能篩選漣波電流

# 共模雜訊比較：簡介

視用途而定，共模電壓有可能具備關鍵地位：

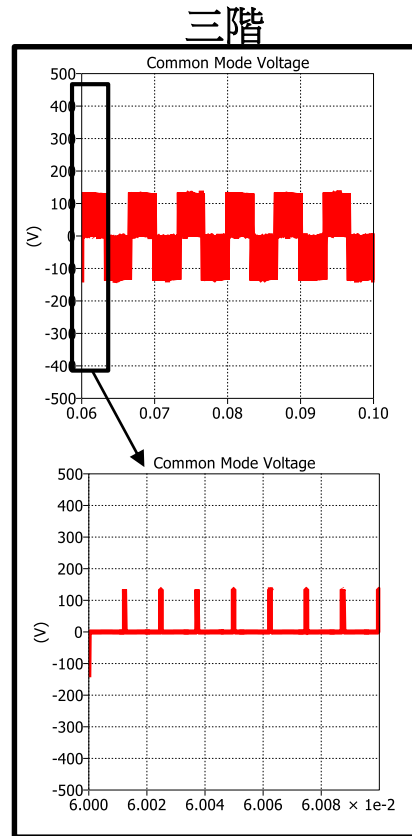
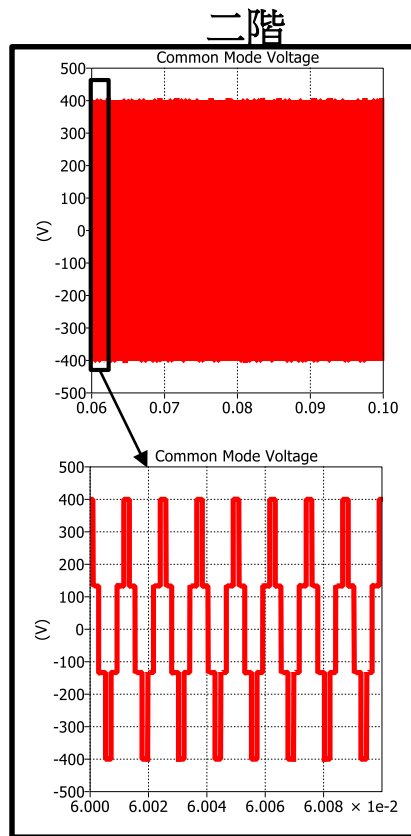
- 面板會有暴露於地表的升起表面
- 下雨時，光電 (PV) 面板的寄生電容可能高達 200 nF/kWp (安裝的千瓦功率峰值)
- 三相逆變器切換時，會產生共模電壓，共模電壓會產生寄生電流
- 可能發生安全狀況，且有可能意外觸發其餘電流偵測器的問題



$$V_{CM} = (V_{L1, DC0} + V_{L2, DC0} + V_{L3, DC0}) / 3$$

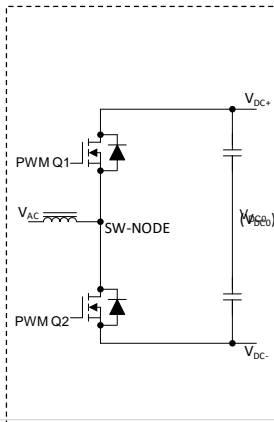
# 共模雜訊比較：結果

- 在第一次近似估算中，三階轉換器 (Vienna、T 型、ANPC、NPC) 全程呈現相同的共模雜訊
- 二階施加的峰值共模電壓是三階的三倍。在  $800 V_{DC}$  時：
  - 二階的 AC/DC，峰值 400-V
  - 三階的 AC/DC，峰值 400-V/3
- 二階施加的 RMS 共模電壓是三階的三倍。在  $800 V_{DC}$  時：
  - 二階的 AC/DC， $310 V_{RMS}$
  - 三階的 AC/DC， $74 V_{RMS}$
- PV 應用的二階轉換器中的 EMI 濾波器需要顯著衰減效果

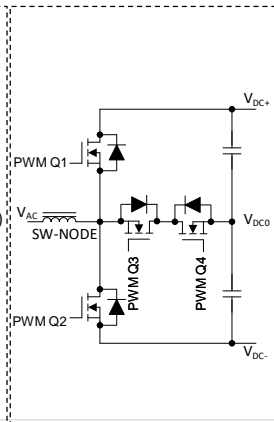


# 物料清單比較

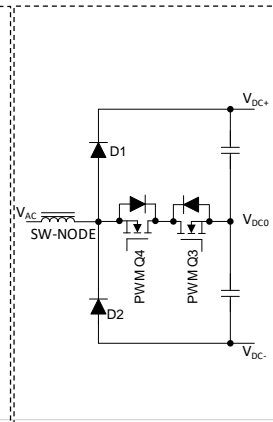
2L 二階轉換器



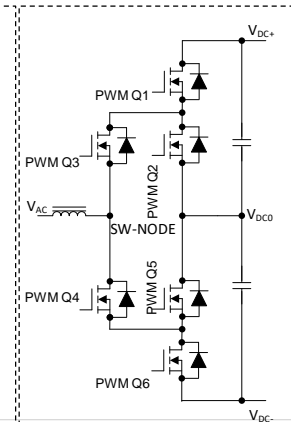
3L 三階 T 型



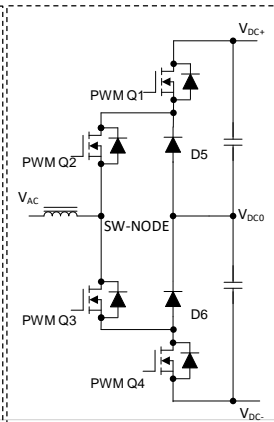
3L Vienna 整流器



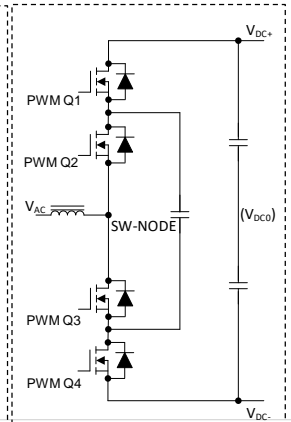
3L ANPC



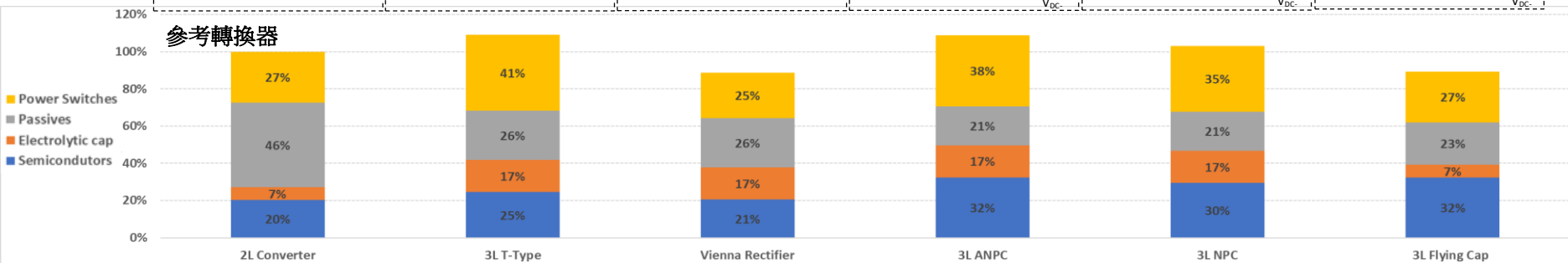
3L NPC



FC3L 飛馳電容器



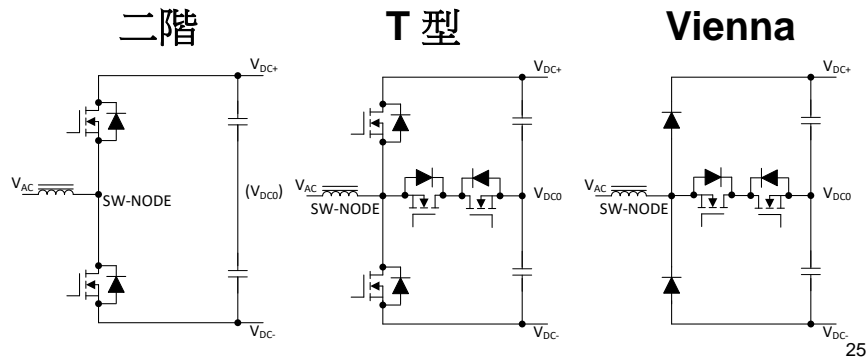
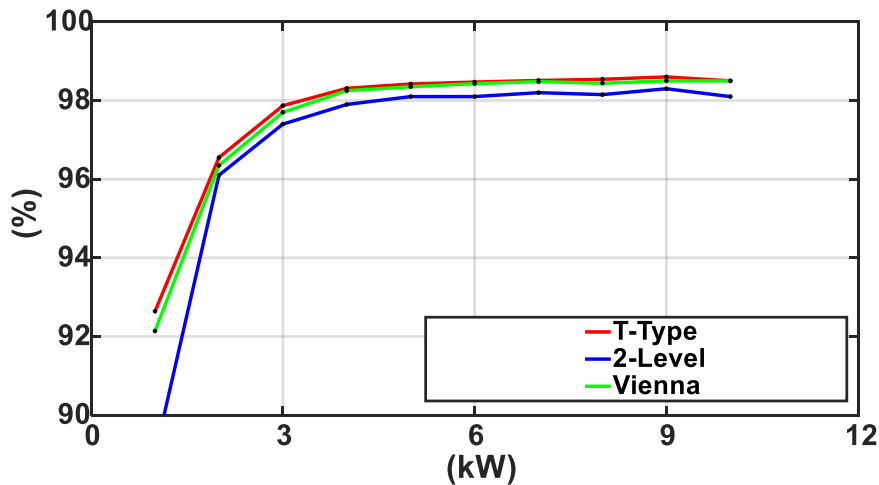
參考轉換器





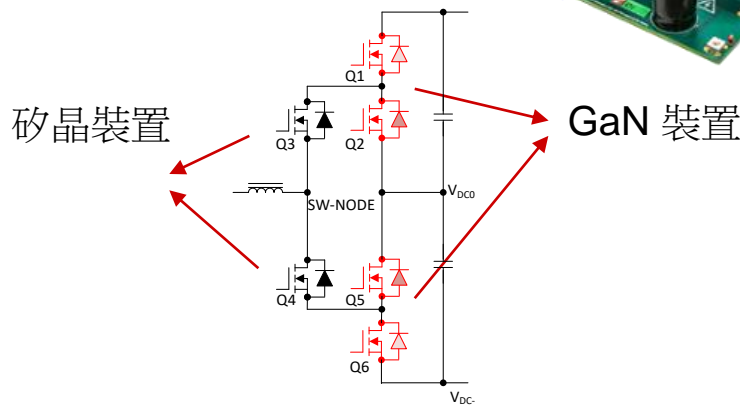
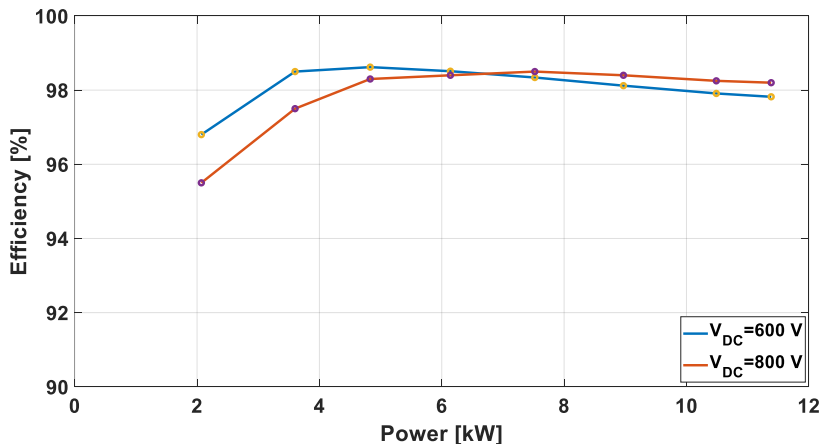
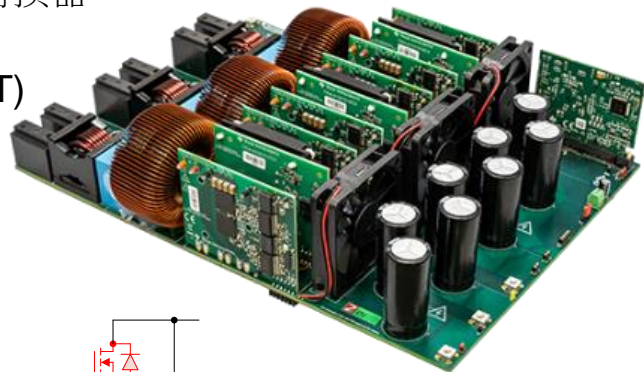
# 實驗結果：TIDA-01606

- 10-kW 的雙向三相三階 (T 型) 逆變器與 PFC 參考設計包括了一組 11-kW 轉換器，該轉換器為 SiC 裝置 (50 kHz)：
  - 作為 650 V 60 mΩ (SiC) 與 1200 V 75 mΩ (SiC) 的 T 型操作時
  - 作為 1200 V 75 mΩ (SiC) 的二階轉換器操作時
  - 作為 1200 V 40 A SBD (SiC) 與 650 V 60 mΩ (SiC) 的 Vienna 整流器操作時



# 實驗結果：TIDA-010210

- 根據 GaN 參考設計的 11-kW 的雙向三相 ANPC 包括一個 11-kW 的轉換器，該轉換器為 GaN 裝置 (100 kHz)：
  - 低頻 40 mΩ、600 V 矽超接面金屬氧化物場效應電晶體 (MOSFET)
  - 高頻 30-mΩ、600-V GaN
- 在較高的 DC 鏈路電壓與低負載下，效率較低
- 在較高的 DC 鏈路電壓與高負載下，效率較高



# 結論

- 多階拓撲：
  - 較小的被動元件促成了三階逆變器比二階逆變器**減少 50% 尺寸**
  - 多階拓撲協助 FET **大幅降低了切換與傳導損耗**，使用具備相同直流匯流排電壓一半阻斷電壓的 FET，藉此提升效率
  - 三階拓撲將切換電壓保持在二階逆變器的一半，進而**減少整體 EMI**



© Copyright 2024 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved.

This material is provided strictly “as-is,” for informational purposes only, and without any warranty.  
Use of this material is subject to TI’s **Terms of Use**, viewable at [TI.com](https://www.ti.com)

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated