

台灣光子源之增能環磁鐵電源簡介： 從技術到挑戰

王寶勝

國家同步輻射研究中心電源小組

在台灣光子源 (TPS) 加速器中，電子在增能環加速到 30 億電子伏特 (GeV)，最後注入儲存環以產生同步輻射光提供用戶實驗。在增能的過程中，增能環交流磁鐵電源 (簡稱：磁鐵電源) 需要連續調整輸出，整個磁鐵電源系統由一台大功率二極磁鐵電源和四台四極磁鐵電源所組成。這些電源要一起合作，讓電子在增能時，不論是幾何與能量空間裡都可以被穩定控制。就像合奏的樂團一樣，不能有任何一個人走音，否則整個增能過程就會出錯。

磁鐵電源的組成與工作

磁鐵電源的主要目的是產生一種會上下變化的電流 (即「Ramping」)，這個電流每秒會變化 3 次，也就是「3 Hz」的頻率。就像盪鞦韆一樣，每次推一下，將電子的能量隨著增能環以正弦脈動方式加速，最後就能達到預定的 3 GeV 能量。

- **二極磁鐵電源**：負責 60 組偏轉電子用的磁鐵，需要高達 $\pm 1600 \text{ V}/1200 \text{ A}$ 的電流。
- **四極磁鐵電源**：聚焦與散焦電子束磁鐵，規格是 $\pm 425 \text{ V}/150 \text{ A}$ 。

如圖一所示 [1]，磁鐵電流的產生是透過電力技術，將三相交流電源轉換成直流，再透過變流器輸出電流至負載，並透過網路來進行同步時序控制。

安裝過程的挑戰與創意解法

當磁鐵電源安裝到 TPS 增能環時，我們遇到困難與解決的方式：

• 電纜會產生干擾磁場

因磁鐵電源在 Ramping 時，電纜會產生交變磁場，對於鄰近電子儀器是嚴重的干擾源，為了減少電源電纜所引起的磁場，採用了「來回交錯式」的三去三回環場配線方式 [2]，讓來回電流產生的磁場互相抵消，如圖二右下說明。

• 低頻噪音

磁鐵電源運作時會產生低頻的嗡嗡聲 (約 1 kHz)，高達 84 分貝 (如捷運站邊)，透過隔音間設計可以把噪音降到 54 分貝 (如圖書館裡)，讓實驗站的工作環境舒服許多。

試車時遇到的技術問題

在 2014 年試車磁鐵電源時，系統並沒有如預期順利，主要有兩個問題：

• 等效寄生電容效應，造成雜訊

磁鐵電源先天存在的雜訊電流，可藉由磁鐵電源裡的電容設計來引導離開負載。但是當電路系統中的負載過高 (例如磁鐵環場接線過長，來回約 1000 公尺)，將導致等效寄生電容效應。負載端因有等效電容，將使得原本磁鐵電源裡的電容失效，雜訊電流便會存在於磁鐵與整個電路系統中。如圖二所示，雜訊電流會由藍色路線從地線回到磁鐵電源。

• 控制卡沒辦法同步

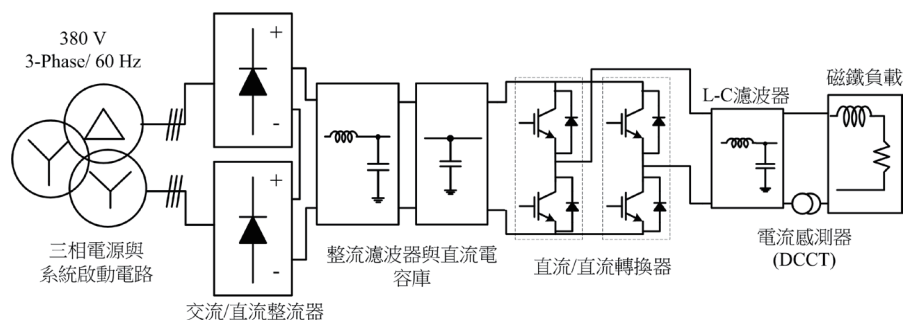
因初始磁鐵電源的控制卡並沒有額外同步功能，導致四台四極電源和二極電源的輸出電流對不上拍，進而影響整體的電流波形追蹤品質。

解決方法：用 Y 型濾波器與類比控制卡

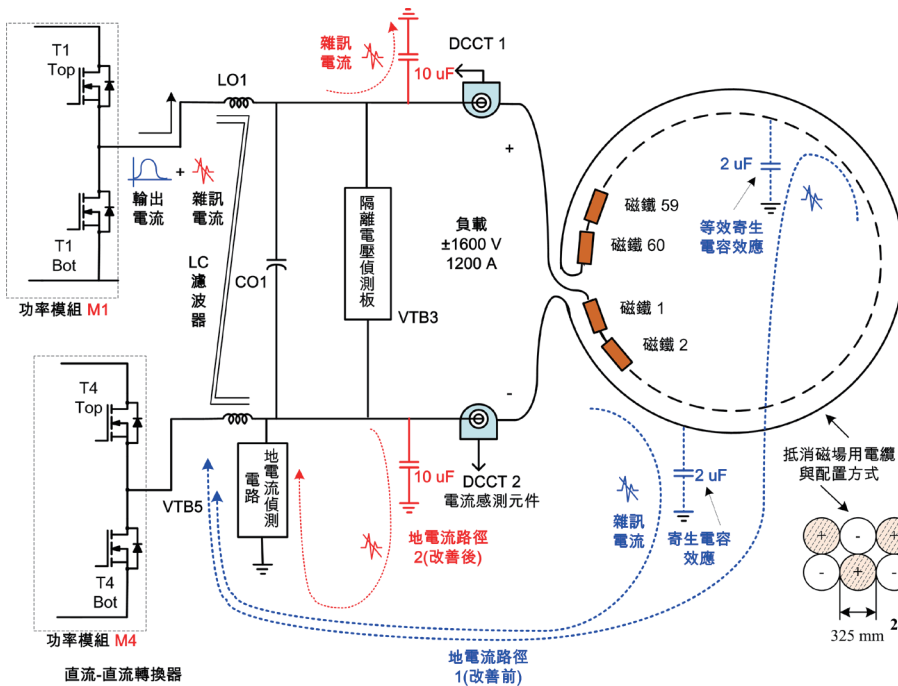
為了解決這些問題，我們進行了以下改良：

1. 加裝 Y 型濾波器

然而雜訊電流並不會消失，但它可被吸收或是被引導到大地去。我們選擇加裝 Y 型濾波器如圖二的紅色路



圖一 軟磁鐵電源架構圖。



線，提前讓雜訊電流被吸引，雜訊電流就不會走寄生電容的路徑回到磁鐵電源系統中，負載端就不會看到雜訊電流。改善前後的電流雜訊，由從原來的 80 mA 減少到 4.3 mA，有明顯的改善。

2. 更換成類比控制卡

原本的數位控制卡，精密但缺少即時調整與同步能力。後來改用「高精度類比差動訊號調變卡」，即時修正各磁鐵電源的電流輸出，減少電流波形失真與同步工作，提升磁鐵電流的重現與操控能力 [3]。

圖二 二極磁鐵電源寄生電容效應的雜訊電流路徑圖。

穩定運作與節能

經過一番努力後，各磁鐵電源可穩定地實現 3 Hz 的電流波形（如圖三所示），意味著把電子束能量從 150 MeV 提升到 3 GeV 的過程。透過精準的時序與儀器控制，可將電子束由增能環注射至儲存環內。

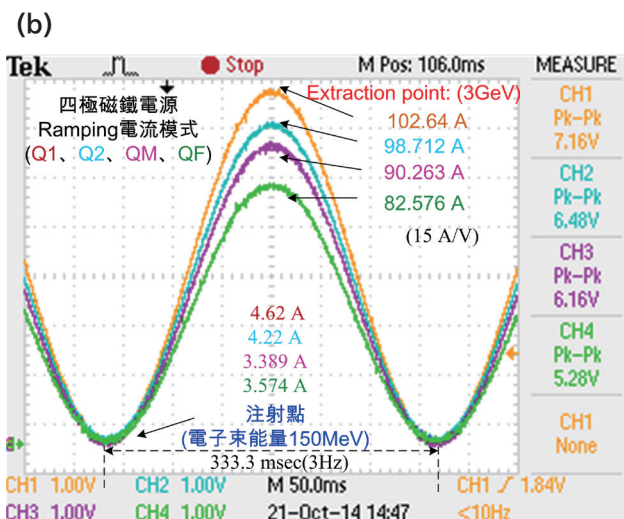
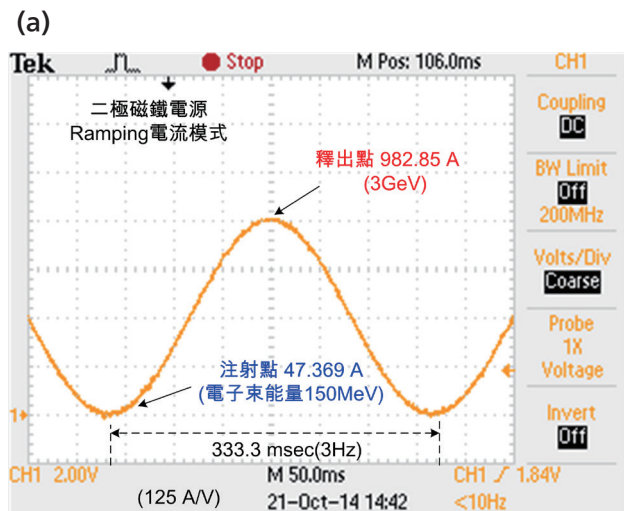
另外，從 2019 年開始，TPS 更進一步導入「節能模式」，每 5 分鐘才啟動一次磁鐵電源的 Ramping，這樣不但省電，也減少設備負擔，幫助整個設施長期穩定運作。

未來發展趨勢

從磁鐵電源的安裝、試車、遇到問題、逐步改善與優化，整個過程雖然困難，但也體現了解決的能力，這是一個好的過程與經驗累積。在未來加速器磁鐵電源的發展，受惠於控制器與半導體材料的進步，對於磁鐵電源的頻寬與電流解析度會有大幅提升，材料進化如 GaN（氮化鎵）、SiC（碳化矽）應用的成熟，縮小電源的體積與降低損失，有助於磁鐵電源頻寬與效能提升，是未來磁鐵電源發展上的方向。

參考文獻：

1. K. B. Liu *et al.*, IPAC, WEPD075, 3275 (2010).
2. C.-Y. Liu *et al.*, IPAC, THPMW016, 3573 (2016).
3. Y.-C. Chien *et al.*, IPAC, WEPHA040, 3203 (2015).



圖三 磁鐵電源在 Ramping 電流模式下波形：(a) 二極、(b) 四極。