

別讓回饋迴路失效系列 2-2 :

別讓回饋迴路失效 動態回應和隔離技術創新！

■作者：Hermogenes Escala / ADI 應用工程師

本系列文章的第二部分以脈寬調變 (PWM) 控制器與並聯穩壓器為參考元件，研究隔離式順向轉換器中回饋電路的動態特性。文章重點分析回饋迴路對瞬態負載條件的回應及其在維持輸出電壓穩定方面的作用。透過 LTspice 模擬發現，光耦合器的偏置狀態與電流傳輸比 (CTR) 對回饋訊號傳輸的精度和速度具有關鍵影響。本文強調，在高效功率轉換系統中，精心選擇元件與設計補償網路是實現可靠閉迴路調節的關鍵所在。此外，文章並將介紹 iCoupler 技術 (傳統光耦合器的最新替代方案)，闡述這項技術在性能、整合度與可靠性方面的優勢。

引言

在隔離式電源系統中，要實現可靠運行，就必須在負載條件變化時維持穩定的輸出電壓。回饋電路在該調節過程中產生關鍵作用，其能根據即時輸出電壓偏差，動態調整向一次側脈寬調變 (PWM) 模組傳輸的控制訊號。本節將深入探討此類回饋機制的特性，重點圍繞 LT3753 主動箝位順向轉換器、LT1431 並聯穩壓器及光耦合器展開分析。

LT3753 專為高效隔離式順向轉換器應用設計，具備主動箝位控制、同步整流、可程式化伏秒箝位等特性。此款元件與 LT1431 精密並

聯穩壓器、光耦合器配合使用時，可構成穩健的回饋迴路，以快速回應瞬態負載事件。

本文透過 LTspice 模擬，分析回饋電路對突發負載階躍的回應情況。文章著重強調，光耦合器的性能 (尤其是其電流傳輸比 (CTR) 與偏置狀態) 對回饋訊號的建構及工作週期的有效調變具有決定性意義。理解這些動態特性，對設計可在寬廣工作條件範圍內持續輸出穩定性能的電源產生決定性作用。

回饋電路的動態特性

為維持穩定的輸出電壓，回饋迴路必須對負載條件的變化做出動態回應。當輸出電壓下降時 (通常由負載電流突然增大導致)，並聯穩壓器會檢測到此一偏差並減小其陰極電流。此動作會降低流經光耦合器發光二極體 (LED) 的電流，進而減少光輸出量。一次側光電電晶體接收的光訊號減少，其集電極電流也隨之降低。這會使 PWM 控制器補償 (COMP) 接腳的電壓升高，向控制器發出訊號，促使其增大開關 MOSFET 或電晶體的工作週期。工作週期增大後，會向輸出端傳輸更多能量，促進輸出電壓恢復至額定值。

相反的，當輸出電壓升高時 (例如負載突然減小)，回饋機制會啟動回應以防止過沖。並聯穩壓器檢測到電壓上升後，會增大流經光耦

合器 LED 的正向電流，使光輸出量增加。增強的光訊號會使光電電晶體的導通程度提高，進而拉低 COMP 接腳的電壓。PWM 控制器將此電壓下降解讀為減小工作週期的訊號，進而降低向輸出端傳輸的能量。此一校正動作有助於快速抵消電壓尖峰，維持輸出電壓的穩定調節。

這種動態調節的有效與否，取決於光耦合器能否將 LED 電流變化迅速地線性轉化為光電電晶體的成比例回應。理想狀態下，LED 電流波形應呈現與負載階躍同步的急劇變化，而光電電晶體電流則需跟隨這些變化，其延遲時間與幅值由 CTR 及光耦合器的內部回應時間決定。如果光耦合器回應緩慢或 CTR 較低，回饋訊號可能會出現滯後或衰減，導致瞬態響應變差，表現為過沖、下沖或穩定時間延長。

此外，如果 LED 電流過低，光電電晶體可能無法充分導通；而電流過高則可能使元件進入非線性工作區域。這兩種情況都會扭曲回饋訊號，不僅影響調節效果，還可能導致控制迴路失穩。因此，若要確保電源在全負載與全輸

入電壓瞬變範圍內持續穩定工作，就必須精心設定光耦合器偏置，並合理設計補償網路。

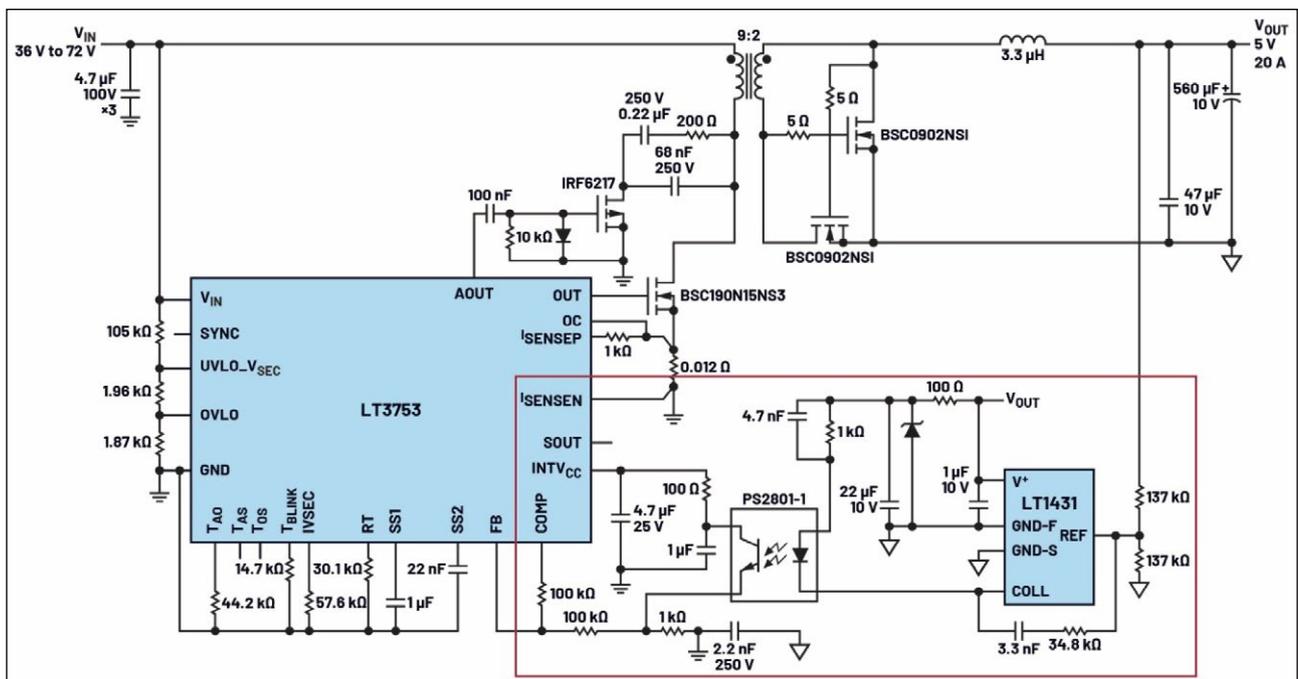
LT3753 隔離式順向轉換器的瞬態負載回應分析

LT3753 是一款高性能電流模式 PWM 控制器，可支援 8.5V 至 100V 的寬廣輸入電壓範圍，適用於電信、工業電源系統及汽車電子等需要隔離式高效功率轉換的應用場景。

LT3753 的核心特性之一是主動箝位控制，其可高效回收變壓器漏感能量，降低一次側開關 MOSFET 的電壓應力，有助於提高密度電源設計的效率與可靠性。此外，LT3753 還支援同步整流，能為二次側 MOSFET 提供控制訊號，以最小化導通損耗，提升整體功率轉換效率。

LT3753 內建可程式化伏秒箝位功能，允許工作週期超過 50%，進而提高變壓器利用率並支援更高的輸出功率。LT3753 的開關頻率範圍為 100kHz 至 500kHz，且可與外部時脈同步，

圖 1：隔離式順向轉換器中並聯穩壓器與光耦合器的連接方式。



以便進行雜訊管理與系統協同。其他特性還包括可程式化軟啟動、打嗝模式短路保護、具有滯回的欠壓保護 (UVLO)/ 過壓保護 (OVLO) 閾值，可實現穩健的故障處理。

LT1431 也是本模擬示例設計的一部分，其是一款精密可調並聯穩壓器，內建最高 5V 的基準電壓，可實現輸出電壓控制。LT1431 具備高精度 (初始容差 0.4%)、低輸出阻抗及快速回應的特點，非常適合用於電源中的電壓調節與回饋控制。LT1431 的灌電流能力可達 100mA，可有效驅動隔離系統中的光耦合器。

基於圖 1 中並聯穩壓器與光耦合器的電路連接方式，以下將分析 LT3753/LT1431 示範電路 (用於乙太網路供電 (PoE) 的 80W 主動箝位非同步順向轉換器) 在瞬態負載下的 LTspice 模擬結果。

如圖 2 所示，當輸出電流從 0A 突然階躍至 1.5A (即遭遇瞬態負載) 時，電源會呈現動態回應。負載需求的急劇增加會對系統穩態造成暫時性干擾，表現為輸出端出現電壓跌落。產生此一跌落的原因是：系統初始處於空載運行狀態，此時僅需傳輸極少能量即可維持輸出

電壓。因此，磁元件與輸出電容中儲存的能量不足以立即滿足增大的電流需求。

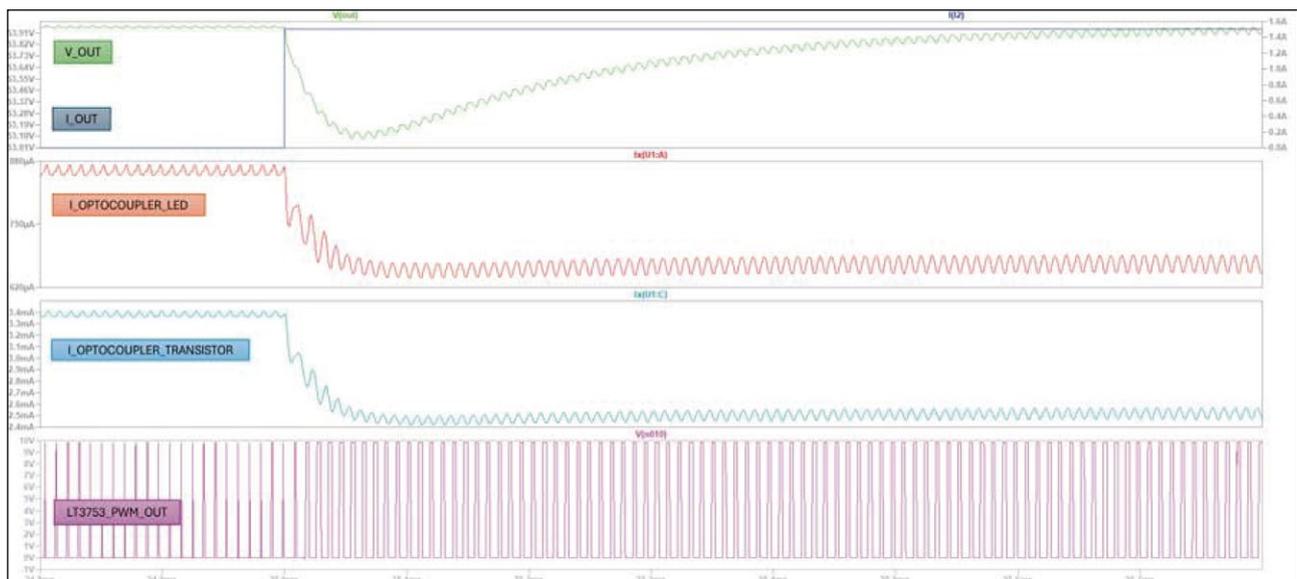
此類瞬態工作狀態會打破穩態運行，觸發系統的回饋控制機制。回饋電路持續監測輸出電壓，並及時檢測輸出電壓與額定值的偏差。一旦檢測到電壓跌落，回饋電路便會生成校正訊號，並將校正訊號傳輸至一次側 PWM 控制器。

PWM 控制器接收到校正訊號後，會動態調整開關波形的工作週期。具體而言，其會增加一次側開關電晶體的導通時間，延長導通週期。此一調整使得每個開關週期內透過變壓器磁耦合的能量增加，而能量傳輸的提升可補償增大的負載電流，促進輸出電壓恢復至穩壓值。

當系統轉換到新的負載工作狀態後，輸出電壓會趨於穩定，體現出有效的閉迴路調節效果。波形分析顯示，光耦合器偏置對維持迴路完整性產生關鍵作用。為實現最佳性能，光耦合器內部的 LED 必須由足夠的正向電流驅動，以確保線性光回應；同時，光電電晶體需工作在主動區，才能精準調變回饋訊號。

偏置不當 (如 LED 側串聯電阻選型錯誤)

圖 2: LT3753 與 LT1431 在暫態負載瞬態下的 LTspice 模擬波形。



會顯著改變 CTR；而 CTR 是衡量 LED 與光電電晶體間訊號耦合效率的關鍵指標。CTR 降低會削弱回饋訊號，導致 PWM 控制器對電壓偏差的回應不足；而 CTR 過高則可能引發過補償，造成系統不穩定。這些影響在瞬態事件中尤為明顯，因為此時系統需快速因應負載突變。偏置不足會導致校正延遲、電壓過沖 / 下沖、迴路頻寬降低。

觀測到的波形進一步顯示，回饋路徑中元件的精準選型與偏置設計是核心關鍵。設計時需仔細考量 LED 正向電壓、CTR 容差、光電電晶體集電極電流及補償網路設計等參數，以確保電源在寬廣工作條件範圍內具備穩健的瞬態響應、穩定的電壓調節能力與可靠的系統性能。在隔離式電源應用中，光耦合器的合理偏置不僅能提升迴路精度，還有助於增強電磁干擾 (EMI) 抗擾度與長期可靠性。

iCoupler 隔離器與光耦合器：隔離技術的範式轉變

如今，開關模式電源 (SMPS) 的設計正日益採用 iCoupler 數位隔離技術，作為傳統光耦合器的較佳替代方案，尤其適用於對高速通訊、

高穩健性及長期性能有要求的應用場景。傳統光耦合器的工作原理是透過 LED 將電訊號轉換為光訊號，再由接收端的光電電晶體檢測光訊號。儘管這種方式已廣泛應用數十載，但存在若干固有的侷限性。其中最顯著的是 LED 老化問題，隨著時間推移，LED 老化會導致訊號完整性下降，進而降低可靠性。

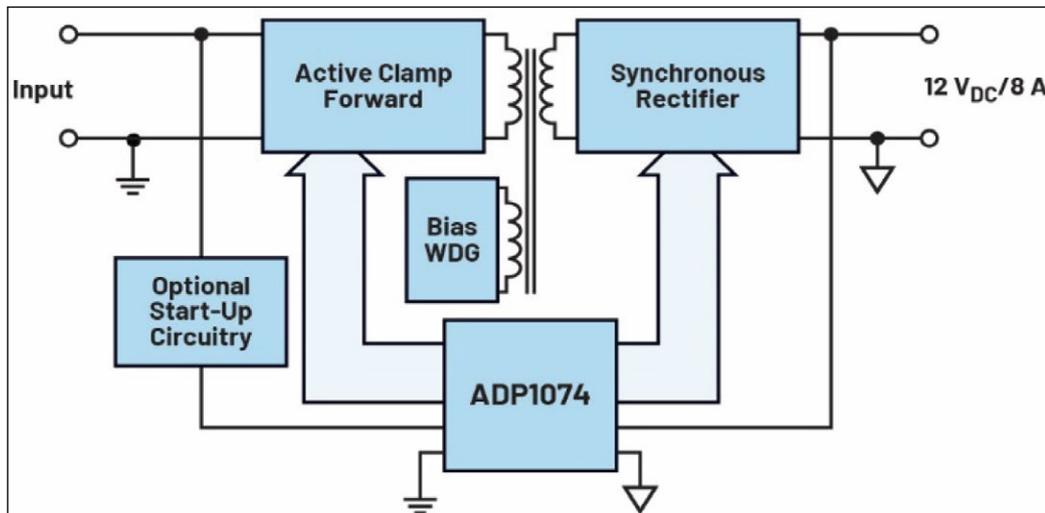
相較之下，由 ADI 開創的 iCoupler 技術，採用透過標準 CMOS 製程製造的晶片級微型變壓器，可實現數位訊號跨隔離屏障傳輸。這種基於變壓器的設計無需光發射與光檢測環節，因此具備更優的溫度穩定性、更低的功耗及更長的使用壽命。不同於光耦合器，iCoupler 元件不受溫度漂移或 LED 損耗的影響，是惡劣環境與關鍵任務系統的理想之選。

從性能角度看，iCoupler 元件支援更高的資料速率，通常超過 100Mbps，因而非常適合 SMPS 架構中的數位控制迴路、遙測系統及高速通訊介面。此外，iCoupler 解決方案常將多隔離通道、DC-DC 轉換器及診斷功能整合到單一封装內，既能節省電路板空間，又能簡化設計複雜度。

儘管光耦合器因其結構簡單、成本低廉的特點，在模擬回饋迴路中仍較為常見，但

在對精度、速度與可靠性要求極高的數位領域，光耦合器正逐漸被其他技術取代。例如，在圖 3 所示方案中，ADP1074 將 iCoupler 隔離功能與同步 PWM 控制器整合一

圖 3：採用 iCoupler 的隔離式順向轉換器。



體，不僅符合安全與法規標準，還具備先進的故障保護功能，為工業、汽車及電信應用中的隔離式 DC-DC 轉換器提供了精巧且高度整合的解決方案。

如今的 SMPS 設計逐漸轉向 iCoupler 技術，此一變化不僅順應了「追求更高整合度、更高效率與更強可靠性」的產業大趨勢，更讓電源系統達到了新一代電子系統的嚴格標準。

結論

基於 LT3753 的隔離式順向轉換器透過由 LT1431 並聯穩壓器和光耦合器驅動的回饋迴路，展現了有效的瞬態負載調節能力。模擬結果突顯精確的光耦合器偏置和 CTR 在確保快速且準確的工作週期調變方面的重要性。偏置不當會使回饋訊號失真，導致電壓校正延遲或不穩定，尤其是在負載瞬變期間。相較之下，像 iCoupler 這樣的隔離技術提供了更好的頻寬和可靠性，因而成為高速或數位回饋系統的理想選擇。此外，在設計穩健的回饋迴路時，需要仔細關注元件在實際條件下的行為，例如溫度漂移和老化。無論是使用 LT3753 還是其他控制器，本文討論的原理都為實現穩定、靈敏和高性能的電源調節提供了堅實基礎。

總之，別讓回饋迴路失效，要正確地對光耦合器進行偏置，並採用創新的設計策略。CTA

科林研發深化與清華大學人才培育合作， 啓動全新講座教授計畫拓展學術與 STEM 教育布局

創新半導體設備製造與服務供應商 Lam Research 科林研發近日宣布捐贈予國立清華大學，推動為期三年的「Lam Research 講座教授計畫」。該計畫旨在強化國際學術交流，藉由邀請學者來台進行學術訪問，以及聘任講座教授以支援教學、研究與學術發展，進一步拓展學生的國際視野，並加深對全球最新技術發展的理解。此計畫奠基於科林研發與清華大學的長期合作，自 2019 年起，雙方即在國家圖書館支持的英文閱讀計畫下展開交流，於新竹、苗栗等偏遠地區的學校舉辦英文說故事活動，推動雙語教育發展。2022 年雙方更擴大合作，共同推動論文獎暨傑出科技獎學金計畫，至今已累計約 30 位碩博士生獲獎。

「Lam Research 講座教授計畫」為期三年，捐贈款項將用於支持清華大學工學院打造更具國際化的教學與研究環境，培育能夠引領未來的卓越工程人才。該計畫期進一步拓展雙方合作，透過支持學者來訪與講座教授聘任，邀請國際學者來台進行學術交流與技術指導，提升策略性國際研究合作，同時為師生打造更具全球視野的學習環境。

除深化學術教育與研究合作外，科林研發持續與清華大學攜手推動科學、技術、工程和數學 (STEM: Science, Technology, Engineering, and Mathematics) 教育，建立多元且長期的教育參與模式。透過「半導體 AI 科學營」，科林研發邀請清華大學共同推動兼具實作與沉浸式的學習體驗，引導學生深入探索電子電路、半導體製程與智慧科技的核心基礎，並培養科學探究與邏輯思考能力。同時，科林研發亦積極參與由清華大學主導的新竹市科學節等在地科普活動，透過創新且易於參與的互動形式，吸引下一代投入科學探索，激發學習興趣與好奇心，拉近科學與日常生活的距離。