

串連理想二極體：解決 48V EV 電力挑戰

Shiven Dhir

Applications Engineer

Input Power Protection and Distribution

Rakesh Panguloori

Applications Manager

Input Power Protection and Distribution

除了傳統的 12V 網路之外，48V 電池子系統的使用日益增加，正促使 HEV/EV 電力系統的設計出現明顯的轉變。48V 可提供更多功率且無需笨重佈線，從而減少線束的功率損耗，進而延長行駛里程。隨著這項轉變，車輛的電力配電架構正從傳統的集中式走向區域式架構，其中電力配電、通訊與負載驅動會依車內位置（而非功能）分組整合，如圖 1 所示。區域式架構可降低系統複雜性，並為原始設備製造商 (OEM) 提供更多模組化特性。

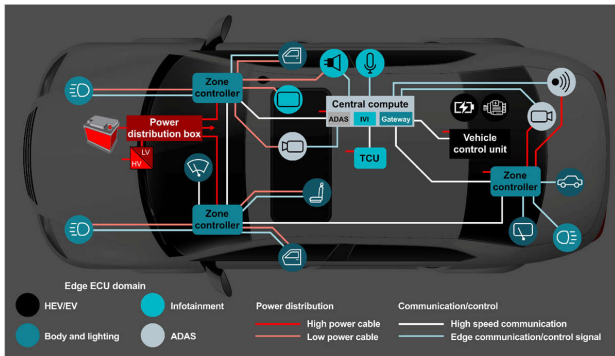


圖 1. 現代車輛的區域架構

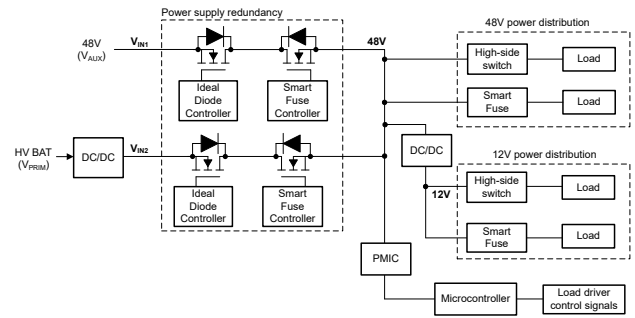


圖 2. 區域控制模組中的典型配電

圖 2 展示了一種典型的配電架構，其中採用多個電源來實現區域控制模組的冗餘供電。理想二極體 (如白皮書“理想二極體基礎”中所述) 非常適合需要反向電流阻斷和 / 或反極性的應用。由於理想二極體具備反向電流保護功能，因此它們也非常適用於需要整合多個電源以提升系統冗餘性的應用場景[2]。然而，目前市面上現有的理想二極體控制器，其絕對最大額定值僅達 72V，在支援某些 48V 系統設計時存在限制。

本文探討 48V 系統中設計 ORing 級所面臨的挑戰，並說明串連理想二極體配置如何實現可靠的 ORing 解決方案，以安全處理輸入電源中斷與外部瞬態事件。

挑戰 1：反向供電故障期間的高電壓應力

如圖 2 所示，主要配電需要無縫電源。高電壓電池 (VPRIM) 經由 DC/DC 轉換器降壓為 48V 電源軌，再由備用 48V 輔助電源 (VAUX) 在 ORing 配置下提供冗餘供電。如果 VIN1 出現反向極性故障，DC/DC 轉換器的輸出 VIN2 將為整個負載供電，如簡化的圖 3 所示。然而，這會導致輔助供電源路徑上的 ORing 產生高電壓應力。48V 電源最高可達 54V，這會在控制器 LM74700D-Q1 的陰極至陽極引腳之間形成高達 108V 的電壓差，超過了 75V 的絕對最大額定值。此解決方案也需要至少 120V 額定 MOSFET，而這類元件比 60V FET 更昂貴，且難以多源採購。

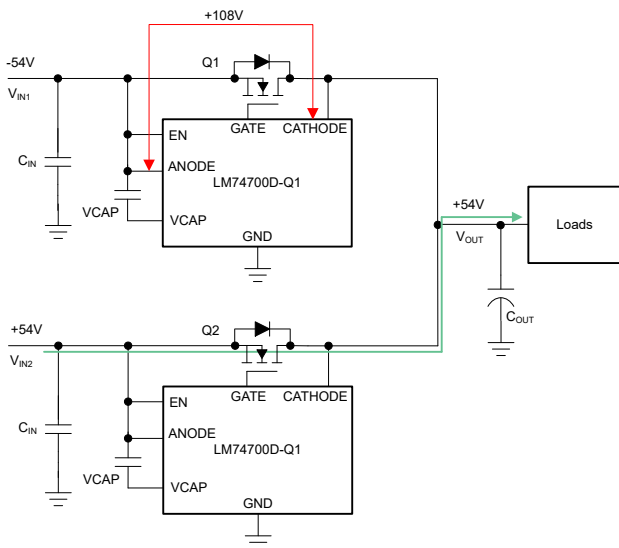


圖 3. 輸入反向極性條件下的電壓應力

挑戰 2：符合 LV148 負載突降與切換瞬態要求

瞬態過電壓可能發生於電氣系統中，原因包括負載切斷與油門踏板瞬間踩下。針對 48V 系統，目前可用的標準 (ISO 21780 與 Liefervorschriften [LV] 148) 規定了 E48-02 瞬態過電壓波形，如圖 4 所示。此波形最高上升至 70V，並維持該電壓 40 ms，且部分 OEM 甚至要求持續時間達 100 ms。受測裝置 (DUT) 必須在這些事件中維持功能狀態 A，且 DUT 必須執行所有功能。請注意，對於這類高功率且寬幅的瞬態，使用 TVS 或齊納二極體進行箝位是不切實際的。簡單來說，直接連接至 48V 電源軌的積體電路，在所有條件下都必須能承受 70V 的電壓。但是，若將切換瞬態或元件容許裕度納入考量，這些裝置應支援遠高

於 70V 的電壓。現有理想二極體控制器的陽極對接地的絕對最大額定值為 72V，因此系統設計者的設計裕度較少。

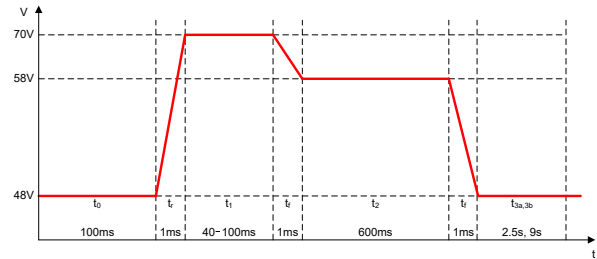


圖 4. LV 148 標準中的 E48-02 瞬態過電壓波形

單一控制器解決方案

圖 5 顯示了一個使用單個 LM74700D-Q1 的解決方案，但透過齊納箝位電路，降低了控制器陰極到陽極引腳之間高達 108V 的巨大電壓差。齊納二極體 DZ 可將陰極到陽極之間的電壓限制在其絕對最大額定值 (75V) 以下，而電阻器 RZ 則可為 DZ 提供適當的偏壓。然而，此解決方案仍需要至少 120V 額定 MOSFET，而這類元件的價格相對 60V FET 昂貴，且難以多源採購。此外，在正常運作中，電阻器 RZ 會導致陰極路徑出現額外壓降，進而影響反向電流保護閾值。

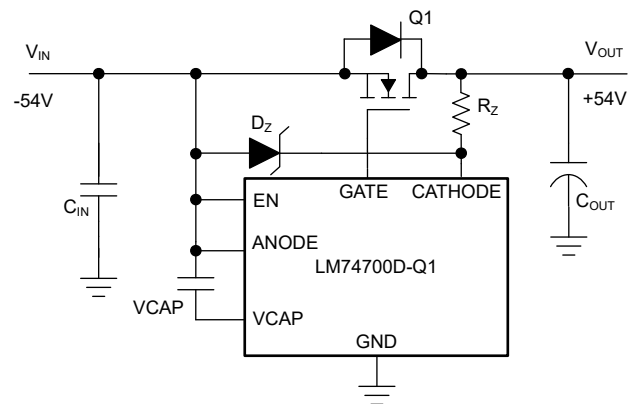


圖 5. 使用單一高壓 MOSFET 的解決方案

建議的串連理想二極體配置

建議的解決方案採用兩個理想二極體控制器，各自驅動 MOSFET Q1 與 Q2，並以串聯方式配置，如圖 6 所示。各控制器的箝位電路不僅能確保陰極到陽極的電壓低於 75V，還可作為一個均壓網路，在故障事件期間使 Q1 與 Q2 平均分攤電壓。我們來看看此電路在兩種常見故障情境下的運作方式

情況 1：在啟動期間，若輸出端 (VOUT) 已供電至 54V，而輸入端 VIN 為 0V，則中點電壓 VMID 會保持在 0V。第二個 LM74700D-Q1 控制器會因反向電流阻斷情境 (VOUT > VMID) 而保持 GATE2 關斷，此時 Q2 會阻斷 54V 電壓。在此情況下，使用者在 VIN 端施加 54V 的反向電壓，第一個 LM74700D-Q1 控制器因反向極性情境 (ANODE < 0V) 而保持 GATE1 為關閉狀態，此時 Q1 會阻斷 54V 電壓。

情況 2：在此情境中，VIN 起始於故障狀態 (例如 -54V)，隨後系統以 VOUT = 54V 開機。中點電壓 VMID 會保持在 0V，因為第一個 LM74700D-Q1 控制器將 GATE1 維持在關閉狀態，以阻斷作用在 VMID 上的反向電壓。同理，第二個 LM74700D-Q1 控制器會因反向電流阻斷條件而保持 GATE2 關斷。MOSFET Q1 和 Q2 都承受 54V 的電壓應力。由於在故障案例中 MOSFET 兩端的電壓低於 60V，所以此解決方案為客戶提供了選用傳統 60V 額定 FET 的彈性，這類元件容易多源採購。

如圖 6 所示，此解決方案在接地路徑中也加入了一組暫態箝位網路 (DC、Q3、RB 與 DB)，用以處理超過 LM74700D-Q1 絕對最大額定值的切換瞬態電壓。在正常運作中，裝置地與系統地之間的電位差僅為 Q3 的 VBE；但只要 VIN 超過二極體 DC 的崩潰電壓 (VBR-DC)，電晶體 Q3 便會產生壓降，進而抬高裝置地的電位。這有助於將 LM74700D-Q1 的陽極對接地電壓限制在接近 DC 的崩潰電壓，從而實現可擴展的瞬態處理方案。二極體 DB 的用途是在輸入電源反接的情況下阻斷反向電流路徑。

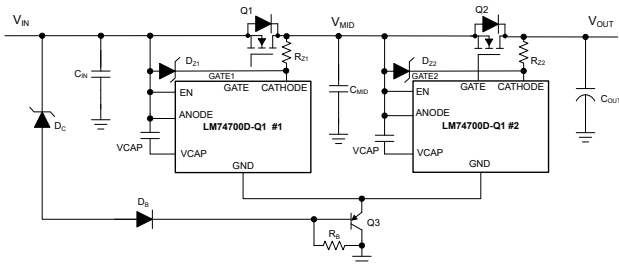


圖 6. 串連理想二極體配置

元件選擇和測試結果

重要的是要考慮如何在系統中選擇關鍵元件以實現這些結果。

對於理想二極體 MOSFET Q1 和 Q2，選用 VDS(MAX) 為 60V、VGS(MAX) 為 +/-20V 的規格，可在所有故障條件下提供足夠的裕度。額定電流下的 RDS_ON：(20 mV / 額定電流) ≤ RDSON ≤ (50 mV / 額定電流) 對於降低反向電流非常重要。例如，在 5A 設計中，RDS_ON 的範圍在 4 mΩ 至 12.5 mΩ 之間。

MOSFET 閘極閾值電壓 Vth 應最高為 2V。

PNP 電晶體 Q3 在齊納二極體 DC 啟動後會承受最大壓降，因此其耐壓規格應大於 (VIN-MAX - VBR-DC)。此外，還必須能夠支撐 LM74700D-Q1 的靜態電流，該電流小於 1 mA。可以使用像 BC857-Q 這樣的電晶體。

對於齊納二極體 DZ1 和 DZ2：應選擇 BZX84J-B62 等 62V 齊納二極體，以確保陰極對陽極的電壓低於 75V。對於齊納二極體 DC，DC 的崩潰電壓 (VBR-DC) 會決定在 VIN 引腳上出現開關瞬態時，陽極對接地之間的箝位電壓。利用 BZX84J-B62 等 62V 齊納二極體，可以為 LM74700D-Q1 提供足夠的電壓保護裕度，有效限制其承受的電壓。阻斷二極體 DB 應具備接近最大輸入供電反向電壓的阻斷能力，因此建議選擇至少 60V 耐壓的二極體，例如 NSR0170P2T5G。

電阻器 RZ1 和 RZ2 是 DZ1 和 DZ2 的偏壓電阻器。任何在 1 kΩ 到 2 kΩ 範圍內的電阻值都應該足夠。電阻器 RB 是 DC 的偏壓電阻器，選用 10 kΩ 至 47 kΩ 範圍內的任何值即可滿足需求。

圖 7 和圖 8 顯示了在系統啟動前和系統啟動後施加輸入反向極性時，MOSFET 的汲極至源極電壓分布。如圖所示，MOSFET 彼此平均分擔電壓，每個 MOSFET 上的最大電壓均低於 60V。圖 9 顯示接地路徑瞬態箝位網路的性能，在 VIN 端發生 70V 負載突降事件時，陽極對積體電路接地的電壓被箝制在 62V。

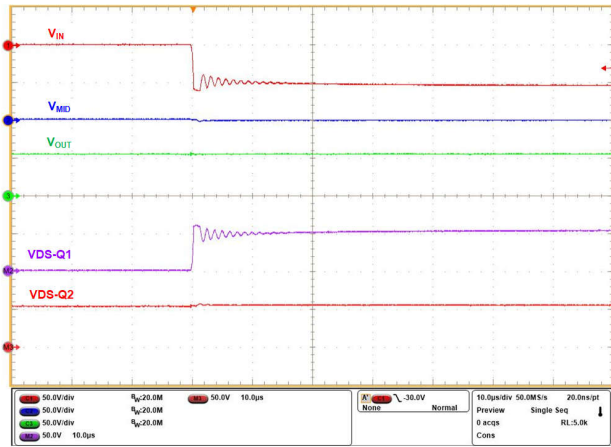


图 7. 输入反向极性条件下 MOSFET 的电壓分配

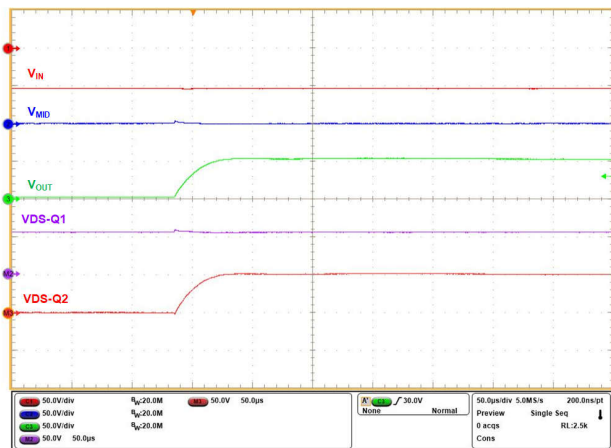


图 8. 輸出端熱插拔 ($V_{IN} = -54V$) 條件下 MOSFET 的電壓分配

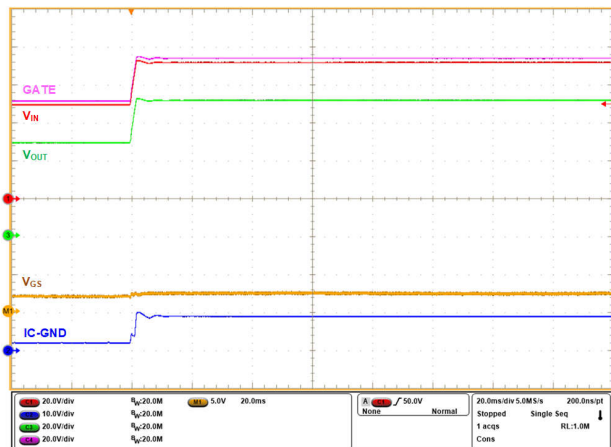


图 9. 所提方案對 70V 負載突降事件的反應

結論

雖然 48V 系統具有許多優點，但在配電級的冗餘供電 ORing 應用中，也帶來了一系列新的挑戰。建議的串連理想二極體配置，搭配接地路徑暫態箝位網路，可實現採用傳統 60V 額定 FET 的系統設計，且這類裝置容易多源採購。所建議的方法也可為切換瞬態提供足夠的電壓裕度，進而在 48V 系統中實現可靠的 ORing 解決方案。

參考資料

1. 《理想二極體基礎》，德州儀器應用報告，文獻編號 SLVAE57B，2021 年 2 月。
2. 《使用理想二極體控制器的汽車應用冗餘供電拓展》，德州儀器類比設計期刊，文獻編號 SLYT848，2024 年 3 月。
3. 德州儀器，[LM74700D-Q1 車用低 IQ 反向電池保護理想二極體控制器](#)，產品規格表。

重要聲明與免責聲明

TI 以「現狀」及所含一切錯誤提供技術與可靠數據 (包含產品規格書)、設計資源 (包含參考設計)、應用或其他設計建議、網頁工具、安全資訊和其他資源，且不承擔所有明示或默示保證，包括但不限於適銷性或用於特定用途之適用性的任何默示保證，或不侵害第三方智慧財產的任何默示保證。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您應自行負責 (1) 選擇適合您應用的 TI 產品，(2) 設計、驗證與測試您的應用，與 (3) 確保應用符合適用標準，以及任何其他安全、安保、法規或其他要求。

這些資源得進行修改且無需通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的智慧財產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#)、[TI 的通用品質指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供此等資源並不會擴大或以其他方式改變 TI 對於 TI 產品的適用保證或保證免責聲明。除非 TI 明確將某產品指定為自訂或客戶指定型號，否則 TI 產品均為標準、類比、通用裝置。

TI 反對並拒絕您可能提出的任何附加或不同條款。

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

上次更新 10/2025

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), 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 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](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [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. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

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

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025