

# 為汽車區域式配電系統的車外電容負載供電

**Dilip Jain**  
Systems Manager  
Power Switches

**Rakesh Panguloori**  
Applications Manager  
Power Switches

## 簡介

車輛架構從域式架構轉換至區域式架構的趨勢，正大幅改變汽車配電，讓半導體開關式解決方案 (請參閱 圖 1) 取代了用於保護線束的傳統熔斷保險絲。這類解決方案提供的

優點包括降低保險絲時間電流的變異性，因此具備縮減纜線直徑、重量和線束成本的潛力。半導體開關也可遠端重設，這意味著不一定需要容易觸及保險絲，如此一來，設計師安置保險絲的位置，就可從電源到負載的纜線長度較短的位置。

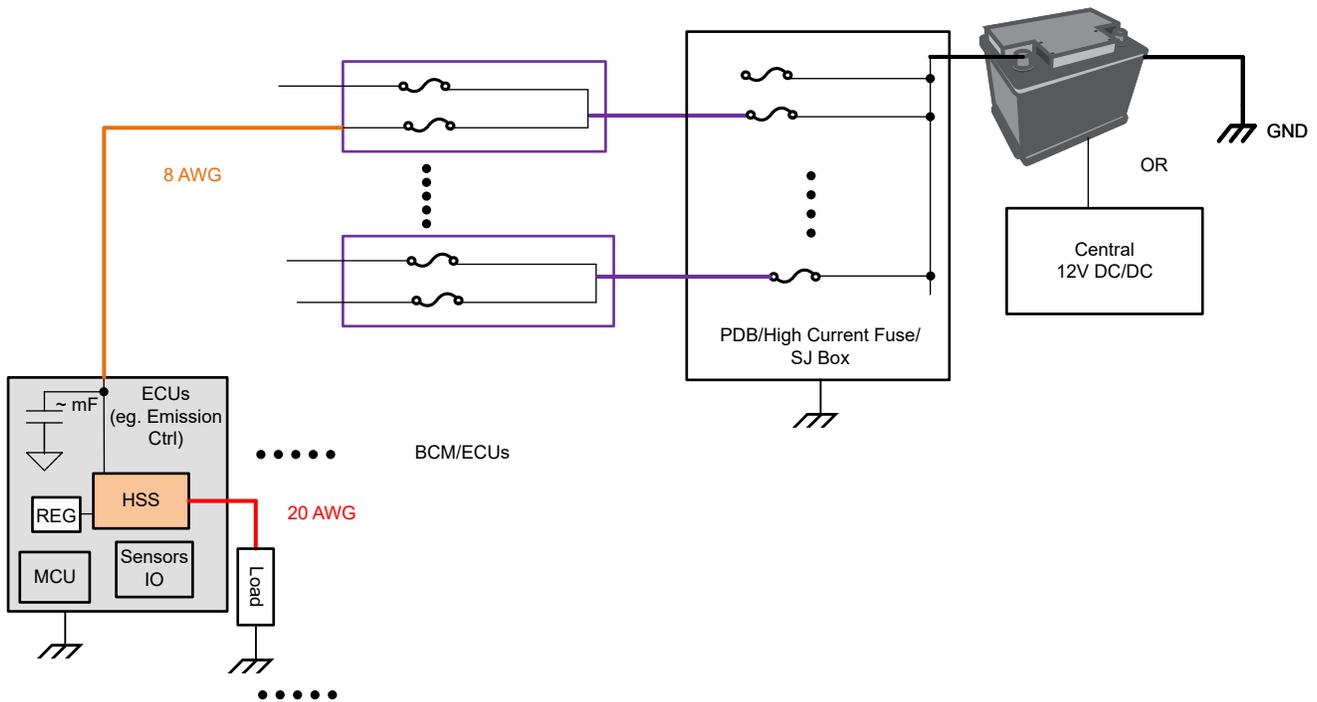


圖 1. 域式配電架構。

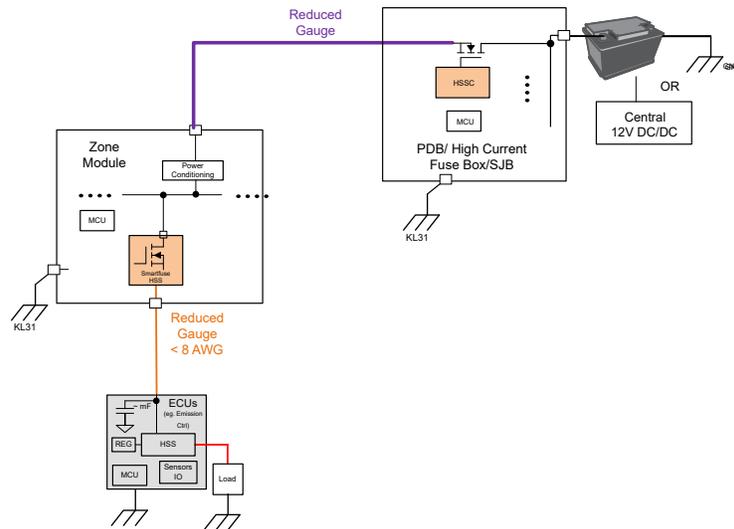


圖 2. 區域式配電架構。

將半導體開關做為智慧保險絲裝置使用時，會面臨的系統設計挑戰包括需在開關處於開啟狀態時降低靜態電流，以及需開啟輸出，以對通常位於負載處的大型電容負載供電 (電子控制單元 [ECU] 輸入)。根據 ECU 類型和在各配電箱 (PDB) 輸出一併連接的 ECU 數量而定，ECU 的輸入電容範圍為 47µF 至 5mF，且需考量啟動時間 (快速充電時間 <1ms、中等充電時間 <10ms、緩慢充電時間 <50ms)。在 ECU 啟動時間內，透過金屬氧化半導體場效電晶體 (MOSFET) 開關為這些 ECU 輸入電容器充電，是區域式架構的主要系統設計挑戰之一。

在本文中，我們將探討各種技術，以因應使用高壓側開關控制器來驅動電容負載的挑戰。

### 輸出電壓的電壓轉換速率控制

在此方法中，將電容器 (C) 置於開 - GND 之間，開的電壓轉換速率和輸出電壓會限制突波電流。具有輸出電壓電壓轉換速率控制的電路配置如 圖 3 所示。

方程式 1 和 方程式 2 可計算啟動時的突波電流和功率消耗，如下所示：

$$I_{INR} = C_{OUT} \times \frac{dV_{OUT}}{dt} \quad (1)$$

$$P_{D(Vout = 0)} = V_{IN} \times I_{INR} \quad (2)$$

由於 MOSFET 在飽和區域中運作，因此突波電流應低至足以在啟動期間，將功耗維持在安全操作區 (SOA) 內。當 MOSFET 的功率消耗降低，且分散在較長時間內時，MOSFET 就可處理更多能量 ( $1/2 C_{OUT}V_{IN}^2$ )。因此，突波間隔需要延展為較長的時間，以支援更高的電容負載。

此方法適用於需要緩慢充電的情況 (例如 5mF 和 50ms)，但是設計必須一律包括在  $C_{OUT}$ 、FET SOA、充電時間和操作溫度之間的取捨。舉例來說，使用 TI 的高壓側切換控制器 **TPS1211-Q1** 做為開極驅動器，將 5mF 充電至 12V 時需要 40ms，且突波電流限制為 1.5A。參考資料 [11] 使用此方法以重複在啟動期間檢查 FET SOA 的程序，而參考資料 [22] 則是可估計特定 MOSFET 之 SOA 裕度的線上工具。

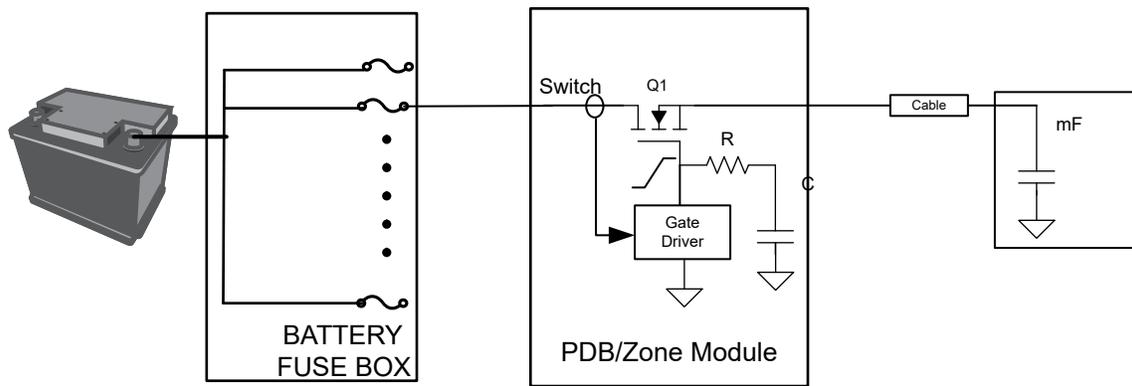


图 3. 輸出電壓的電壓轉換速率控制電路。

### 並聯預充電路徑

此方法通常用於需要額外閘極驅動器以驅動預充電 FET 的高電流並聯 FET 架構設計中，如 图 4 所示。您可使用 方程式 3 選擇預充電路徑中的預充電電阻器 (Rpre-ch)，將突波電流限制為特定值：

由於預充電電阻器會在啟動期間處理所有功率應力，因此其應能處理平均和峰值功耗，這分別以 方程式 4 和 方程式 5 表示：

$$P_{avg} = \frac{E_{pre-ch}}{T_{pre-ch}} = \frac{0.5 \times C_{OUT} \times V_{IN}^2}{5 \times R_{pre-ch} \times C_{OUT}} \quad (4)$$

$$R_{pre-ch} = \frac{V_{IN}}{I_{INR}} \quad (3)$$

$$P_{peak} = \frac{V_{IN}^2}{R_{pre-ch}} \quad (5)$$

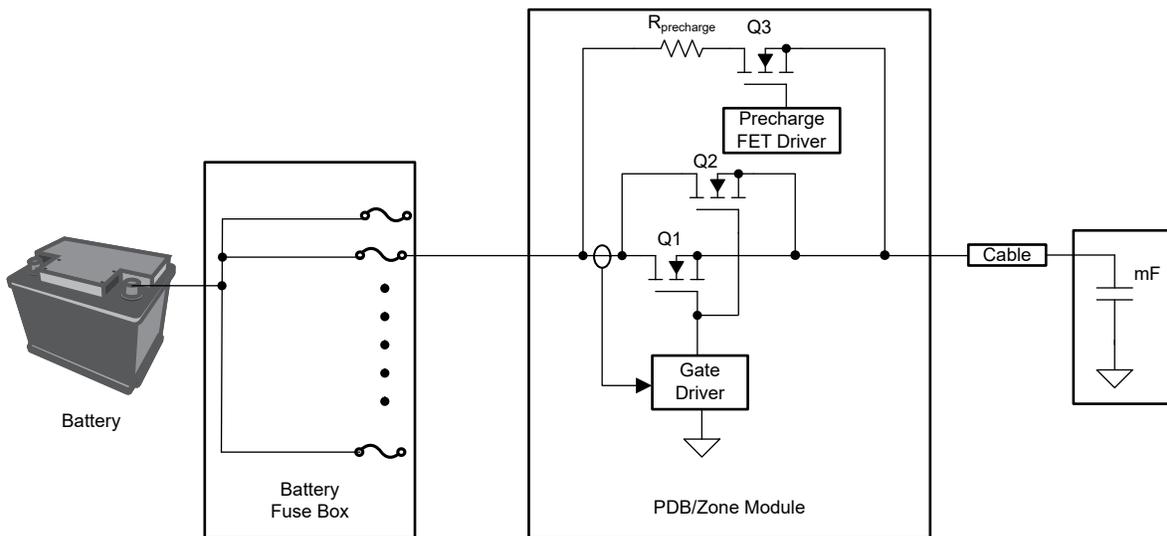


图 4. 在並聯路徑中具有預充電電阻器與 FET 的電路。

在這種情況下，可以對輸出快速充電，然而代價是預充電電阻器會非常龐大。例如，在 10ms 內將 5mF 充電至 12V 時，需要額定值為 36W 的 0.4Ω 預充電電阻器，且峰值功率處理能力為 360W，這會導致線繞電阻器相當龐大。因此，此解決方案對許多類型的終端設備而言皆不可行，因為在同一 PCB 上會有許多通道。而每個通道都需要龐大的電阻器，導致解決方案的空間效率不彰。

### 自動 PWM 式電容器充電

如 圖 5 中所示，PCB 中的高壓側驅動器輸出會透過從 1 公尺到數公尺不等的冗長纜線連接至遠端 ECU。例如，50A 電線 (8AWG) 線束的特性為每公尺 2mΩ 和每公尺

1.5μH。D1 二極體是屬於系統設計的一部分，可為纜線線束電感電流提供續流路徑。高壓側驅動器具有強大的閘極驅動輸出，可與短路 (<1μs) 開啟和關閉時間平行驅動 FET，以提供過電流與短路保護。纜線寄生、D1 二極體與高壓側 MOSFET 構成了典型的降壓穩壓器配置。

在啟動期間，未充電的輸出電容器會消耗突波電流，並在突波電流達到短路保護閾值 ( $I_{SCP}$ ) 時觸發短路事件。高壓側驅動器會關閉電源路徑，並在重試期間後重新起始開啟 ( $T_{AUTO-RETRY}$ )。此程序會持續到輸出電容充滿電為止，如 圖 6 中所示，隨後高壓側驅動器會進入正常運作並驅動負載。

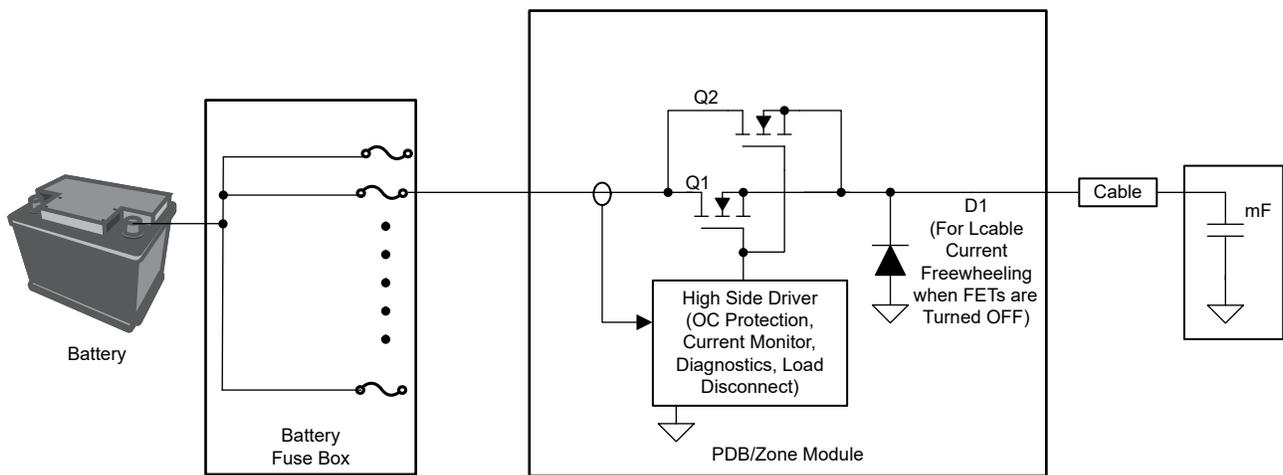


圖 5. 使用高壓側驅動器進行脈衝寬度調變 (PWM) 充電的電路表示。

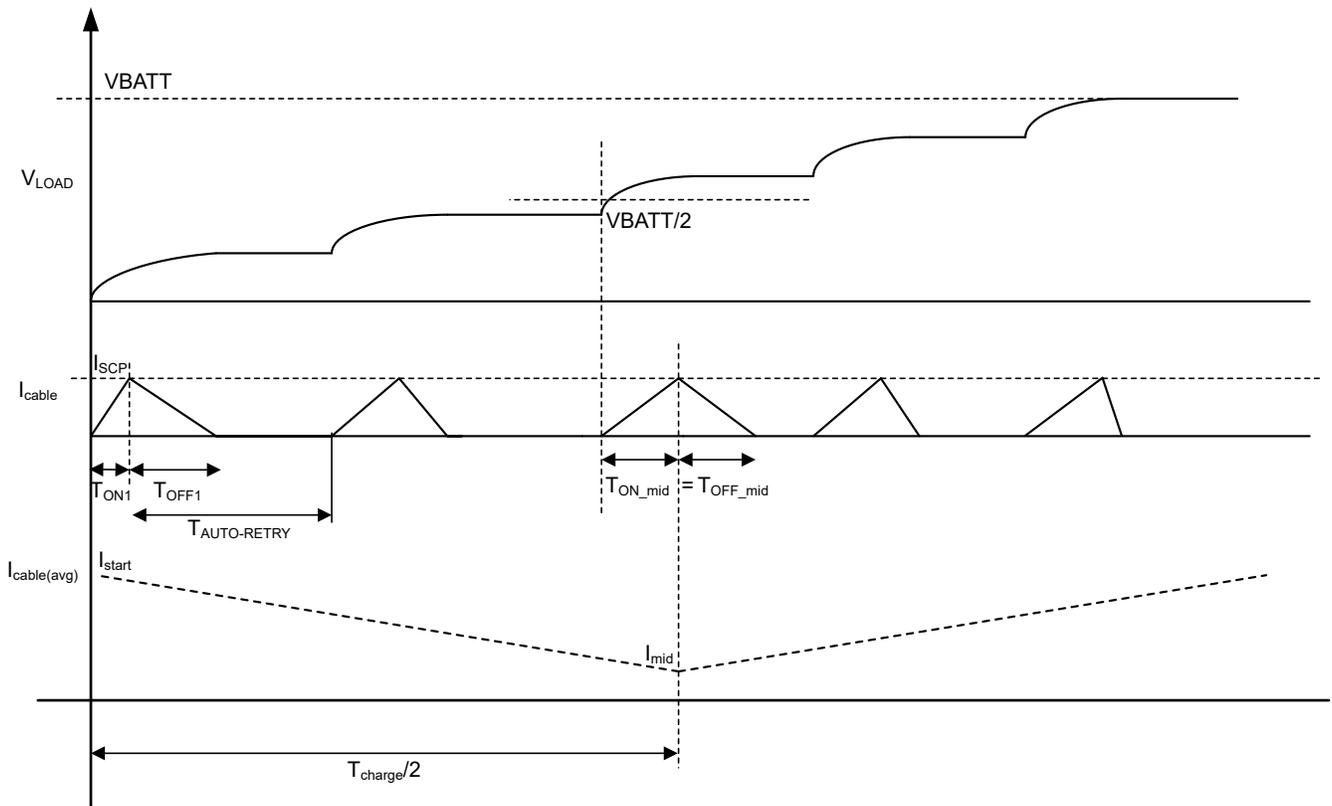


圖 6. 啟動期間的 PWM 充電方法概念波形。

圖 7 說明了控制操作。我們可以看到此方法有兩個變數，也就是  $I_{SCP}$  和  $T_{AUTO-RETRY}$ ，其需要根據輸入電壓 ( $V_{IN}$ )、負載電容和所需充電時間，針對高壓側驅動器進行設定。較高的  $I_{SCP}$  閾值或較短的  $T_{AUTO-RETRY}$  延遲可加快輸出充電速度，讓解決方案可通用於任何負載電容值。

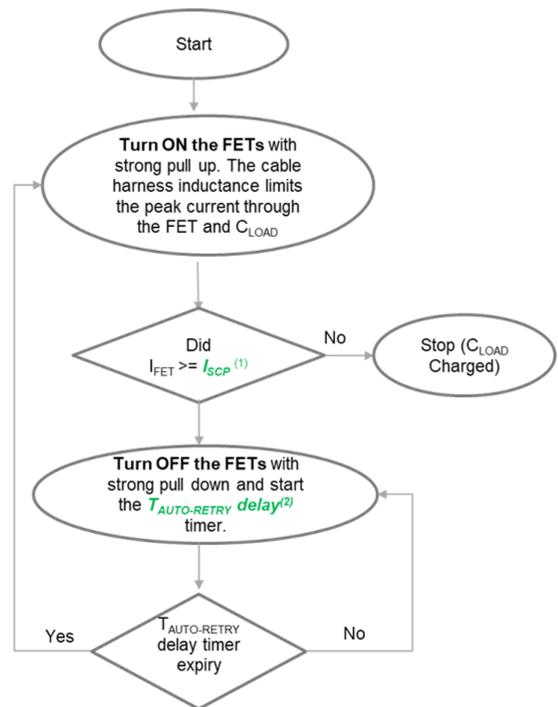


圖 7. PWM 充電控制方法的流程圖。

此解決方案運用典型高壓側驅動器系統 (纜線線束電感與 D1 二極體) 中現有的可用固定空間，並透過在切換模式下操作高壓側 MOSFET，建立有效率的充電方法。與傳統方法不同，此處提出的解決方案不再需要依賴 FET SOA，也不需要龐大的預充電電阻器、預充電 FET 和驅動器。此解決方案使用高壓側驅動器固有的短路保護功能，並可在沒有任何外部控制訊號或複雜演算法的情況下自動執行。

### 設計考量及測試結果

請考量這個 50A 負載的系統設計範例：

- 電池電壓 ( $V_{BATT}$ ) = 12V。
- 負載電容 ( $C_{LOAD}$ ) = 5mF。
- 1.5m 纜線 = 8AWG 將高壓側驅動器連接至 ECU，得到  $L_{cable} = 2.25\mu H$ 。
- 充電時間 ( $T_{charge}$ ) = 10ms
- 續流二極體壓降 ( $V_{D1}$ ) = 0.7V。

此設計包含選擇  $I_{SCP}$  和  $T_{AUTO-RETRY}$  參數。在 50A 負載設計中， $I_{SCP}$  閾值通常設定為比最大負載電流高 20%，因此在此範例中為  $50A \times 1.2 = 60A$ 。

現在，若要計算  $T_{AUTO-RETRY}$ ，請參閱 圖 6，並使用中點  $T_{charge}/2$  之電容器的電流電壓關係，以獲得 方程式 6：

$$\frac{(I_{start} + I_{mid})}{3} \times \frac{T_{charge}}{2} = C_{LOAD} \times \frac{V_{BATT}}{2} \quad (6)$$

其中：

$$I_{start} = \frac{I_{SCP} \times (T_{ON1} + T_{OFF1})}{2 \times (T_{ON1} + T_{AUTO-RETRY})} \quad (7)$$

以及

$$I_{mid} = \frac{I_{SCP} \times 2 \times T_{ON\_mid}}{2 \times (T_{ON\_mid} + T_{AUTO-RETRY})} \quad (8)$$

時間間隔  $T_{ON1}$ 、 $T_{OFF1}$  和  $T_{ON\_mid}$  可使用 方程式 9 至 方程式 11 計算：

$$T_{ON1} = \frac{L_{cable} \times I_{SCP}}{V_{BATT}} \quad (9)$$

$$T_{OFF1} = \frac{L_{cable} \times I_{SCP}}{V_{D1}} \quad (10)$$

$$T_{ON\_mid} = \frac{L_{cable} \times I_{SCP}}{\left(\frac{V_{BATT}}{2}\right)} \quad (11)$$

替換已知參數  $V_{BATT}$ 、 $L_{cable}$ 、 $I_{SCP}$ 、 $V_{D1}$  和  $C_{LOAD}$ ，並解出  $T_{AUTO-RETRY}$ ，即可提供  $<200\mu s$  的延遲，實現 10ms 的充電時間。

圖 8 和 圖 9 顯示使用 TPS1211-Q1 高壓側驅動器為 5mF 負載電容充電的應用電路圖和測試設定。 $T_{AUTO-RETRY}$  是  $180\mu s$ ，因此充電時間為 7ms，如 圖 10 所示。

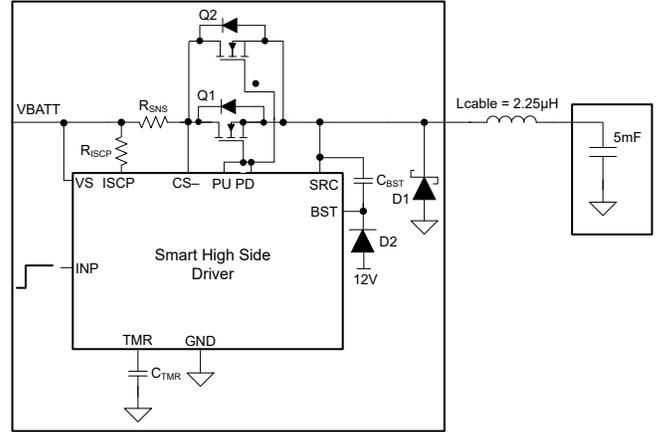


圖 8. 驅動電容負載的典型應用電路圖。

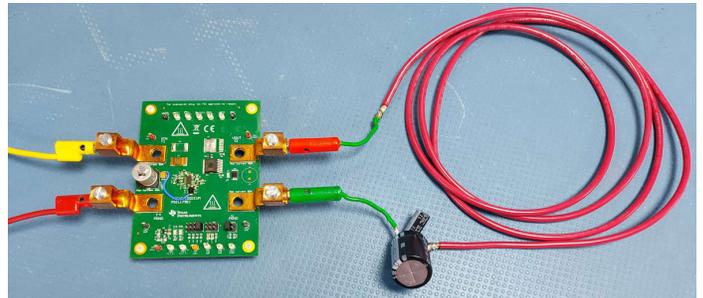


圖 9. 使用具有 1.5m 纜線線束之 TPS1211-Q1 評估模組的測試設定。

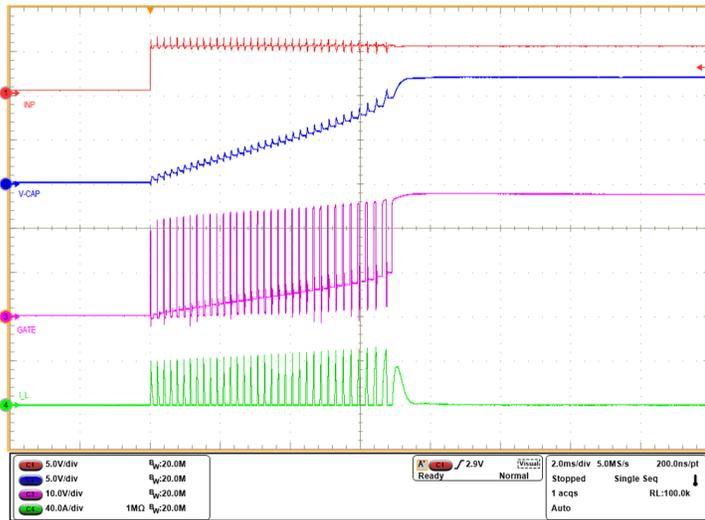


图 10. 在切换模式下使用 TPS1211-Q1，以 5mF 负载电容启动。

## 結論

相較於傳統熔斷保險絲，半導體式智慧保險絲解決方案在汽車配電領域中越來越受歡迎，因為其可透過軟體大幅改善保險絲時間電流特性和可重設性。這些優勢可減少整體纜線組束重量，因為纜線可更細且更短。

半導體式智慧保險絲解決方案的系統設計挑戰之一，在於電容器負載充電是否可滿足系統啟動時間需求。TI 的高壓側開關控制器裝置可提供多種技術，以因應電容負載驅動的挑戰。

## 參考資料

1. Artem Rogachev。2014 年。「[耐用的熱插拔設計](#)」。德州儀器應用報告，文獻編號 SLVA673A，2014 年 4 月。
2. [適用於 dv/dt 式啟動的 FET SOA 裕度計算機](#)

## 相關網站

- [TPS1211-Q1](#)
- [TPS1200-Q1](#)

**重要聲明：**本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

## 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