

## Application Note

**48V 汽車系統馬達驅動器電壓轉換速率考量**

Akshay Rajeev Menon, Joseph Ferri

**摘要**

在市場電氣化趨勢及政府環保法規推動下，汽車產業近期正經歷重大變革。隨著越來越多 OEM（原始設備製造商）投入電動車（EV）專案，48V 架構的採用正大幅加速。即使在非全電動車輛中，48V 也廣泛應用於輕度混合動力車輛。

導入 48V 電源軌可讓連接系統以較低馬達電流運作，進而減少線徑、線束重量、功率損耗和 PCB 尺寸。最終有助於降低這些車輛線束的高昂總成本。電動車中常見的滑板式底盤也能受惠於 48V 電源軌，透過提高功率密度和簡化佈線獲得優勢。

許多汽車系統廣泛使用無刷直流（BLDC）馬達，因其具備高效率、長壽命、低 EMI、運作安靜和控制精確等優點。這些馬達遍布整車，用於各種功能，如煞車、轉向、換檔、主動懸吊、泵浦和鼓風機等。從傳統 12V 架構轉向 48V 架構，會改變無刷直流（BLDC）馬達系統的效能，因此需要重新考量設計。

雖然 48V 電壓層級有多項新的系統級考量，但本應用筆記重點關注 MOSFET 功率損耗，以及從 12V 轉換到 48V 系統時功率損耗的變化。

**目錄**

1 簡介.....	2
2 馬達驅動器系統功率損耗與熱特性.....	2
2.1 傳導損耗.....	2
2.2 切換損耗.....	3
3 現實世界馬達驅動器限制.....	5
3.1 電磁干擾 (EMI) - 系統雜訊考量.....	5
3.2 馬達驅動器電壓容差.....	5
4 總結.....	6
5 參考資料.....	6

**註冊商標**

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 簡介

BLDC 馬達在多個汽車系統中發揮多種功能。傳統上，BLDC 系統最常見電壓範圍是 12V。隨著 48V 電源軌導入這些系統，了解其對 MOSFET 功率損耗的影響至關重要。管理功率損耗來源對於降低運作發熱和節省電池電量重要。

本應用說明討論轉換到 48V 時的新系統級考量，包括傳導損耗、切換損耗、EMI 等。所有後續範例和計算，12V 和 48V 均使用 960W 功率等級，即 12V 時為 80A，48V 時為 20A。

## 2 馬達驅動器系統功率損耗與熱特性

BLDC 馬達透過 MOSFET 三相半橋電氣換相，將電位能轉換為機械動能。將電力從電池傳輸至馬達的 MOSFET，是馬達驅動器系統中功率損耗和發熱最大來源。

功率損耗是系統設計時需考慮的關鍵因素，因為功率損耗會影響：

使用者體驗 - 高溫會影響可用性，並可能導致使用者不適

裝置可靠性 - 高溫運作會導致加速磨損，並影響壽命可靠性裝置可靠性

電源效率 - 縮短電池壽命、降低車輛里程並增加散熱設計挑戰

本應用說明重點關注 MOSFET 功率損耗的兩個主要領域：傳導損耗與切換損耗。

### 2.1 傳導損耗

MOSFET 傳導損耗發生於電流從汲極傳導至源極時。MOSFET 傳導時的通道電阻通常稱為傳導電阻或  $R_{ds(on)}$ 。這些損耗與電流平方成正比，因此馬達電流成為決定傳導損耗的主導因素。FOC 換相期間的傳導損耗使用以下公式計算：

$$P_{conduction} = 3 \times I_{RMS}^2 \times R_{ds(on)} \quad (1)$$

#### 範例 1

假設兩個系統總功率均為 960W。

系統 A = 12V 電池

系統 B = 48V 電池

$$P = I \times V \quad (2)$$

根據 [方程式 2](#)，若假設 12V 和 48V 系統所需功率輸出相同，根據歐姆定律可推斷 48V 系統運作電流減少四倍。因此，流經 MOSFET 的電流較少，根據 [方程式 1](#)，48V 系統傳導損耗將減少 16 倍。[圖 2-1](#) 說明 [範例 1](#) 中顯示的損耗。

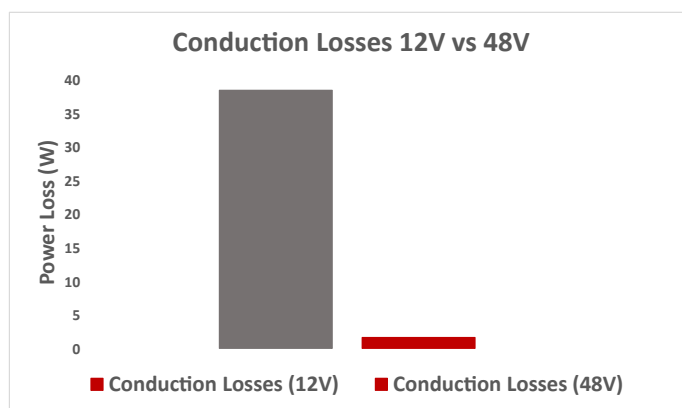


圖 2-1. 12V 與 48V 傳導損耗

## 2.2 切換損耗

切換損耗是與開啟/關閉 MOSFET 過程中所損失能量相關的另一種功率損耗形式。這些損耗與完全轉換汲極至源極電壓所需時間以及 MOSFET 切換頻率成比率。

FOC 換相期間切換損耗的方程式使用以下公式計算：

$$P_{switching} = 3 \times I_{RMS} \times V_{peak} \times T_{rise/fall} \times F_{PWM} \quad (3)$$

12V 汽車系統中，傳導損耗主導總功耗，因此切換損耗不是重點。然而，隨著汽車製造商轉向 48V EV/混合動力系統，切換損耗在總損耗中變得更加重要。此市場轉變趨勢導致更多工程師最佳化切換行為，以降低總功耗。

關注的關鍵參數是 MOSFET 電壓轉換所需時間。透過縮短電壓轉換時間 ( $\frac{Voltage}{T_{rise/fall}}$ )，可更有效率地切換 MOSFET。縮短轉換時間是透過增加馬達驅動器閘極電流來實現，從而導致更快的電壓轉換速率。圖 2-2 顯示電壓轉換速率對切換損耗的影響。

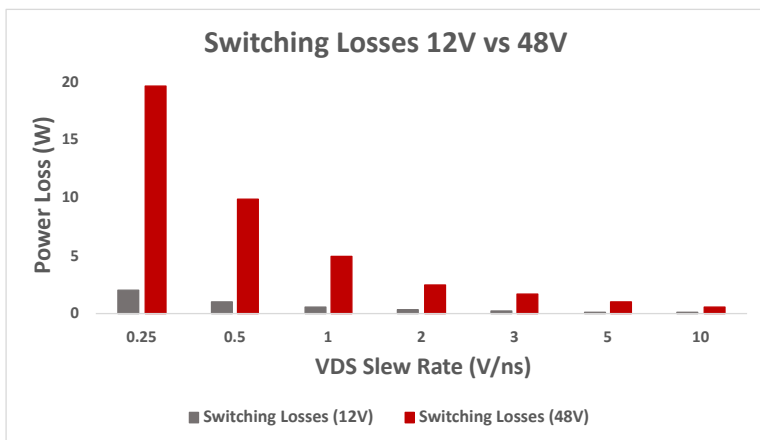


圖 2-2. 12V 與 48V 切換損耗

### 2.2.1 切換頻率的影響

另一個嚴重影響系統切換損耗量的因素是輸入 PWM 訊號頻率。MOSFET 必須在個別輸入脈衝開始和結束（關閉和開啟）時進入切換區域。PWM 頻率越高，這些脈衝發生越頻繁，從而增加每個 MOSFET 在切換區域花費的時間。這表示切換損耗量與輸入 PWM 訊號頻率成正比（請參閱圖 2-3）。48V 系統常見 PWM 頻率值約為 20kHz。設定此目標值是因為頻率夠高，超出人類聽覺範圍，但也保持在較低水準以減輕切換損耗和雜訊。

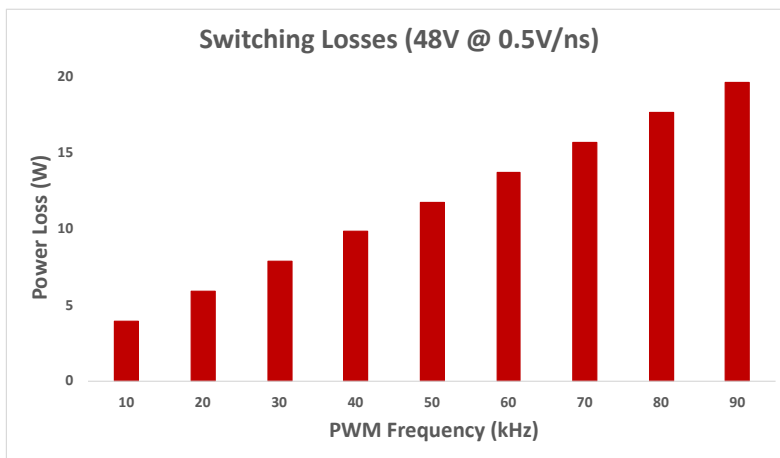


图 2-3. 切换损耗 (0.5V/ns 時 48V)

### 3 現實世界馬達驅動器限制

理論上，以最快電壓轉換速率運作是最佳化馬達驅動器系統和減少切換功率損耗的關鍵。然而，實際上會受到以下現實世界限制：

#### 3.1 電磁干擾 (EMI) - 系統雜訊考量

MOSFET 快速切換會導致快速電壓暫態，這些暫態包含高頻成分，會以 EMI 形式傳遞。所有電路皆有寄生電感和電容，快速激勵這些 L-C 元件會產生諧振電路，進一步放大某些頻率。這些頻率可能會干擾系統其餘部分。汽車系統有嚴格 EMI 頻率上限要求，例如 CISPR 25 合規性，因此限制了終端系統可實作的電壓轉換速率。

#### 3.2 馬達驅動器電壓容差

增加電壓轉換速率會導致 MOSFET 閘極和源極訊號出現電壓鈴聲（過衝和下衝）。過衝幅度與轉換速率（由閘極電流控制）直接相關。有關閘極電流對電壓轉換速率和鈴聲的影響，請參閱 圖 3-1。系統設計工程師須負責確保電壓尖波不違反馬達驅動器絕對最大額定值，特別是閘極和源極針腳額定值。在超過馬達驅動器額定值的條件下運作會影響裝置效能和可靠性，導致非預期行為或快速磨損。

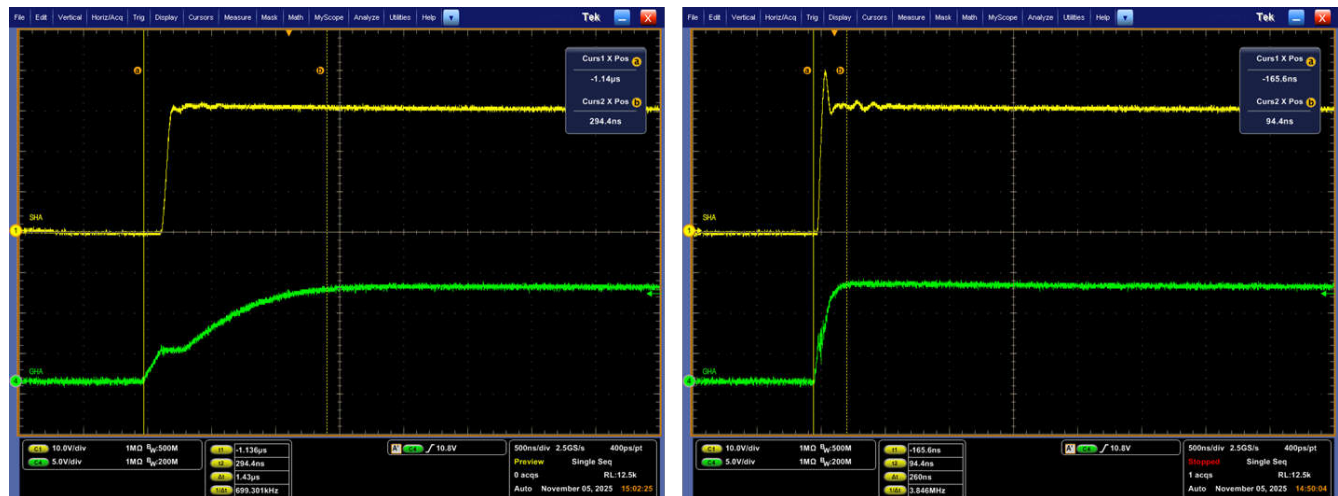


圖 3-1. 閘極電流對電壓轉換速率和振鈴的影響：a) 閘極電流 - 64mA (左) b) 閘極電流 - 1024mA (右)

另一個常被忽視的關鍵規格，是馬達驅動器源極節點可容忍的絕對最大電壓轉換速率。許多舊款裝置和主要競爭對手裝置具有 1V/us 絕對最大電壓轉換速率規格，限制切換速度。同樣值得注意的是，MOSFET 汲極至源極電壓轉換並非線性，而是類似 S 曲線，因為這類似於電容充電。這表示電壓轉換速率在中段部分可能高於裝置額定值。這對需要探索更快的電壓轉換時間以提高切換效率的客戶構成嚴重限制。德州儀器新款 48V 驅動器 [DRV8363-Q1](#) 專為此考量而設計，在源極節點提供最大 20V/ns 電壓轉換速率容差。[DRV8363-Q1](#) 新額定值提高系統對更快電壓轉換速率的穩健性，使驅動器不會成為系統效能限制。

加入 RC 緩衝器或遵循適當 PCB 設計實務可減少鈴聲影響。最終，系統設計工程師為系統選擇閘極電流前，必須考慮 EMI 限制和驅動器電壓額定值。兩者皆有優點和權衡取捨，包括整體 PCB 對寄生元件的穩健性，這會影響系統最佳電壓轉換速率。

## 4 總結

隨著汽車系統中的 BLDC 系統轉換至 48V，需注意 MOSFET 切換損耗已不可忽略。從傳導損耗為主轉變為切換損耗為主，改變了馬達驅動系統最佳化方法。

較高電壓轉換速率有助於減少切換損耗，但必須考慮較快轉換速率的不利影響，例如 EMI 和鈴聲。若電壓轉換速率過高，系統可能受電壓過衝、電容耦合甚至非預期傳導影響。PCB 佈局及正確選擇源極和汲極電流設定，對於最佳化系統至關重要。透過平衡這些因素，設計師可使用 [DRV8363-Q1](#) 建立穩健 48V 系統，該系統不受裝置轉換速率能力限制。

## 5 參考資料

- 德州儀器，[DRV8363-Q1 48V 電池三相智慧閘極驅動器，具備精確電流感測與進階監控功能](#)，產品規格表。
- 德州儀器，[DRV8363-Q1EVM](#)，評估模組。

## 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](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. 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