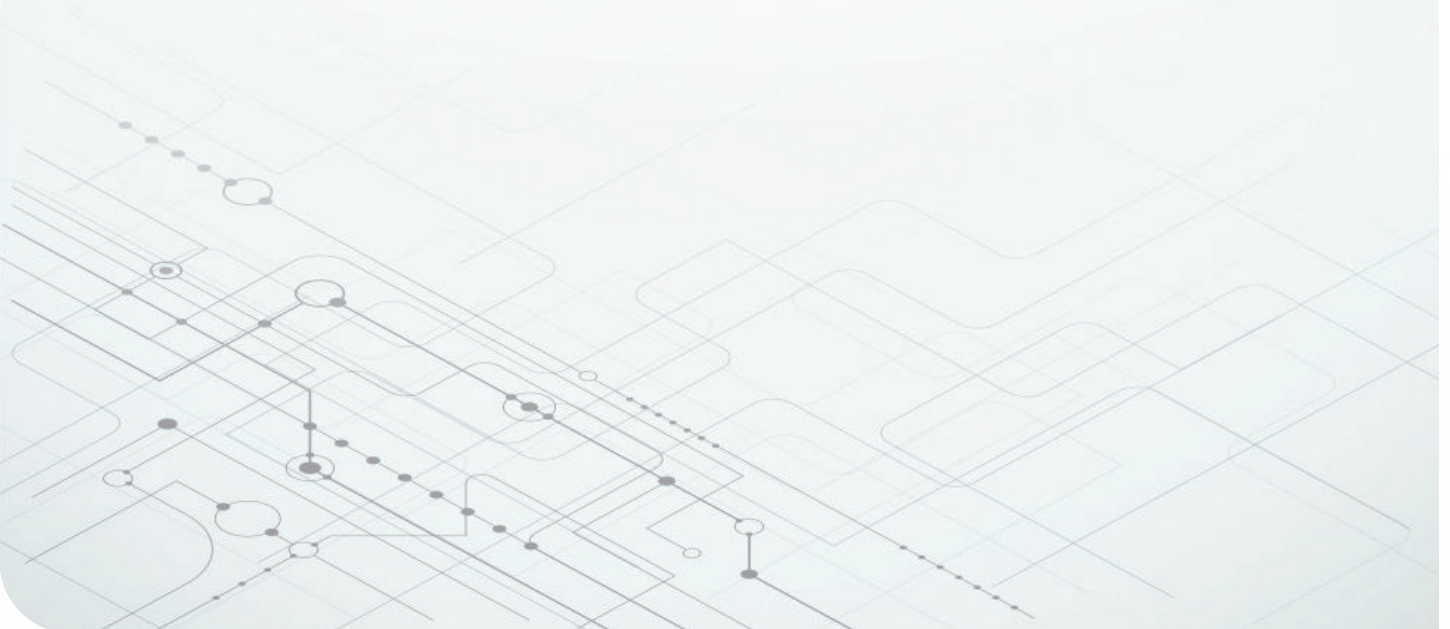


三相整合式 GaN 技術如何實現最高的馬達驅動性能



Manu Balakrishnan
Systems engineer
Motor drivers



摘要



1 GaN 如何提高逆變器效率



2 以 GaN 電源開關提升馬達性能



3 在馬達驅動中使用 GaN 的設計考量

有鑑於消費電器、建築加熱、通風與空調 (HVAC) 系統以及工業驅動器的能源消耗，大家正努力透過如季節性能效比 (SEER)、最低能源效率標準 (MEPS)、Energy Star 和 Top Runner 等計畫，建立系統效率評等。

變頻驅動器 (VFD) 可在加熱和冷卻系統中提供最佳系統效率，尤其在能準確且廣泛控制速度的情況下，更是如此。VFD 使用逆變器控制馬達速度，以及高頻脈衝寬度調變 (PWM) 切換，以確實掌控變速。

雖然這類逆變器目前為使用絕緣閘極雙極電晶體 (IGBT) 和金屬氧化半導體場效電晶體 (MOSFET) 做為電源開關而得以實現，但有鑑於整體損耗偏高，其切換頻率和電力輸送均受到限制。不過，隨著寬能隙技術的進步，馬達驅動中的氮化鎵 (GaN) 式電源開關可協助提升功率密度、電力輸送與效率。

GaN 如何提高逆變器效率

GaN FET 產生的傳導損耗與 GaN 的導通電阻成比例，這與 MOSFET 相似。但就 IGBT 而言，傳導損耗需視切入電壓和動態導通電阻而定，而其通常會高於 GaN FET 或 MOSFET。

而就切換損耗而言，GaN FET 可提供比 MOSFET 和 IGBT 更低的損耗，原因如下：

- GaN 可提供零反向復原。在零反向復原下，即能以極高電流轉換速率 (di/dt) 和電壓轉換速率 (dv/dt) 切換 GaN FET。在 MOSFET 中，本體二極體受高零反向復

原影響，讓切換 di/dt 和 dv/dt 受到限制，並造成額外損耗和相位節點電壓振鈴。若使用 IGBT，即使增添最佳化的反平行二極體，仍可能會產生與反向復原相關的挑戰。

- 關閉時，IGBT 會受到少數載子復合電流 (通常稱為尾電流) 影響，而這會增加關閉損耗。GaN 沒有任何尾電流。
- GaN 可提供比 IGBT 和 MOSFET 更低的電容，進而減少電容切換損耗。
- 受到控制且更快的 di/dt 和受到控制的 dv/dt ，有助於在切換期間將電壓電流重疊損耗最佳化。

圖 1 顯示了 GaN 式、IGBT 式與 MOSFET 式解決方案在理論上的逆變器效率比較，其切換頻率為 20kHz，GaN 式逆變器的相位節點電壓轉換速率限制在 5V/ns，環境溫度則為 55°C。您可看到 GaN 解決方案可協助將功率損耗減少至少一半。

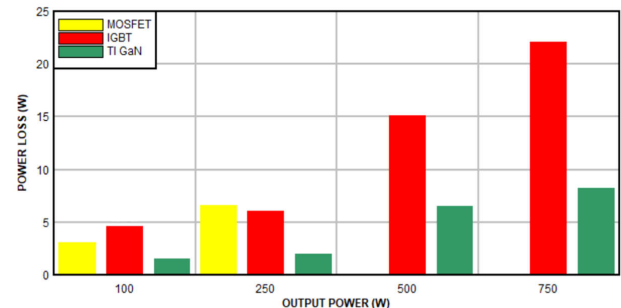


圖 1. GaN、MOSFET 與 IGBT 解決方案的效率比較。

圖 2 比較德州儀器 (TI) DRV7308 三相 GaN 智慧型電源模組 (IPM) 與 5A 額定峰值電流 IGBT IPM 的效率，其具備 20kHz 切換頻率的 300V_{DC} 電源，以及有 2m 纜線的風扇馬達，環境溫度則為 25°C，並且提供 0.85A 的均方根繞組電流及 250W 的逆變器輸出功率。GaN IPM 的電壓轉換速率設定為 5V/ns。

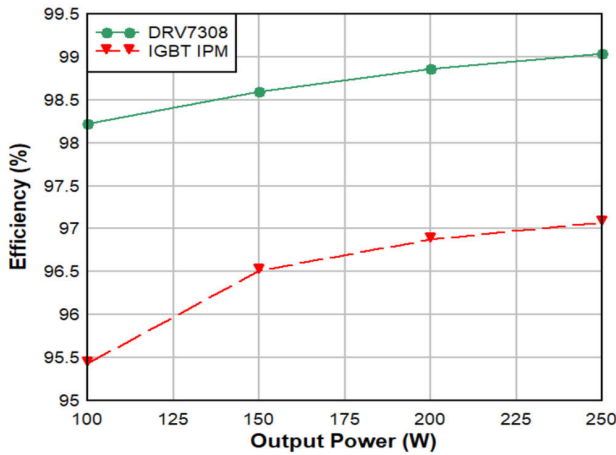


圖 2. DRV7308 和 IGBT IPM 在 250W 應用中的效率比較。

以 GaN 電源開關提升馬達性能

專為高速設計的永磁同步馬達或是電感較低的馬達，通常需要高 PWM 頻率以減少電流漣波並實現最佳馬達性能。這類終端設備的範例包括吹風機、鼓風機和泵。

馬達繞組中較高的電流漣波可能導致不必要的扭矩漣波、增加銅與磁芯損耗，以及讓切換期間所感測到的平均馬達電流不準確。

MOSFET 式或 IGBT 式 IPM 的額定使用頻率通常為 20kHz；但是由於切換損耗高，通常會在較低的切換頻率 (6kHz 至 16kHz) 下使用。即使在較低的 dv/dt 下，GaN 也可提供更低的切換損耗，因此能以更高的頻率進行切換，進而提升馬達效率和性能。

圖 3 顯示 DRV7308 的功能原理圖，其整合了所有 GaN FET 的前置驅動器，並且具備相位節點電壓的電壓轉換速率控制功能。DRV7308 能以四方扁平無引線 (QFN) 12mm x 12mm 封裝，協助三相調變、磁場定向控制驅動的 250W 馬達驅動應用，實現超過 99% 的逆變器效率，進而免除對散熱器的需求。

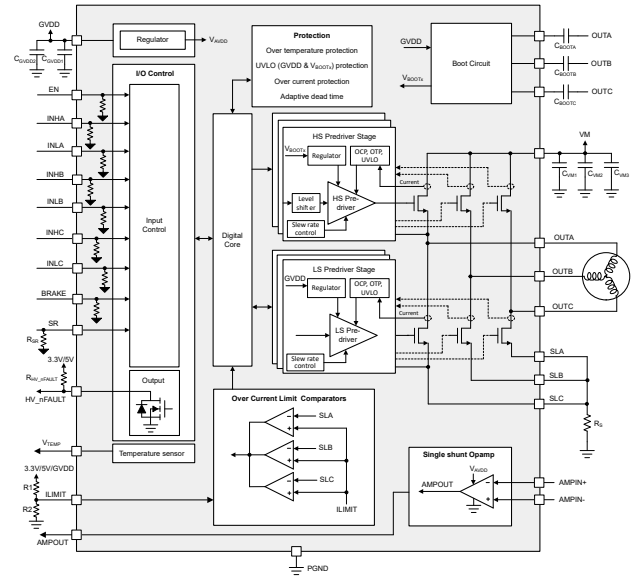


圖 3. DRV7308 功能原理圖。

在馬達驅動中使用 GaN 的設計考量

設計師通常必須考量 dv/dt 會對馬達絕緣、軸承使用壽命、電磁干擾 (EMI) 和可靠性有何影響。

DRV7308 納入了整合式前置驅動器電壓轉換速率控制電路，可控制相位節點的 dv/dt 。您可控制低至 5V/ns 的電壓轉換速率設定，並且可設定電壓轉換速率，以在馬達繞組絕緣與切換損耗最佳化間做出取捨。DRV7308 較低的電壓轉換速率設定涵蓋了現有 IGBT 提供的範圍，而較高的電壓轉換速率則有助於將切換損耗維持在更低的數值上。

圖 4 和 圖 5 顯示 DRV7308 在 1A 負載、300V 下的相位節點切換電壓，其電壓轉換速率設定為 10V/ns，且具有 2m 馬達繞線。較低寄生的 GaN FET 零反向復原和前置驅動器電壓轉換速率控制，有助於實現乾淨的電壓切換波形。

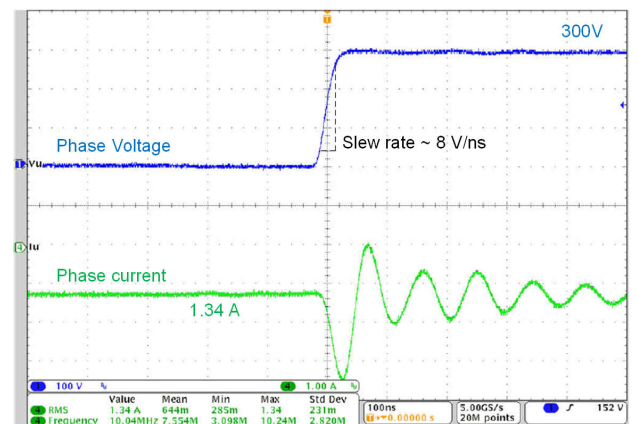


圖 4. 具有 2m 繞線與風扇馬達的相位節點電壓上升電壓轉換速率。

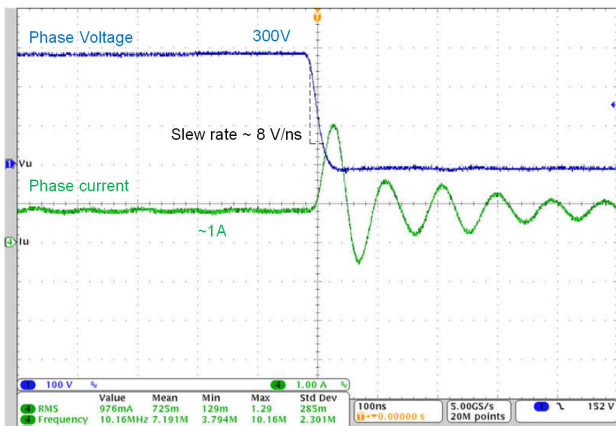


图 5. 具有 2m 纜線與風扇馬達的相位節點電壓下降電壓轉換速率。

對系統效率的影響

空調和製冷系統通常需要非常廣泛的速度控制能力，以實現最高的壓縮機和加熱系統效率。失效時間超過 1 μ s 且傳播延遲超過 500ns 的傳統 IPM，限制了最大和最小的操作 PWM 工作週期，並且會縮減操作速度範圍。較高的失效時間也會降低馬達的可用電壓，並增加用於進行相同電力輸送的馬達電流量。

DRV7308 提供適應性失效時間，其最大失效時間不到 200ns，而傳播延遲則低於 200ns，因此可協助設計師提升操作 PWM 工作週期範圍，進而提升速度範圍，同時也可增加馬達的可用電壓。舉例來說，可在空調系統中實現超低速至高速的能力，有助於設計師針對啟動設定最高的速度，進而加快系統冷卻和加熱的速度。接著，在達到設定溫度後，設計師可根據空調負載的變化，使用更精細的低速和能力控制。這種更精細的最佳負載點控制有助於提高系統效率。

超低失效時間與傳播延遲，以及低傳播延遲不匹配，可實現準確的平均電流感測，進而提升控制的準確度，對磁場定向控制驅動而言更是如此。圖 6 顯示傳播延遲對平均電流感測準確度的影響。在 PWM 期間，若於 PWM 開啟時間中途進行電流取樣，即可獲得每個 PWM 週期中的平均馬達電流。圖 6 也顯示了傳播延遲如何使電流感測偏離中值。電流感測誤差 (ΔI) 取決於傳播延遲、應用的電壓、PWM 切換頻率和馬達電感。就低電感馬達而言，誤差會偏高。電流感測誤差也會影響無感測器控制驅動器中的馬達位置感測 (估測器) 準確度。馬達位置估測誤差會導致馬

達效率降低。DRV7308 具有超低傳播延遲與傳播延遲不匹配，有助於實現準確的平均電流感測，並提升馬達效率。

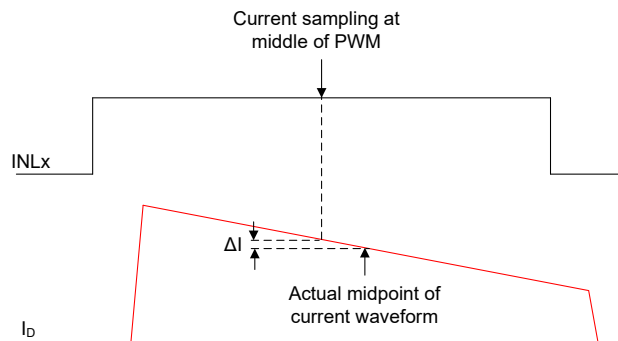


图 6. 傳播延遲對電流感測準確度的影響。

對噪音的影響

在馬達驅動系統中，噪音的主要來源之一是電流失真所造成的扭矩漣波。就馬達而言，電流失真取決於多項因素，包括 PWM 頻率、失效時間和電流感測準確度。

DRV7308 可大幅減少切換損耗，且相較於 IGBT 式或 MOSFET 式解決方案，可實現更高的 PWM 頻率。當切換頻率較高時，較低的繞組電流漣波即可實現低扭矩漣波，且超出可聽見的頻率範圍。

在 IGBT 式和 MOSFET 式系統中，失效時間為 1 μ s 至 2 μ s 以上，這會造成大量馬達電流失真。由於每 60 度的電氣角度就會發生失效時間失真，因此會造成電流波形有六次諧波，且通常會落在可聽見的頻率範圍中。DRV7308 的適應性失效時間邏輯可實現低於 200ns 的失效時間，所以能將電流失真降到最低，進而降低噪音。

圖 7 比較了在測試具有 0.2 μ s 失效時間的 DRV7308 與具有 2.5 μ s 失效時間的 IGBT IPM 時，馬達繞組電流的總諧波失真 (THD)。與 IGBT IPM 相比，DRV7308 的失真非常低。由於低工作週期或低逆變器調變指數 (此時失效時間的影響較大)，因此在較低的電力輸送下，IGBT IPM 的失真將呈指數級攀升。

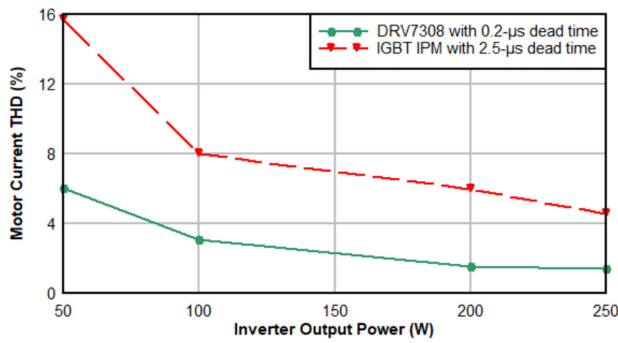


圖 7. 馬達電流 THD 比較與失效時間。

傳導放射與輻射放射考量

傳導放射與輻射放射端視切換頻率、 dv/dt 、 di/dt 、切換電壓振盪和反射，以及切換電流迴路區域而定。

DRV7308 整合了前述多種設計技術和印刷電路板 (PCB) 佈局選項，可因應 EMI 和電磁相容性方面的疑慮：

- **PWM 切換頻率。** 切換頻率越高，對 EMI 頻譜的影響越大。較高的切換頻率可協助減少電流漣波和電容器需求，以滿足傳導放射。DRV7308 提供廣泛的切換頻率，從超低值到高達 60kHz，均包含在內。設計師可依系統性能和 EMI 需求，選擇最佳頻率。
- **dv/dt 。** DRV7308 前置驅動器可控制相位節點切換電壓轉換速率，以滿足 EMI 要求。
- **di/dt 。** 透過零反向復原與低寄生，GaN 可提供更出色的切換性能，且在切換期間，不會於相位節點造成電壓過衝和振盪。圖 4 和圖 5 顯示了 DRV7308 乾淨的切換，這可讓 EMI 降低。
- **小規模的切換電流迴路區域。** 本機去耦電容器可在切換期間提供脈衝電流。DRV7308 的設計可讓 DC 電壓去耦電容器 (C_{VM}) 的切換電流迴路區域達到極小，如 圖 8 所示。

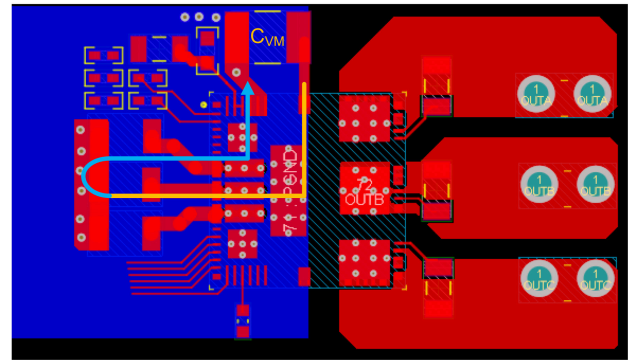


圖 8. DRV7308 的一般佈局參考，其中顯示了小規模的電流迴路區域。

對解決方案尺寸的影響

除了小巧的封裝尺寸與可移除散熱器外，DRV7308 還提供了高度整合，包括用於馬達電流感測的運算放大器、用於電流限制的三個比較器、溫度感測器以及一系列整套保護功能。相較於 IGBT 式或 MOSFET 式解決方案，前述整合可讓逆變器電路板尺寸縮減多達 55%。

尺寸縮減也讓逆變器可整合至馬達附近，而這在風扇、鼓風機和泵等應用實例中十分有益，並且可消除從逆變器電路板佈線至馬達的需求。無需使用前述纜線後，也可去除因纜線電容所造成的切換損耗，並且可緩解因漫長纜線所造成的傳導 EMI 和輻射 EMI。

受到保護且可靠的系統設計

GaN 需要更快速且可靠的過電流保護，以消除飽和。整合式保護可消除寄生效應，並且可提供僅有約數百奈秒的更快速回應。逆變器和馬達需要過電流保護，以避免在過載情況下發生熱失控。

以 230V_{AC} 線路供電的馬達驅動可提供高達 450V_{DC} 的整流 DC 匯流排電壓，包括從 AC 線路的電壓容差，或是透過使用有功功率因數校正電路。逆變器需要針對 450V 的操作電壓進行設計。部分馬達驅動需在短時間內處理較高的電壓，以因應馬達產生的反電動勢超過供應電壓，或是發生電感回衝的情況。逆變器也可能需要處理較高的關閉狀態阻斷電壓，以防止在發生過電壓情況時受損，例如發生輸入線路電壓突波或電氣快速暫態事件等。

DRV7308 的設計採用整合式汲極至源極電壓保護，可在發生過電流事件期間保護 GaN FET。其也具備可進行逐週期電流限制的整合式過電流比較器，這是專為具有 650V 關

閉狀態阻斷電壓額定值的 450V 操作電壓所設計。其他保護功能會監控故障情況，例如欠電壓、過電流與針腳對針腳短路等。

結論

DRV7308 等 GaN 式 IPM 的進步，可望持續協助提升電器和 HVAC 系統中的馬達驅動器功率密度、電力輸送和效率，同時節省系統成本並提升可靠性。

其他資源

- [DRV7308 三相位 650V、5A、GaN 智慧型電源模組產品規格表](#)
- [GaN IPM 產品組合](#)
- [進一步了解 TI GaN 技術](#)
- [PWM 切換頻率和調變指數對無槽永磁馬達之鐵損和性能的影響](#)
- [AC 電氣驅動的寬能隙裝置：機會與挑戰](#)

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