

# TI *Live!* TECH EXCHANGE

## Japan Automotive Day

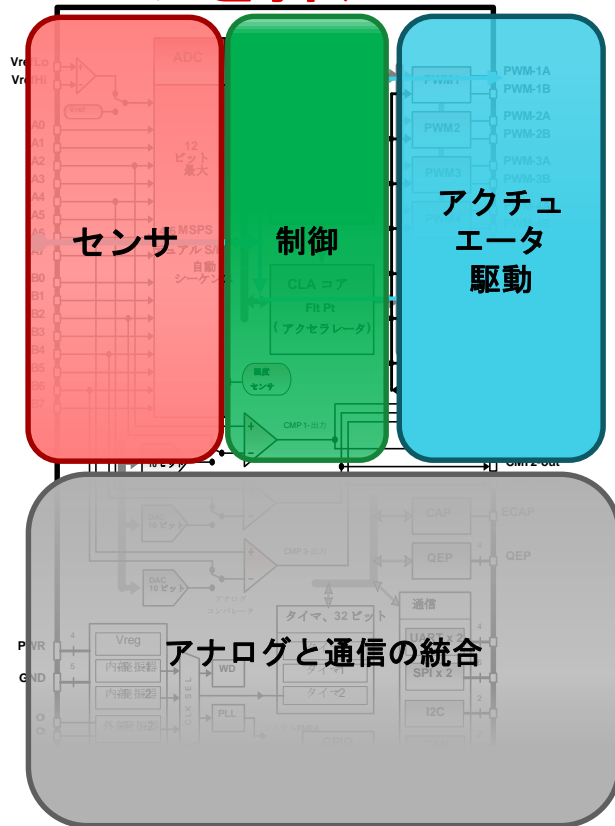
GaN とリアルタイムマイコンによる  
DCDC&OBC 高速制御と小型化

氏名 菅原 仁

# 概要

- オンボード充電（OBC）の各種トレンドと C2000™ マイコン
- OBC 向け PFC コンバータ
  - 単相トータムポール PFC 設計上の課題
  - 3 相 PFC 設計上の課題
- OBC の DC/DC コンバータ
  - CLLLC 設計上の課題
  - デュアル・アクティブ・ブリッジ (DAB) 設計上の課題
- 高電圧から低電圧への（HV-LV）コンバータ
  - ピーク電流モード制御（PCMC）により、DC ブロッキング・コンデンサが不要
- 統合のトレンド： シングル・マイコン・ソリューション

# パワー・エレクトロニクス向け アーキテクチャを採用した C2000™ マイコン







## リアルタイム制御の性能がトップクラス

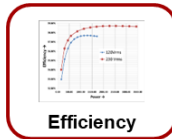
- 算術演算集約型の制御アルゴリズム向け高性能 C28x DSP コア
- インテリジェント・ペリフェラル (PWMs と ADC) は、20 年にわたって制御アプリケーション向けに最適化済み
- オン・チップ・アナログ統合
- 信頼性の高いソフトウェア・ライブラリ (デジタル電源 / モーター制御)
- OBC 関連の包括的なリファレンス・デザイン

# C2000™ リアルタイム・マイコンは EV の課題に対応



Power Density

- より高いスイッチング周波数 
- 制御ループのより高速な実行 (TMU、CLA)  
- 複数の高度なトポロジ 



Efficiency

- GaN と SiC の各パワー・デバイス
- 外部ロジックを使用せずに、アクティブ同期整流などの制御手法が使用可能
- オンチップのコンパレータ・サブシステムと PWM 機能により、最適なデッドタイム設定と位相の制御が可能



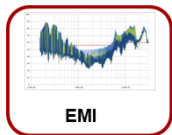
市場投入期間

- 3.3kW ~ 22kW の範囲で信頼性の高い一連のリファレンス・デザインが入手可能
- powerSUITE 活用で、プロトタイプ製作が迅速化
- SFRA (ソフトウェア周波数応答アナライザ) 活用でループ帯域幅を測定



コスト

複数の電力段制御、CLA を活用した複数の高度なトポロジと複数の制御手法



EMI

CISPR 25 Class B に適合。高度な手法採用で、EMI フィルタのサイズ縮小に貢献



Safety

ASIL B までの機能安全に関する認証取得済みデバイスを含め、幅広いデバイス製品ラインアップ



双方向制御

TMU の活用で V2G のような最新のコンセプトに対応でき、グリッド同期 (PLL) アルゴリズムを高速化

# OBC と DC/DC 変換の各アプリケーションに適した C2000™ リアルタイム・マイコン製品ラインアップ

将来を見据えた各種デバイス、コスト削減、パッケージ縮小



製品名	PWM	ADC	MIPS
TMS320F280025	14	16	100
TMS320F280049	14	21	200
TMS320F28377D	24	24	800
TMS320F28388D	32	24	925



将来を見据えた各種デバイス、PWM と ADC の各チャネル数増加、演算能力強化

# C2000™ リアルタイム・マイコン関連の 各種リファレンス・デザイン

## 双方向オンボード・チャージャ

6 スイッチ PFC  
CRD-22AD12N+



F28377D

DC/DC CLLLC  
CRD-22DD12N+



F28377D

+ Wolfspeed による設計

## 双方向 HV-LV DC/DC

TIDM-02009、DC/DC セクション  
400V - 12V、3.6kW DC/DC、PCMC



F28388D

3kW  
F280049

22kW  
F2838x

Vienna/T タイプ PFC  
TIDA-01606



F28377D

DC/DC デュアル・アクティブ・ブリッジ (DAB)  
TIDA-010054



F28377D

11kW  
F2838x

トータムポール PFC  
TIDA-01604



F280049

CLLLC 採用の DC/DC  
TIDM-02002



F280049

単一のコントローラ、  
GaN ベースの PMP22650



F28388D

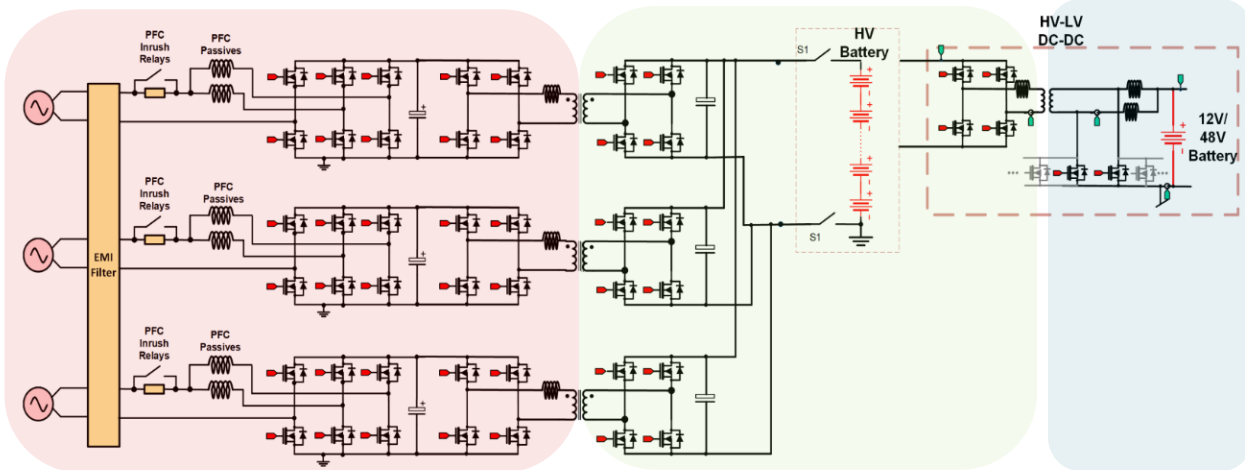


ソフトウェアは、次のツールの一部として入手できます。  
**C2000Ware-DigitalPower-SDK**  
TI-Designs 向け。

# 22kW OBC 対応の C2000™ マイコン (複数のモジュール型電力段)



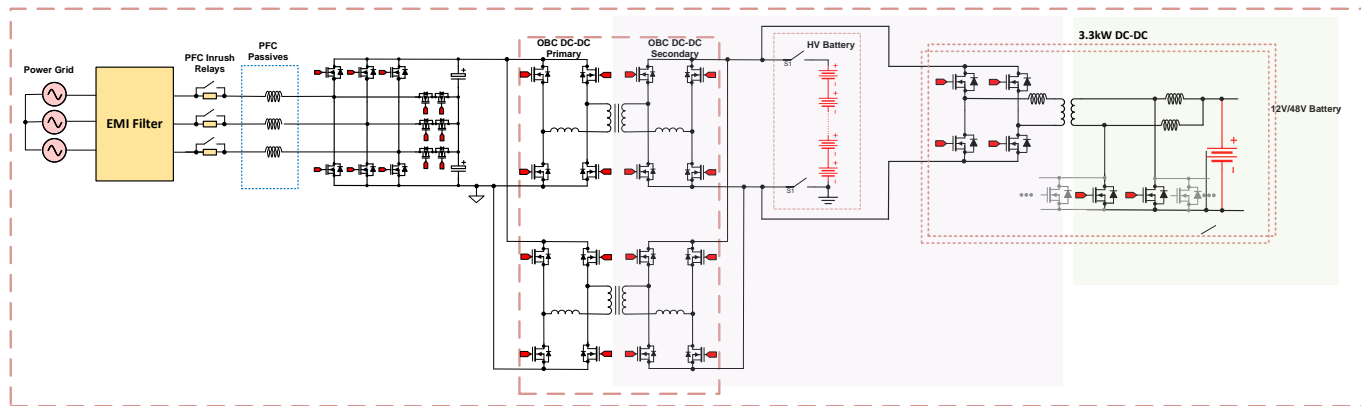
C2000™ コントローラのポートフォリオ  
F280024 から F2838xD までの製品は  
多様な電力レベルとアーキテクチャに対  
応



- 最小の絶縁コスト →
- モジュール型の開発 →
- 統合型ソリューション →

	OBC PFC	OBC DC/DC	HV-LV DC/DC
最小の絶縁コスト	3 x F280025	3 x F280025	1 x F280025
モジュール型の開発	3 x F280049		1 x F280025
統合型ソリューション	F28388D		

# 22kW OBC 対応の C2000™ マイコン (モジュール型ではない複数の電力段)



**C2000™** コントローラのポートフォリオ  
 F280025 から F28388D までの製品が  
 対応する多様な電力レベルとアーキテクチャ

	OBC PFC	OBC DC/DC	HV-LV DC/DC
最小の絶縁コスト →	<b>F280049</b>	<b>F280049</b>	<b>F280049</b>
モジュール型の開発 →	<b>F28388D</b>		<b>F280049</b>
統合型ソリューション →	<b>F28388D</b>		



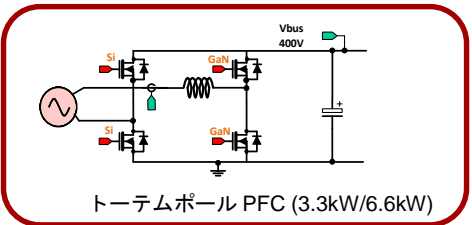
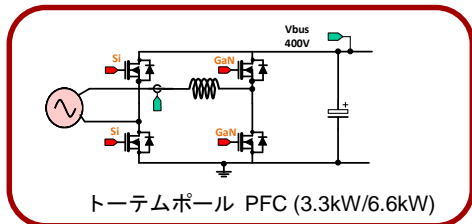
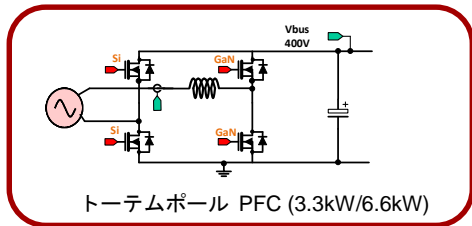
# OBC 向け PFC コンバータ

単相 PFC

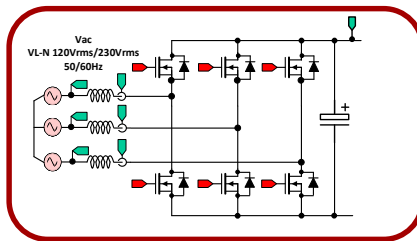
3相 PFC

# 11kW ~ 22kW の OBC 向けの PFC 選定

## 複数のモジュール型電力段

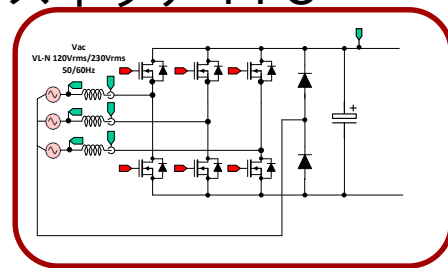


## 6 スイッチ PFC



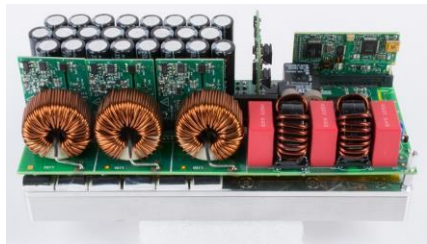
必要なのは、電力を  
1/3 にディレーティング  
これは単相動作の場合

## 4 番目のレッグを採用した 6 スイッチ PFC



全負荷のフローに対応できる  
ように、バス・コンデン  
サの適切なサイズ設定が必要

# OBC 向け 1 相 PFC 設計上の課題



TIDA-01606



## 信頼性の高いグリッド同期機能を実装

- トーテムポール PFC は、高精度でノイズのないグリッド角度情報を必要とします。
- **C2000™** マイコンの特長: 三角関数算術演算ユニット (TMU) は、必要な SPLL 計算の高速化に役立ちます。



コスト

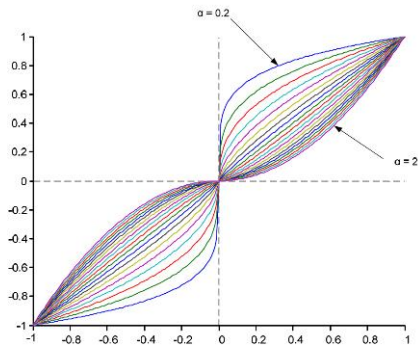
## 高度な制御機能を使用して力率を改善

- 入力コンデンサは力率の低下を招きます。DPLLVC のような高度な制御機能を使用すると、入力コンデンサに起因する誤差を打ち消し、達成可能な力率を改善することができます。
- **C2000™** マイコンの特長: 32 ビット浮動小数点演算ユニットは制御演算を簡素化。

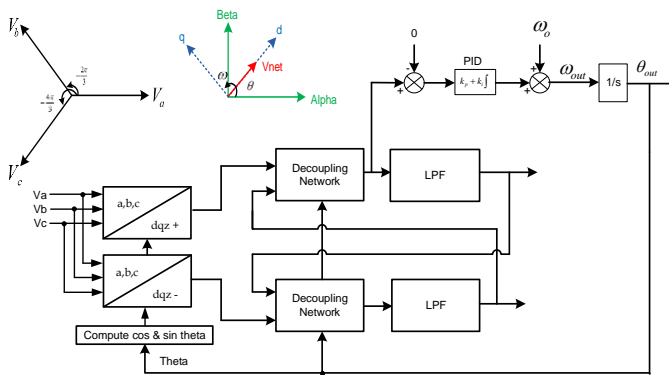
# 三角関数算術演算ユニットを活用して 制御の困難な課題に対処可能

- sin、cos、その他の三角関数演算を高速化するための専用命令セット。
- 難易度の高い高速負荷スイッチング・アプリケーションで、対数、べき乗、指数の各算術関数に対応するハードウェア・アクセラレーションを活用し、高速過渡応答を実現できます。

非線形制御（対数、べき乗、指数）  
を使用する高速過渡対応



sin、cos、atan のアクセラレーションを  
使用する高度な制御



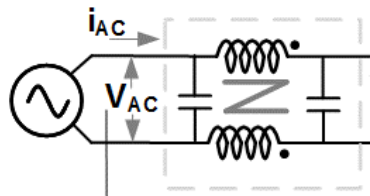
TMU 演算	パイプラインの サイクル数
Sin	4
Cos	4
Atan	4
2π で除算	2/3
2π の乗算	2/3
平方根	5
指数 (type1)	5
対数 (Type1)	5

フェーズ・ロック・ループ  
を 30% 高速に実行

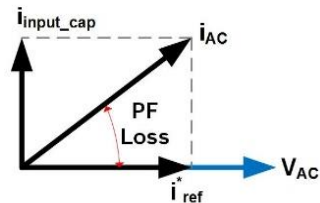
C28x FPU	C28x FPU + TMU
455	315

# トータムポール PFC 設計上の課題： 力率の改善

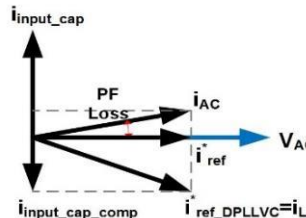
PFC 入フィルタ



無効電力が原因で PF 損失が生じる



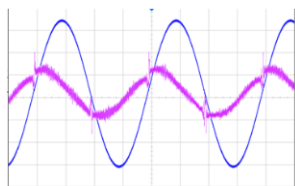
基準ベクトルをシフトすると無効電力を打ち消せるが、グリッド角度に対処するための PLL 演算が必要



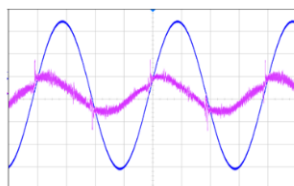
$$i_{ref\_DPLLVC}^* = i_{ref}^* \sin(\omega t) - i_{input\_cap\_comp} \cos(\omega t)$$

$$i_{AC} = i_{ref} \sin(\omega t) + (i_{input\_cap} - i_{input\_cap\_comp}) \cos(\omega t)$$

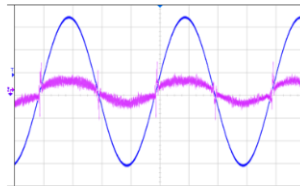
結果



No Adjustment Applied

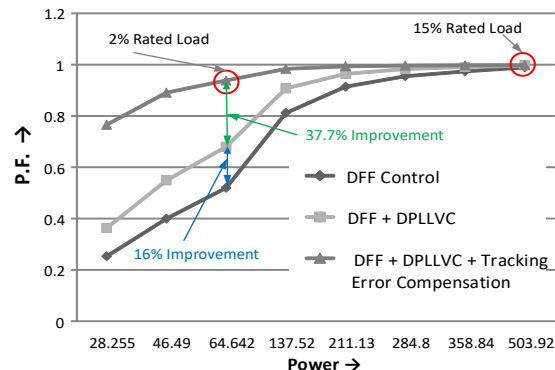


With DPLLVC

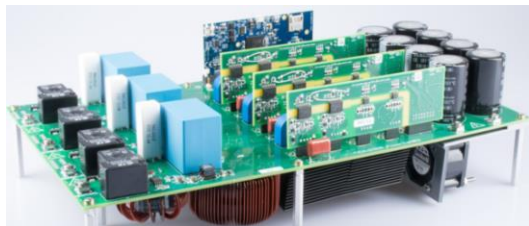


With DPLLVC + TC

テスト波形: 電圧 (青) と電流 (ピンク)  
テスト条件:  $V_{in} = 230\text{vrms}$ 、 $P_{out} = 64.80\text{W}$



# OBC 向け 3 相 PFC 設計上の課題



TIDA-010039



コスト

## 位相電流に対する保護モード制御の実装

- 保護機能を実装するには、複数のコンパレータ（最大 6 個）と、DAC（最大 2 個）を使用する基準電圧が必要です。
- **C2000™** マイコンの特長：コンパレータ・サブシステムを使用すると、外部回路なしで保護機能を追加できます。



市場投入期間

## DQ ベースのシステムでループ帯域幅を測定

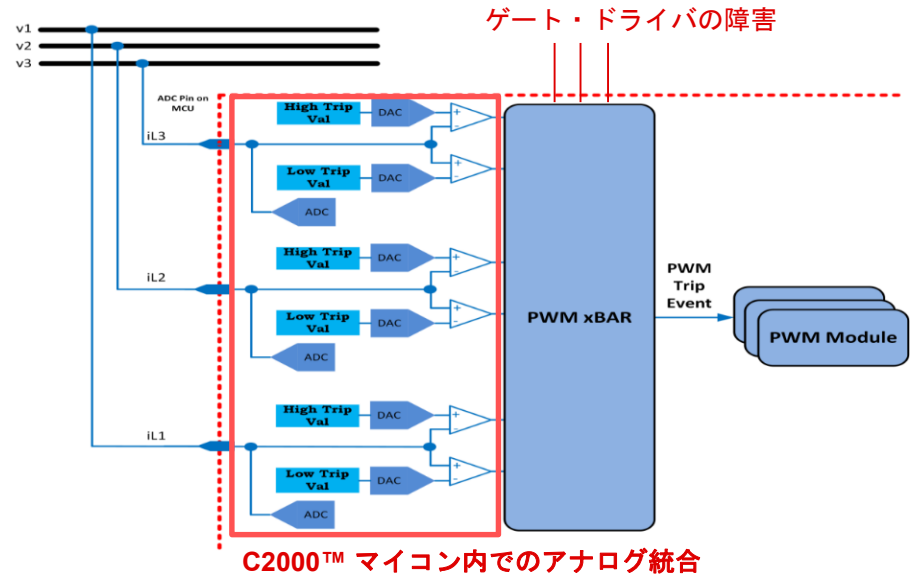
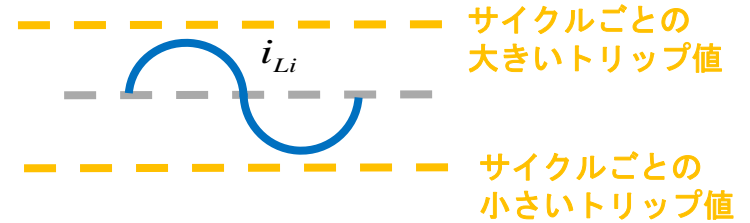
- ボード上に物理的な制御変数が存在していないので、DQ ベースの制御向けに制御ループの性能を測定する場合、従来型のツールは使用できません。
- **C2000™** マイコンの特長：ソフトウェア周波数応答アナライザ (SFRA) を活用するとループ応答を測定でき、システムの設計と試験が容易になります。

## グリッド角度検出を高速化するためにフェーズ・ロック・ループを実行

- PLL を使用してグリッド電圧を高精度推定すると、ノイズ耐性の向上と歪みの低減を実現できます。
- **C2000™** マイコンの特長：三角関数算術演算ユニット (TMU) は三角関数の演算を迅速に実行し、PLL 演算を高速化して性能の向上を可能にします。

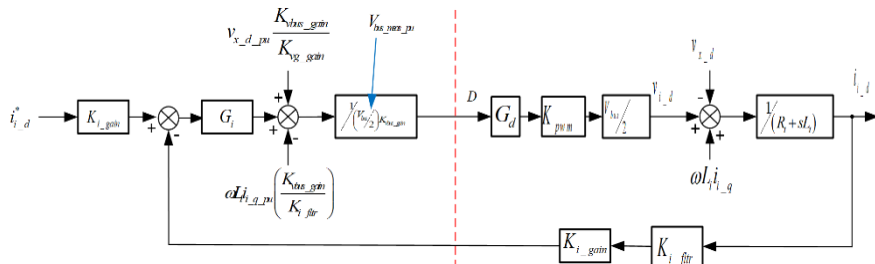
# 高度な保護機能の実装

- 統合型のコンパレータ・サブシステム (CMPSS) を使用すると、ボード上の追加部品やデバイスの追加ピンを使用せずに、保護機能を実現できます。
- xBAR タイプのメカニズムは、3つの電流入力の比較結果を組み合わせ、PWMトリップ向けの信号を生成します。
- INPUTXBAR を使用してゲート・ドライバの障害など追加のトリップを管理することもできます。

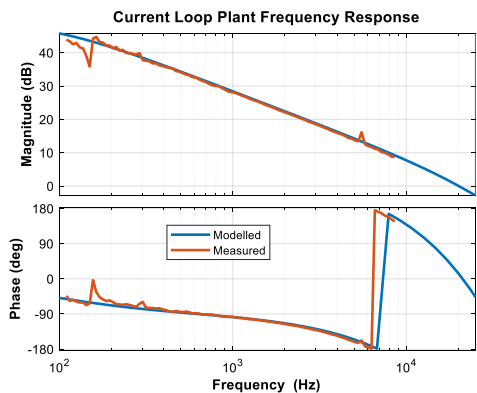


# 制御ループの性能測定に使用できるソフトウェア周波数応答アナライザ (SFRA)

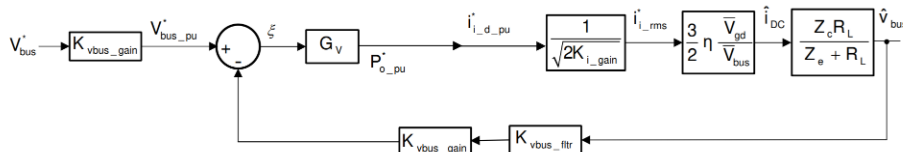
電流ループ・モデル



SFRA 測定結果とモデル化した TIDA-01606 の比較



電圧ループ・モデル



TIDA-01606、Vbus 800V、Vac 230V のスタートアップ波形





# OBC の DC/DC コンバータ

CLLLC

DAB

# OBC と DC/DC 変換の設計上の課題



TIDM-02002



同期整流の実装により、電力損失を最大 2% 低減できますが、実装は高難度です。

- 6.6kW の場合、120W の電力損失
- 11kW の場合、220W の電力損失
- **C2000™ マイコンの特長**：外部ロジックの必要なしで、同期整流方式を実装できます。
  - ヒートシンク要件の低減
  - 電力効率が向上
  - 電力密度が向上

## 高い PWM スイッチング周波数でサイズを低減

- スイッチング周波数を高くすると、磁気素子のサイズを最大 60% 縮小できます。
- **C2000™ マイコンの特長**：位相シフト、周波数、デッドバンド、デューティを高分解能で制御し、高精度制御を実現できます。
  - PWM 周波数が高くなり、複数のブリッジが更新されるので、グローバル・リンクと負荷のような PWM の機能を活用して、CPU の負荷を低減することができます。



Volume ≈ 165.8 cm<sup>3</sup>



148 kHz – 300 kHz

Inductor (2x): 3.9 cm x 2.9 cm x 4.5 cm  
Transformer: 5.0 cm x 3.2 cm x 4.0 cm

62% Higher Frequency

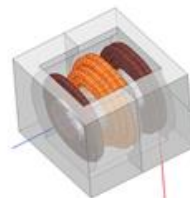
6.6kW  
SiC



58.5% size Reduction

6.6kW  
GaN

Volume ≈ 68.8 cm<sup>3</sup>



250 kHz – 800 kHz

Transformer and inductors (2x):  
4.4 cm x 4.6 cm x 3.4 cm

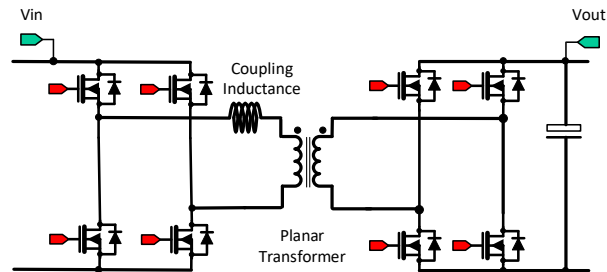


# デュアル・アクティブ・ブリッジを使用した 高分解能の位相シフト

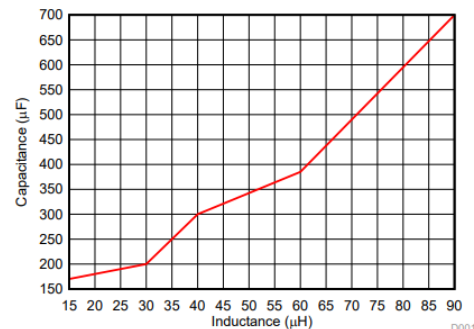
- 単一の位相シフト DAB 内の電力伝送は、結合インダクタンス (L) の値、スイッチング周波数 (Fs)、および位相 ( $\theta$ ) に関連しています。
- 目標の電圧リップルを達成するために必要な出力コンデンサ  $C_L$  は、スイッチング周波数、インダクタンス、および位相シフトに依存します。
- 100kHz のスイッチング周波数と 35 $\mu$ H の漏れインダクタンスを実現すると、電力密度が向上します。
- 高分解能の位相シフトを使用すると、高い電力密度と効率を実現し、DAB トポロジが可能になります。

$$P_{output} = \frac{nV_{in}V_{out}\theta(\pi - \theta)}{2\pi^2F_sL}$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{8F_sLP_{out}}{nV_{in}V_{out}}\right)} \right]$$



特定のリップル達成に必要な出力コンデンサと結合インダクタの対比



$V_{in} = 800V$ 、 $P_{out} = 10,000W$ 、 $F_s = 100kHz$	出力電圧	必要な位相シフト (ナノ秒: ns)
$\varphi = 29.4169$ 度	400	817.14
$\varphi = 29.2353$ 度	402	812.09
$\varphi = 29.0560$ 度	404	807.11
$\varphi = 28.879$ 度	406	802.19
$\varphi = 28.7042$ 度	408	797.34

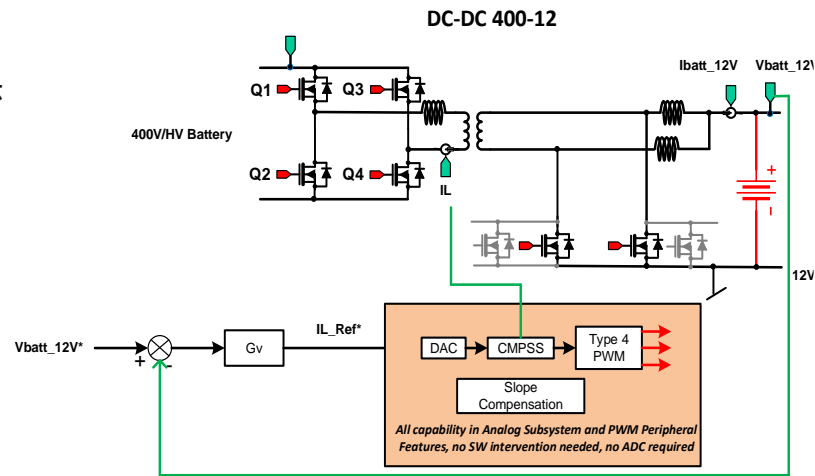
# 高電圧から低電圧への DC/DC (HV-LV DC/DC) コンバータ

# HV-LV DC/DC コンバータ設計上の課題

HV-LV の DC/DC 段として PSFB (位相シフト・フルブリッジ) が一般的に使用されています。電圧モード制御の平均電流を使用する場合、DC ブロッキング・コンデンサが必須になりますが、以下の理由によりこの手法は推奨できません。

- そのコンデンサが伝達する高周波電流に対応できる定格が必要です
- 無極性であることが必要です。
- 両端間に発生する可能性のあるワースト・ケース電圧に耐える定格が必要です。
- 電圧が 0 の場合に比べて、フリーホイール期間 (Toff) 中にそれよりかなり迅速に減衰する循環電流を発生させる結果になります。
- 次のサイクルの開始時 (QA と QB、または PA のレッグ) に ZVS 遷移を駆動するために使用できるエネルギーが減少し、ZVS 動作の難易度が上昇します。

したがって、DC ブロッキング・コンデンサを不要にするために、一般的に PSFB でピーク電流モード制御 (PCMC) を使用します。この目的で、内部電流ループは純粋にアナログ形式で動作させる必要があります。C2000™ リアルタイム・マイコンは高度なアナログ統合を実現しているので、デジタル・マイコンと組み合わせてこのループを動作させることができ、設計者はアナログとデジタルの両方で最善の成果を実現できます。



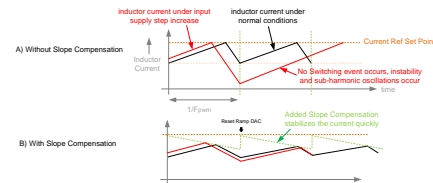
TIDM-02009 DC/DC



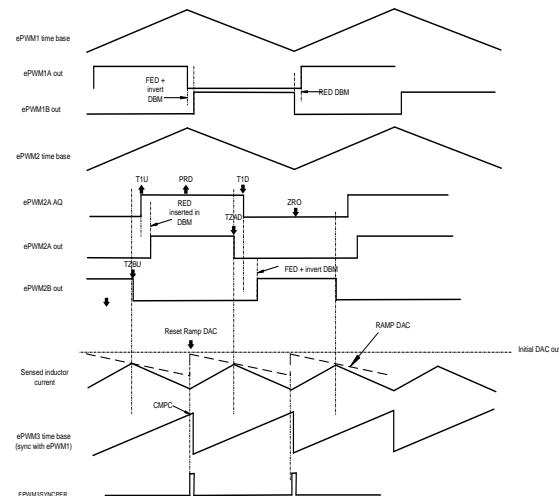
# PCMC 対応の C2000™ マイコン・ソリューション

- ピーク電流モード制御 (PCMC) を使用する場合、分数調波発振を防止するために、スロープ補償が必要です。
- 内部 DAC 向けのランプ生成機能を搭載したコンパレータ・サブシステムを使用すると、ソフトウェアなしで内部電流ループを実装することができます。
- Type 4 PWM を使用すると、コンパレータ・イベントが発生した後にデッドタイムを挿入できるので、負荷に合わせたデッドタイムの最適化が可能です。

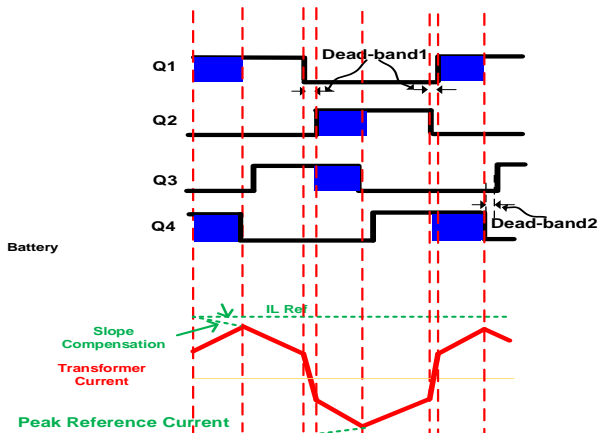
## PCMC にはスロープ補償機能が必要



## PSFB で Type-4 PWM を使用する実装



## PCMC 採用 PSFB



	要件
PSFB ピーク電流 モード制御	スwitching周波数: 100 kHz 制御周波数: 100 kHz MIPS: 30 ADC: 5 ~ 6、 PWM: 6、 CMPSS: 3
	TIDM-02002 (F28004x) TIDM-02009 – DC/DC (F28388x)

**統合に関する課題:**

**シングル・マイコン・ソリューション**



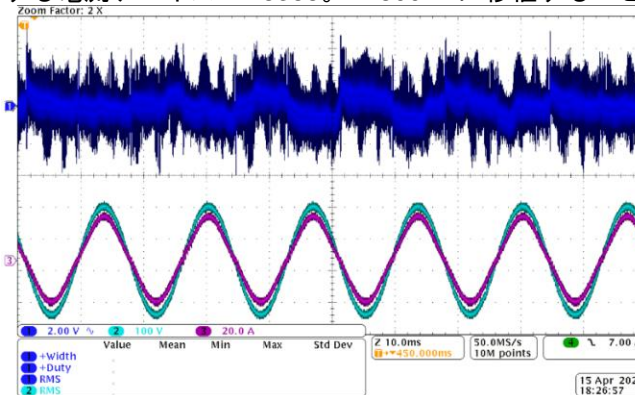
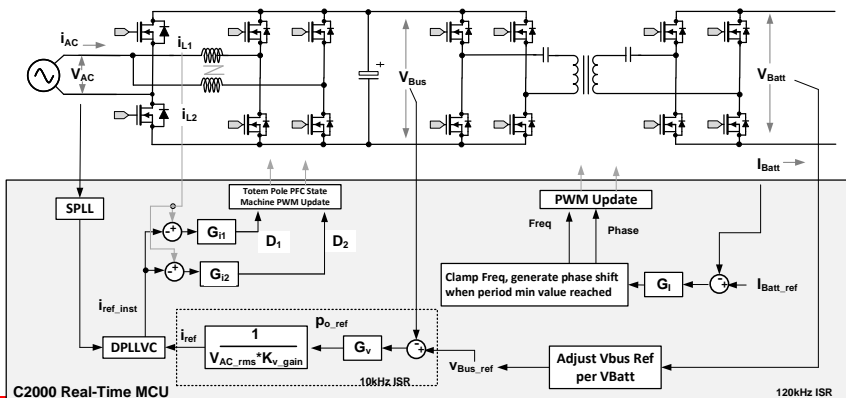
# TI の GaN FET を使用する シングル・マイコン・ベースの OBC



## マイコンの使用法

- RAM: 20 kB
- フラッシュ: 40 kB
- MIPS: 170、制御向け
- ISR1 120kHz、PWM に同期：高速な PWM 更新 (6 ~ 7MIPS)
- ISR2 120kHz: PFC 電流制御 + CLLLC 制御コード (146 MIPS)
- ISR3 10kHz: PFC 電圧ループ、計測 (16MIPS)
- ADC チャンネル: 14
- PWM: 14
- GPIO: 32 (SFRA SCI 2、CAN 2、LED 2、GaN テレメトリ 19、突入リレー 1)

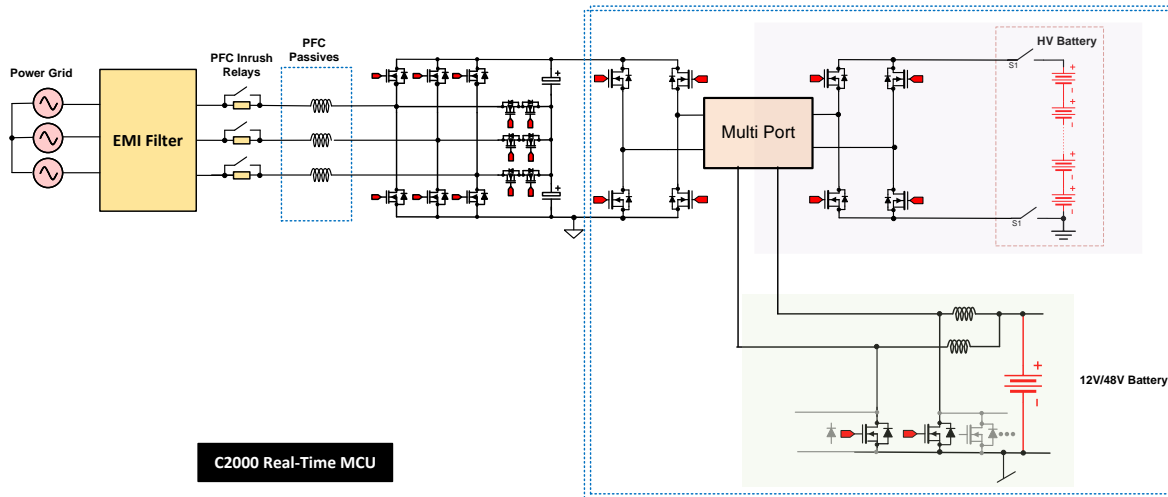
使用する電流デバイス: F28388。F28004x に移植することも可能。



Vac 120Vrms,  
50Hz  
Vbatt 350V  
Pload 2kW

# 電力段の統合

- OBC と HV-LV DC/DC の間で電力段を統合すると、コストを削減できます。
- HV-LV の DC/DC と OBC の DC-DC をさらに詳細に制御するために、単一のマイコンを使用することができます。その場合、コスト削減とデザインの簡素化を実現できます。
- C2000™ マイコンの幅広いデバイス製品ラインアップを活用して、システムを複数の方法で分割し、目標の統合方法を実現することができます。



# 設計リソース

- [Achieving High Efficiency and Enabling Integration in EV Powertrain Subsystems Using C2000™ Real-Time MCUs](#)  
(英語) ホワイト・ペーパー
- [PMP22650、GaN ベース OBC のリファレンス・デザイン](#)
- [TIDM-02008](https://www.tij.co.jp/tool/jp/TIDM-02008)、“(<https://www.tij.co.jp/tool/jp/TIDM-02008>) C2000™ マイコンを使用した双方向インターリーブ CCM トーテムポール・ブリッジレス PFC のリファレンス・デザイン”
- [TIDM-02002](https://www.tij.co.jp/tool/jp/TIDM-02002)、“(<https://www.tij.co.jp/tool/jp/TIDM-02002>) HEV/EV のオンボード・チャージャ向け、双方向 CLLLC 共振デュアル・アクティブ・ブリッジ (DAB) のリファレンス・デザイン”
- [TIDM-02000](https://www.tij.co.jp/tool/jp/TIDM-02000)、“(<https://www.tij.co.jp/tool/jp/TIDM-02000>) C2000 リアルタイム・マイコンを使用したピーク電流モード制御の位相シフト・フル・ブリッジのリファレンス・デザイン”
- [TIDA-01606](http://www.tij.co.jp/tool/jp/TIDA-01606)、“(<http://www.tij.co.jp/tool/jp/TIDA-01606>) 3 レベル、3 相、SiC AC/DC コンバータのリファレンス・デザイン”
- [デジタル電源 SDK](#)
- [Essential Guide for Developing with C2000™ Real Time MCUs](#) (英語)

# TI *Live!* TECH EXCHANGE

## Japan Automotive Day

GaNとリアルタイムマイコンによる  
DCDC&OBC高速制御と小型化

氏名 内原 将幸

# Agenda

- xEV トレンド
- GaN FET の基礎
- TI GaN デバイス
  - 直接駆動アーキテクチャ
  - 車載認証
  - 信頼性試験と厳格な試験
- 設計ツールとリファレンス・ソリューション
  - 上面冷却型パッケージ向けの各種リソース
  - 6.6kW オンボード・チャージャ (OBC) のリファレンス・デザイン
  - 22kW, 800V の設計コンセプト

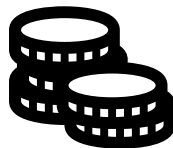
# HEV/EV Trends OBC & High-Voltage DC/DC

## 高電力密度

1-2kW/Liter →  
3-5kW/Liter



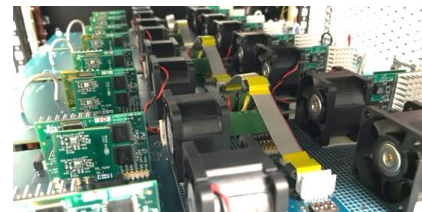
## 低コスト



## 開発時間の短縮



## 高信頼性



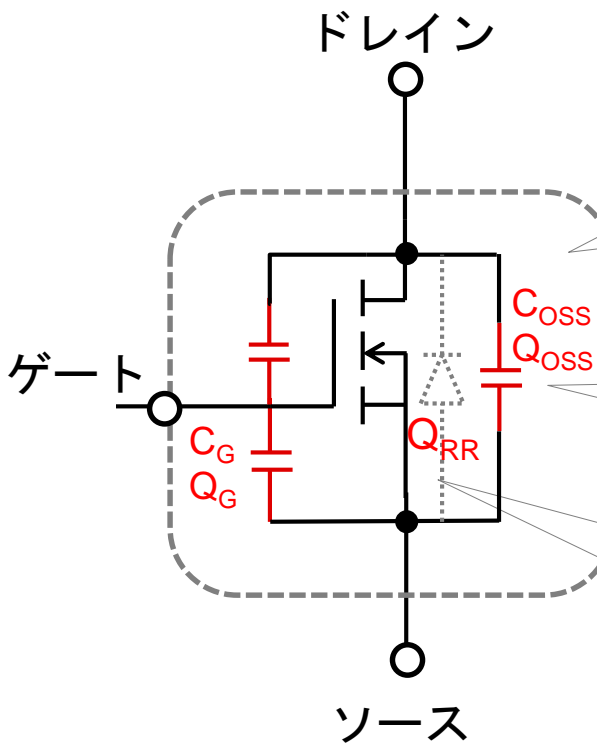
### システム・レベル設計での複数の新しい課題

- **OBC:** 高電力密度の要求
  - V2G/V2L 向けの双方向電力のサポート
  - 急速充電のための 800V バッテリーのサポート
- **DC/DC:**
  - サイズ縮小とコスト削減
  - ASIL に対応できる冗長型設計
  - システムの発熱と性能に関するアクティブ監視

- 多様な OBC の要求
  - 3.3 ~ 22kW
  - 400 ~ 800V
  - これらを一意に満足できるシステムの要求
- 多分野の専門知識
  - 制御
  - Power stage
  - 磁気素子

- 素子レベルと電源レベルの信頼性
- ワイド・バンドギャップ半導体におけるさまざまな規格準拠
- システムの信頼性向上に役立つ堅牢な各種部品

# Basic GaN FET



**Low  $C_G, Q_G$**  ゲート静電容量/ゲート電荷 (1 nC- $\Omega$  vs Si 4 nC- $\Omega$ )

- ✓ より高速なターンオンとターンオフで、スイッチング周波数が高速化
- ✓ ゲート・ドライブ損失の低減

**Low  $C_{OSS}, Q_{OSS}$**  出力静電容量 / 出力電荷 (5 nC- $\Omega$  vs Si 25 nC- $\Omega$ )

- ✓ より高速なスイッチング、より高いスイッチング周波数
- ✓ スwitching損失の低減

**Low  $R_{DS(ON)}$**  (5 m $\Omega$ -cm<sup>2</sup> vs Si >10 m $\Omega$ -cm<sup>2</sup>)

- ✓ より小さい導通損失

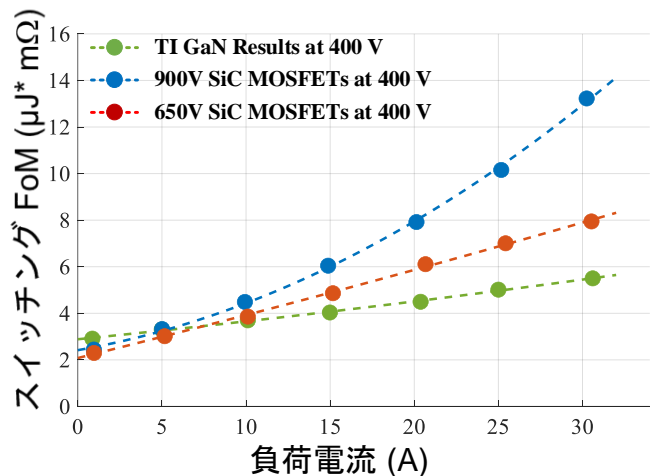
**Zero  $Q_{RR}$**  No 'body diode'

- ✓ 逆回復損失なし
- ✓ スイッチ・ノードのリングングと EMI をそれぞれ低減

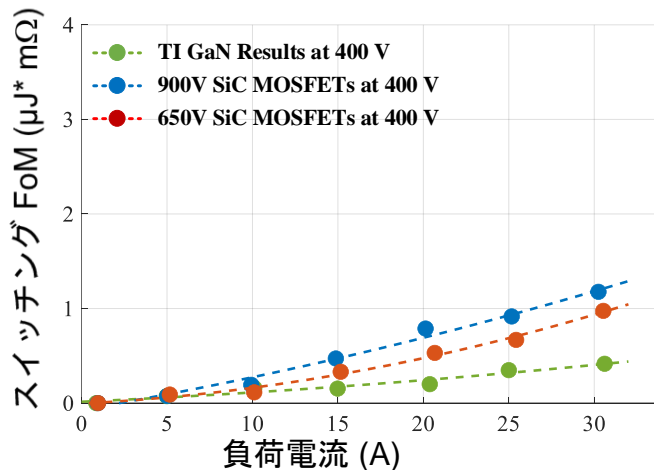
# GaN VS SiC

性能指標 (FoM) = Switching Energy ( $\mu\text{J}$ ) \*  $R_{\text{DS,ON}}$ @125°C ( $\text{m}\Omega$ )

The smaller, the better!

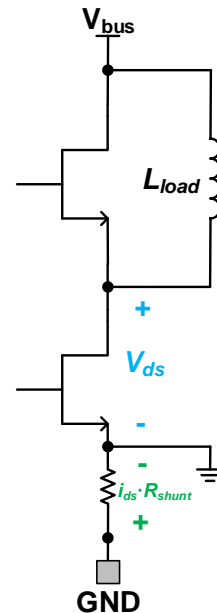


ハード・スイッチング性能指標 (FoM)  
(ターンオンとターンオフの損失 +  $C_{\text{oss}}$  と  
 $\text{QRR}$  による損失)



ソフト・スイッチング性能指標 (FoM)  
(ターンオフ損失のみ、ターンオン時の  
 $\text{ZVS}$ )

ダブル・パルス試験

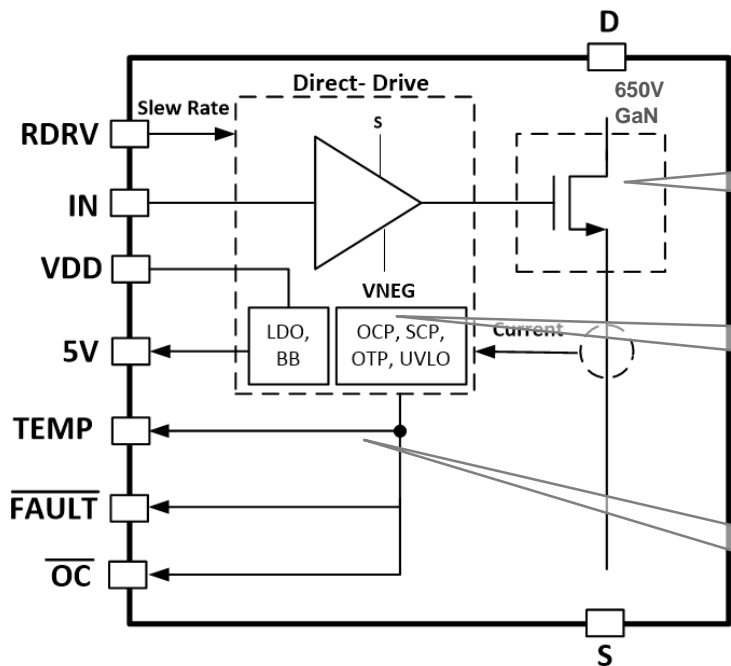




# GaN に関する TI のアプローチ

特長と信頼性

# ドライバー内蔵 GaN FET: LMG3522R030-Q1



<http://www.tij.co.jp/product/jp/LMG3522R030-Q1>

650V GaN FET 30mΩ

**2.2MHz** ゲート・ドライバを内蔵

- 寄生インダクタンスを最小化
  - (<1nH common source; <4H gate-loop)
- Adjustable slew rate (30 -150 V/ns)

内部昇降圧と内部 LDO

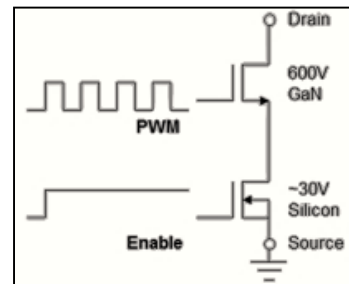
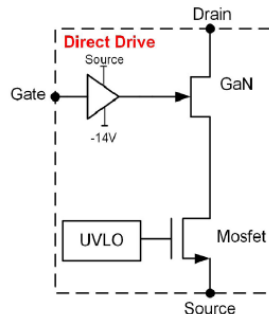
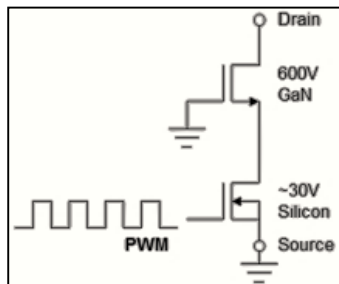
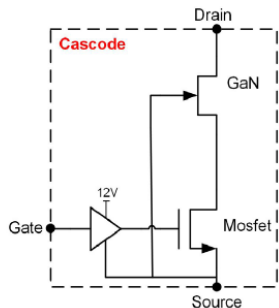
- VDD: 7.5 ~ 18V
- 5V 出力
  - **デジタルアイソレータ**や周辺回路への供給用

内蔵保護機能 :

- GaN FET の温度 **デジタル PWM レポート**
  - アクティブなパワー・マネージメント
- 過電流 (OCP)、過熱 (OTP)、短絡保護機能 (SCP)

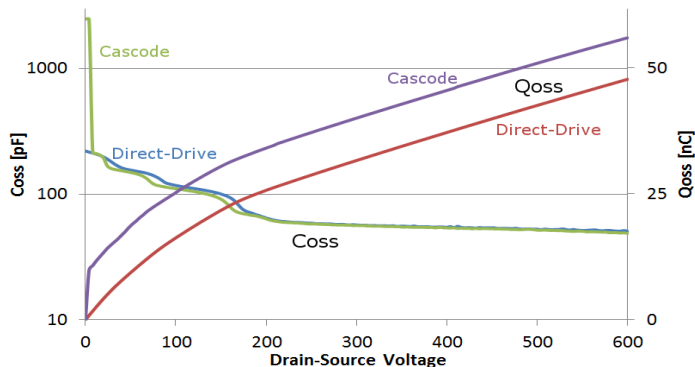
# 直接駆動とは

## 一般的なカスコード D モード GaN



カスコードの  $C_{OSS}$  は、シリコン FET の  $C_{OSS}$  と GaN FET の  $C_{GS}$  の和。

$V_{DS} < 10V$  の場合、 $C_{OSS}$  は大きい。ZVS を実施していない場合、損失は大きい。

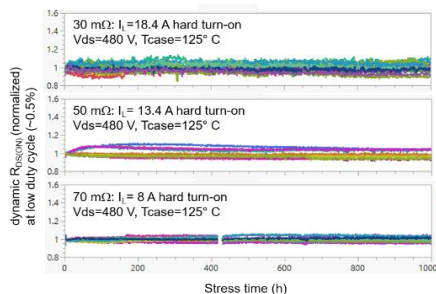


400V 動作時に 直接駆動を採用すると  $Q_{OSS}$  が少なくとも 20% 減少。

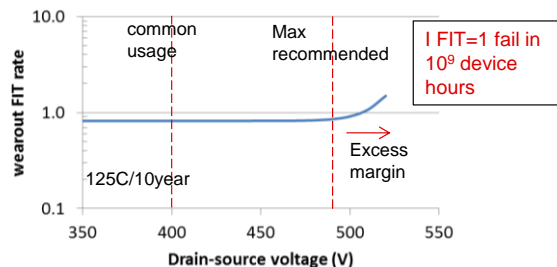
100ns 未満のデッドタイムが可能。

# TI GaN の認証と信頼性の概要

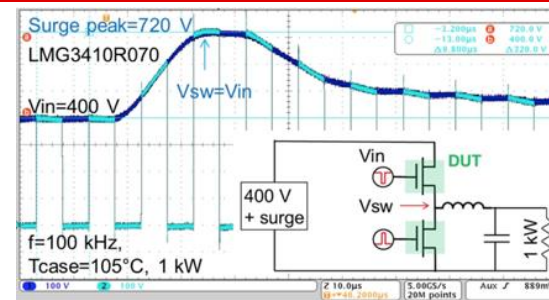
## 電源の信頼性



## 本質的に信頼性の高い GaN



## 堅牢な設計



- Component level
  - JESD47 and AEC-Q100 Grade 1 Qualification
- Power-supply level
  - JEP-180
  - すべての GaN製品は、電源回路で使われることを前提としている認証を取得

- 時間依存のブレークダウンに関する 180 万時間の信頼性試験のデータによると、 $125^\circ$  C で 10 年にわたる試験で 1 未満の Fit (故障率) を達成。
- ハード・スイッチング動作時に、ホット・エレクトロン (高温電子) による劣化に対処し、10 億年を上回るスイッチング寿命を達成。

- 720V 最大サージ電圧設計。
- 過電流および過熱等の保護機能を GaN FET に内蔵。

# LMG3522R030-Q1 の車載認証取得方針

AEC-Q101 ではなく AEC-Q100 を重視する理由

## 1. AEC-Q100 グレード 1 認証の対象

- ✓ デバイスのコア機能
- ✓ 内蔵のドライバや各種機能
  - Driver を内蔵し GaN FET を IC とすることで、車載認証に対する TI の知識を盛り込んだ GaN FET を提供できます。
  - 特に追加を行わない場合、早期故障率、ラッチアップ、不揮発性メモリの電源サイクル (電源オンとオフ) は Q101 認証に規定がありません。

## 2. AEC のパワー MOS 認証に基づく追加のテスト

- i. 推奨最大動作電圧の  $V_{ds}$  を印加した HTOL (高温動作寿命) と HAST (高度加速寿命試験) の各試験
- ii. GaN FET のゲートに対しても、最大仕様に関する試験

## 3. GaN に関する各種最新規格や最新故障モードに基づく、電源レベルでの付加的な試験

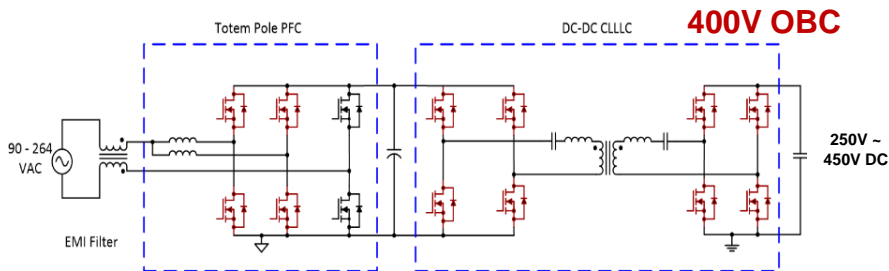
- i. 動的な  $RDS_{on}$  安定性と動的な HTOL (高温動作寿命)
- ii. ボード・レベルの信頼性試験

# TI GaN を用いたリファレンスデザイン

# TI GaN: 6.6kW, 400V 双方向オンボード・チャージャ

## デザインの特長

- 双方向の電力に対応する2相インターリーブ PFC+CLLLC
- C2000™ を使用し、両方の段を単一 DSP で制御
- DC/DC に適したマルチモード制御アルゴリズムを採用した結果、高い動作周波数を使用可能 – 周波数変調と位相変調 / パースト・モード
- 共振インダクタをトランスに内蔵し、BoM (部品表) 点数を低減
- 2相インターリーブ PFC に適した結合型インダクタ採用で、BoM (部品表) 点数を低減
- 800V バッテリ OBC への拡張を考慮したデザインコンセプト



## 設計の各種利点

- DC/DC の磁気素子を 59% 小型化し、SiC に比べてもコストを削減
- SiC より高い電力密度

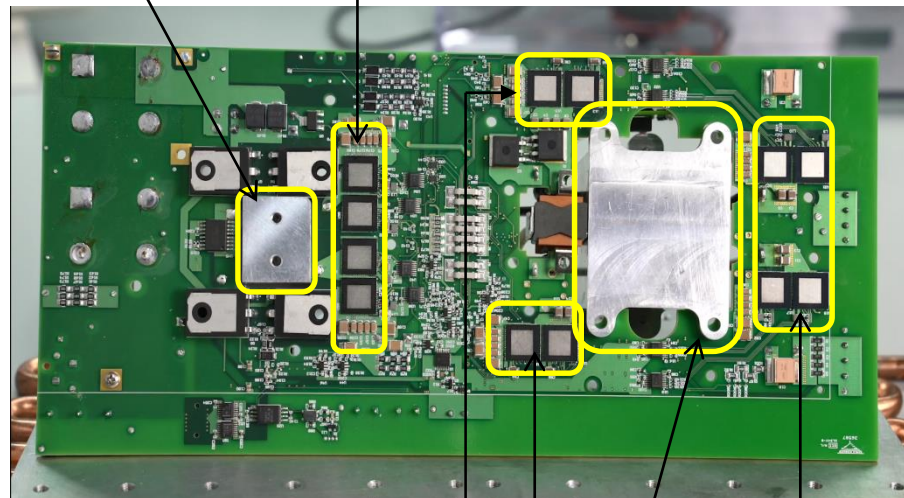
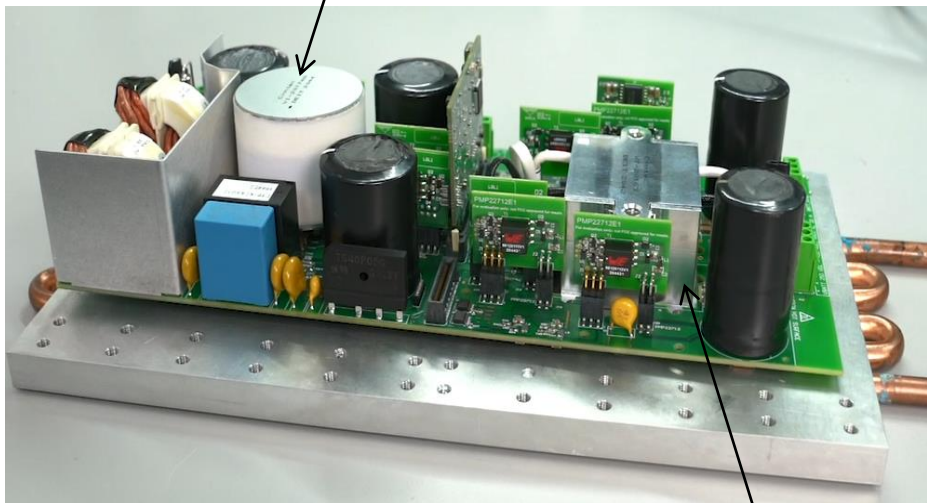
代表的な動作条件		SiC	TI の GaN
PFC のスイッチング周波数 (kHz)		67	125
DC/DC のスイッチング周波数 (kHz)		148 ~ 300	250 ~ 800
オープン・フレームの電力密度	(W/in <sup>3</sup> )	54	62.5
	(kW/liter)	3.3	3.8
効率 (%)		96.5	97 以上



# TI GaN: 6.6kW, 400V 双方向オンボード・チャージャ

結合型インダクタ  
2相インターリーブ PFC 対応

トータムポール PFC GaN FET



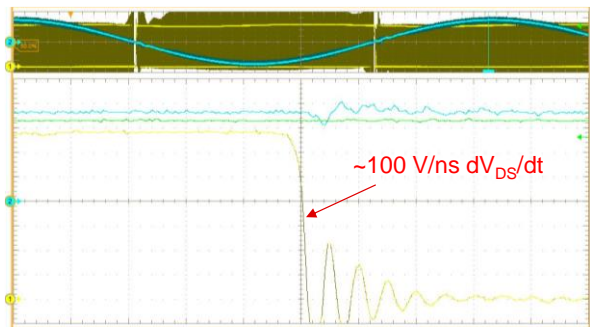
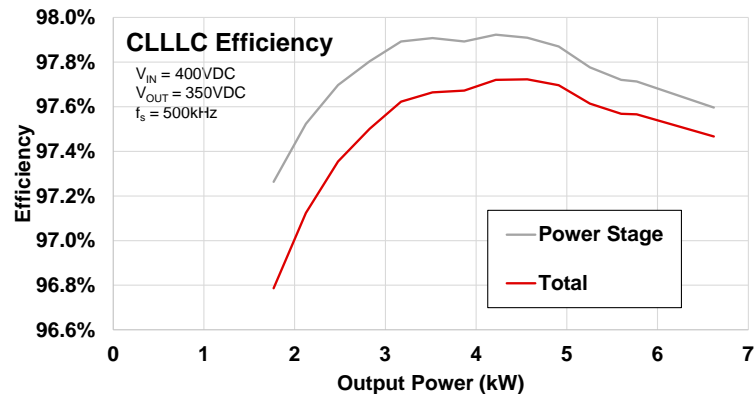
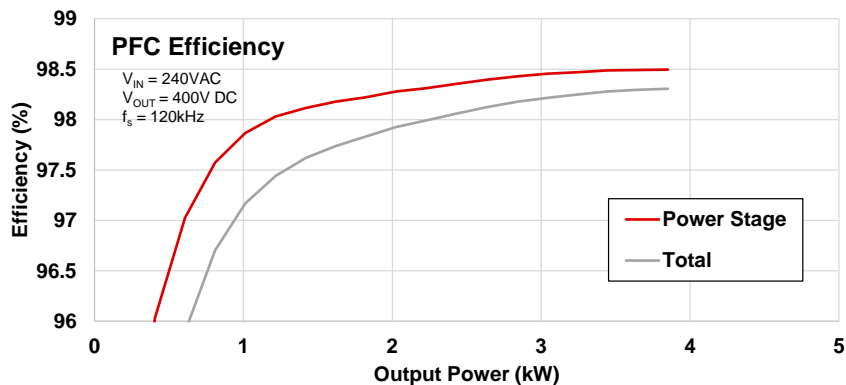
CLLLC GaN FET (1次側)

500kHz CLLLC トランス  
ヒートシンク取り付け済み

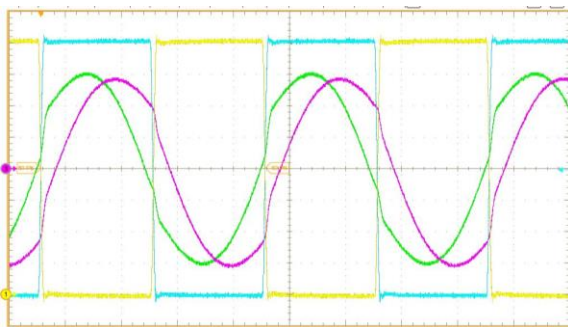
CLLLC GaN  
FET (2次側)



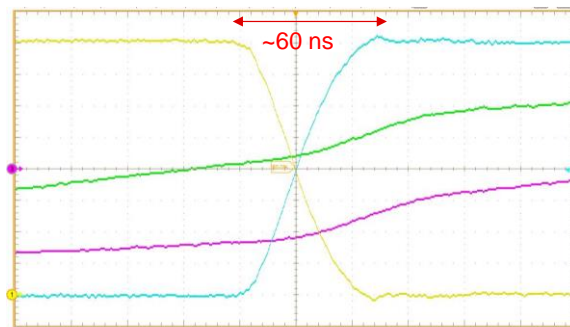
# 6.6-kW OBC: Test Results



I-V のオーバーラップ損失低減に役立つ高  $dV_{DS}/dt$



500kHz の CLLLC 動作



60ns 未満のデッドタイムで ZVS

## 6.6-kW OBC: Test Results

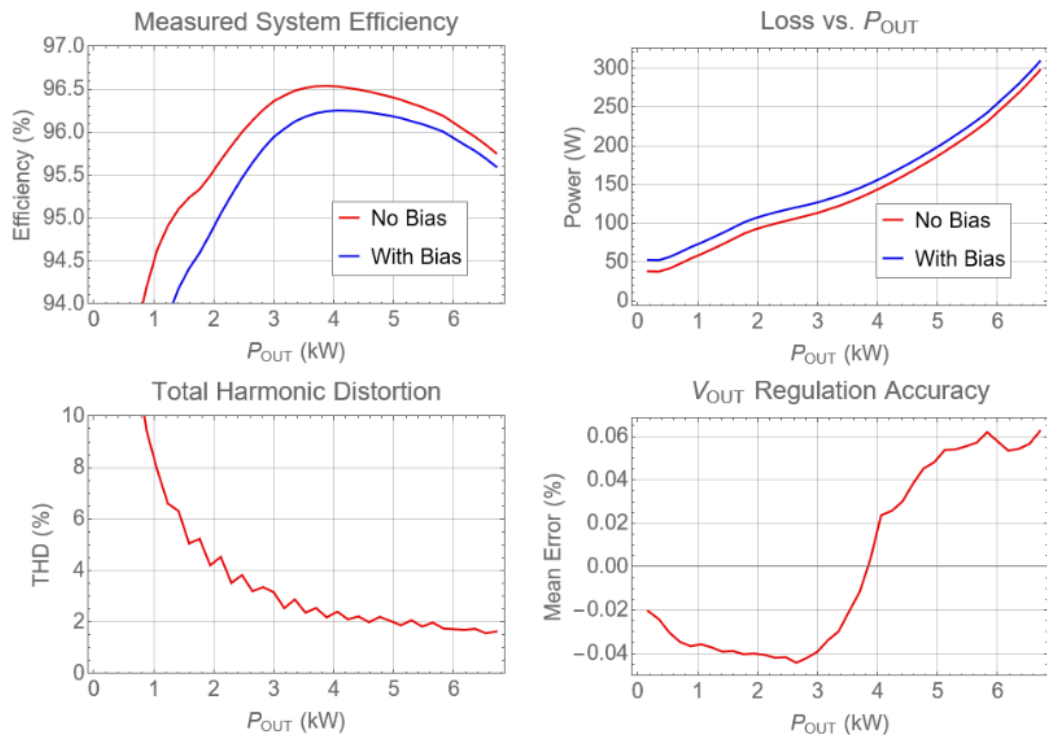


Figure 3-4. System Performance

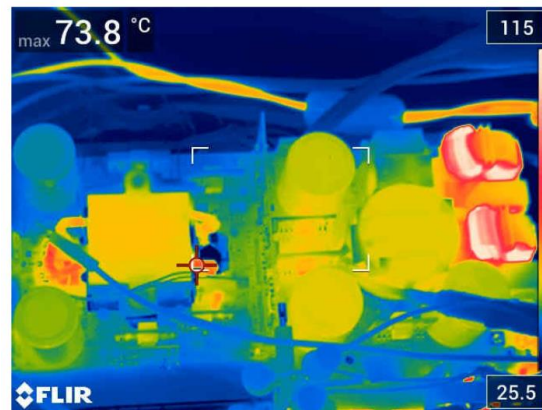


Figure 3-7. Top Side Thermal Image

詳細なテスト結果については、  
TI.com で PMP22560 を検索

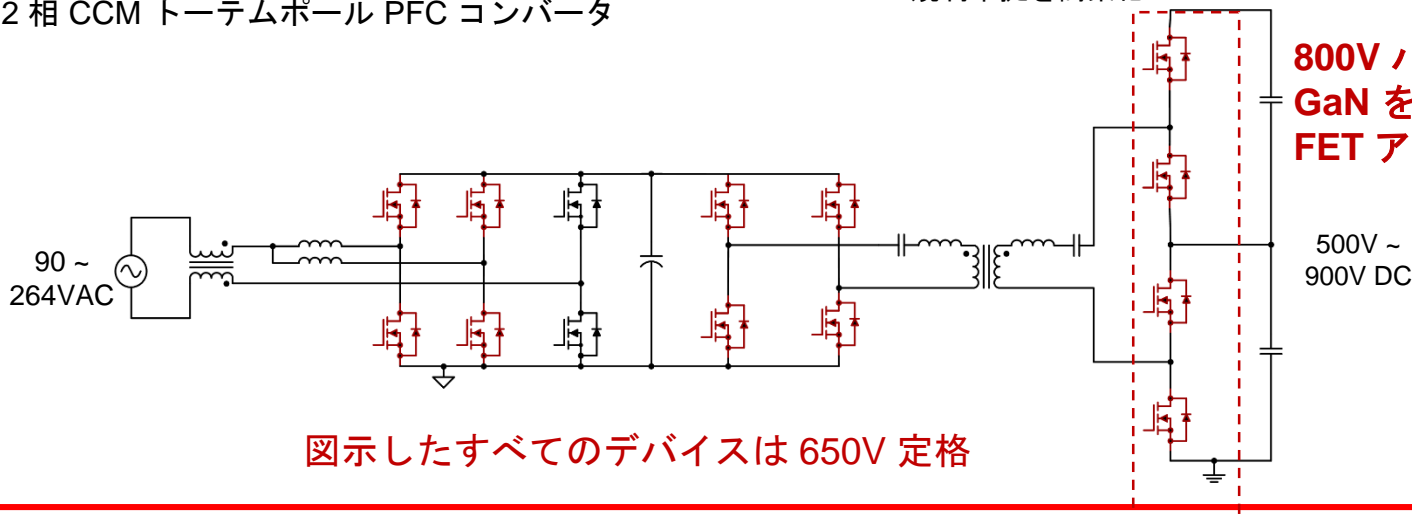
# TI GaN: 6.6kW, 800V 双方向オンボード・チャージャ

## デザインの特長

- ドライバと各種保護機能を統合した 650V/30mΩ GaN FET である LMG3522R030-Q1 を使用して 800V バッテリーをサポート
- 単相 AC 入力から 6.6kW を生成
- 複数の GaN FET を直列接続し 800V バッテリーに対応
  - 3相 AC 入力を使用する 11kW/22kW モジュール型 OBC への拡張にも対応できるデザインコンセプト
- 2相 CCM トーテムポール PFC コンバータ

## 設計の各種利点

- 高い周波数スイッチングを通じて高い電力密度と低コストのソリューションを実現
- (1200V の複数の FET と対比して) 650V の GaN の優れたスイッチング特性を活用し、500kHz を上回る動作を実現
  - より良好なスイッチング性能指標 (FoM) ( $C_{oss(TR)} * R_{DS}$ )
  - GaN FET を使用する場合、逆回復はゼロ
- GaN FET 全般に障害保護 / レポート機能を内蔵して冗長性を確保し、規制準拠を簡素化

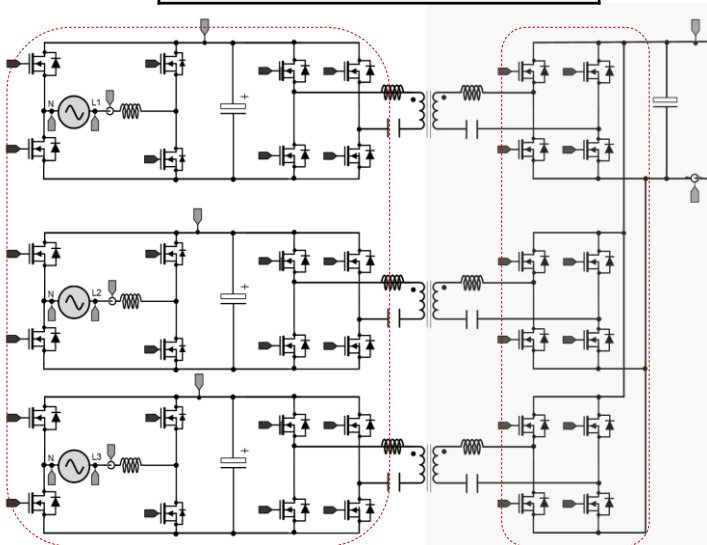


# 3相 AC 入力、11/22kW 供給の OBC を製作

## モジュール型 OBC

DC バス電圧 / PFC と 1次側 FET

400 ~ 450V DC バス / 650V FET



PFC と複数の 1 次側 FET

複数の 2 次側 FET

3 個の 3.6kW を並列接続 = 11kW OBC

3 個の 7.2kW を並列接続 = 22kW OBC

## 利点

- 単相と 3 相の各設計で、部品と設計成果を再利用可能
- 単相 AC 電力供給源に接続する場合、1 個のモジュールのみを有効にする方法で、軽負荷効率を改善
- トランスの発熱管理とシステム・コストの間でバランスを確保するアプローチ

# Reference

Optimizing GaN performance with an integrated driver

Achieving GaN Products With Lifetime Reliability

Wide-bandgap semiconductors: Performance and benefits of GaN versus SiC



**©2022 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved.**

The material is provided strictly "as-is" for informational purposes only and without any warranty.  
Use of this material is subject to TI's **Terms of Use**, viewable at [TI.com](https://www.ti.com)