

# オンボードチャージャ(OBC)向け 3相PFCコンバータ AND9957/D

## 要約

自動車市場で電動化が進行している状況で、バッテリーチャージャの要求がますます増えています。供給電力の増大および再充電時間の短縮という観点から、3相電源は単相電源に比べて最大「3倍」の電力を供給できると考えられています。

本稿で提案する3相PFCボードは、シリコンカーバイドMOSFETをベースにしたオンボードチャージャシステムの最初のステージの例であり、システム効率の向上とBOMの削減につながります。

このボード開発の第1目標は、ボード上の各種デバイスに簡単にアクセスして、容易に相のテストや測定をできるようにすることでした。この評価ボード(EVB)の場合、フォームファクタの最適化を目的にしているわけではありません。

## 出力電圧

### システム

- 高い $f_s$ 範囲(60~140 kHz)
- 高い効率( $f_s$  100 kHz時に98.3%)
- 広い入力範囲(167~265 V<sub>PH rms</sub>)
- 双方向
- 3相フルブリッジ整流器

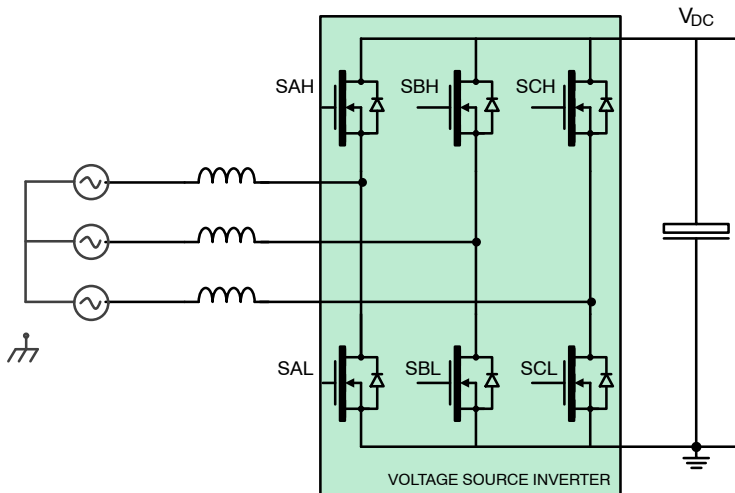


Figure 2. Topology – High Level

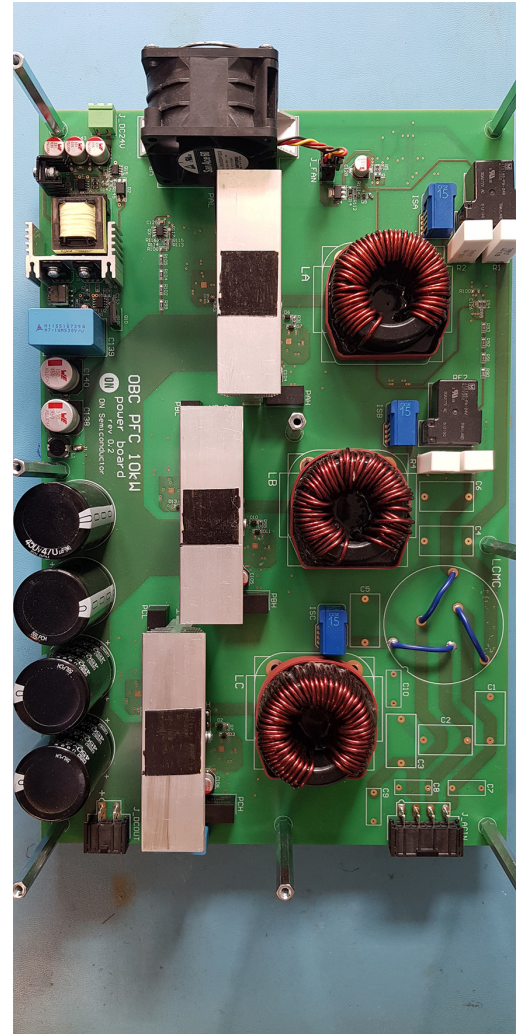


Figure 1. Board Photo

# AND9957/D

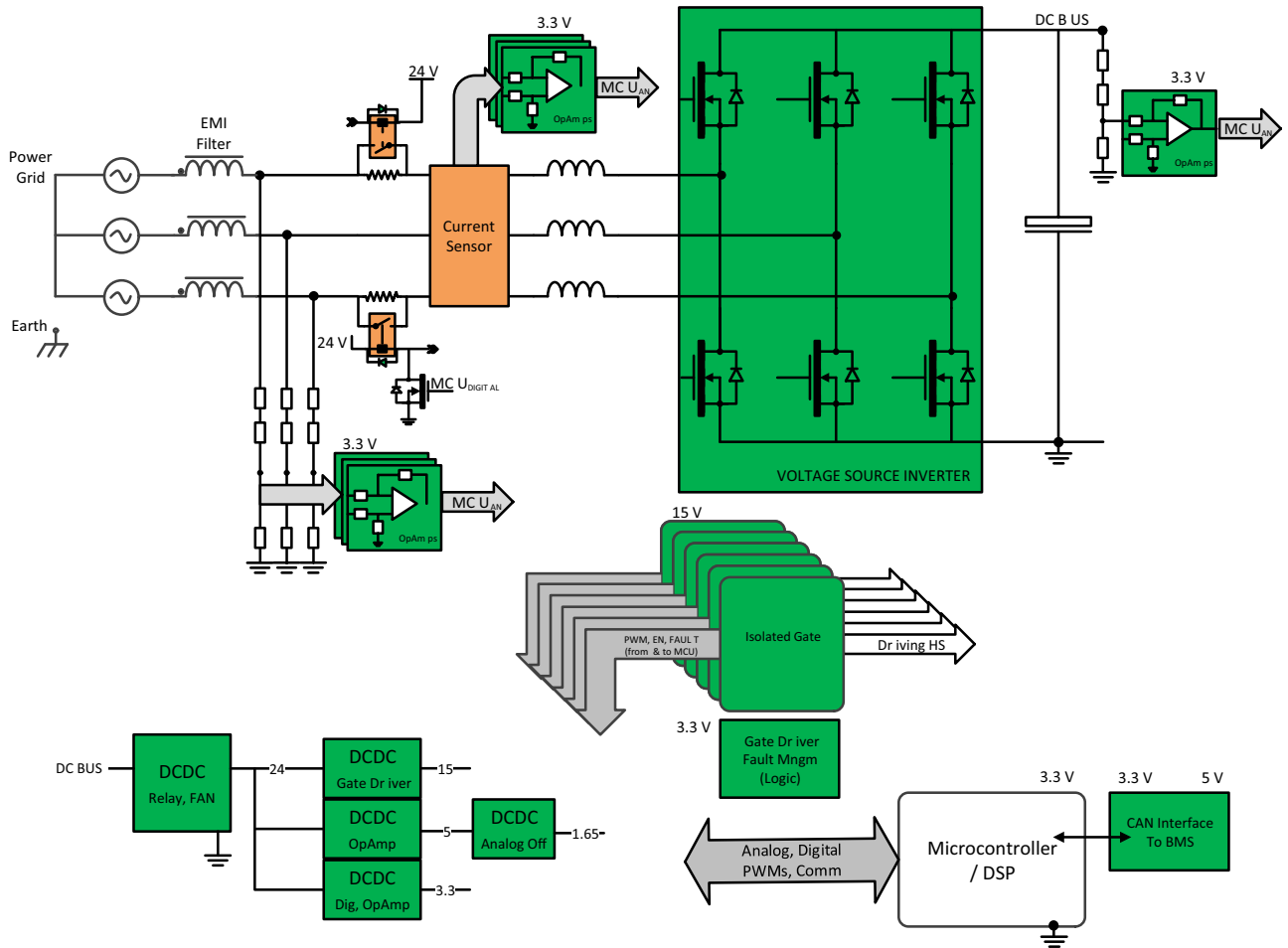


Figure 3. 3-Phase PFC Block Diagram

## アプリケーション/制御の概要

全体的な概念をFigure 3に示します。ここで提案するボードは、概念定義の段階でのテストの容易性を最優先事項としており、最大電力密度や小型化を目標にしたものではありません。

このボードの動作は単純であり、50 Hz周波数の3相電力を入力コネクタに供給すると、PFCトポロジの性質により、出力バスコンデンサ電圧が上昇します。MOSFETを使用するブリッジレスPFCは、各MOSFETに寄生フリーホイールダイオードが存在するため、入力から出力まで1つの電流パスを保証します。各MOSFETがすべてオフの場合、このボードは3相ダイオードブリッジに単純化できます。整流後の入力AC電圧は、電源電圧の振幅と、MOSFETのボディダイオードの順方向電圧に基づき、定義済みレベルに設定されます。ただし、この例では入力側に少なくとも167 Vrmsが印加されていることを前提としています。このため、2つの異なるラインを接続する1個の抵抗が、突入電流を制限する役割を果たします。バス電圧が400 Vに達すると、2スイッチフライバックコンバータが動作を開始します。フライバックコンバータは24 Vを供給し、ついで一連のDC/DCレギュレータが他の部分に必要な電圧レベルの電圧を生成して、デジタル回路およびアナログ回路に供給します。

MCUはウェイクアップすると、各ADCチャネルのオフセット電圧を確認するほか、バス電圧の監視や入力電圧の検知を行い、入力電圧に基づいて相電圧の周波数と角度を判定します。これらの角度をシステムの基準角として、力率補正を行うこととなります。

DCバス電圧が平坦になると、MCUはリレーに抵抗をバイパスするコマンドを発行し、出力バス電圧のさらなる上昇を許可します。ただし、この電圧増加幅は、整流後の入力電圧振幅 $\sqrt{6} \cdot V_{PH,RMS}$ よりいくらか小さくなるはずですが。

MCUはバス電圧が再び平坦になるまで待機し、平坦になると700 Vを目標値としてバス電圧の制御を開始します。この目標値は単一ステップ内では変化しませんが、パラメータ化された勾配に従って、平滑上昇ジェネレータが最終値700 Vへとバス電圧を引き上げます。

このPFCは過電流イベントに対し、NCV51705ゲートドライバのDESAT機能を活用した、1個のハードウェア保護機能を実装しています。このボード上では、NVHL080N120SC1 シリコンカーバイドMOSFET (Nチャンネル、1200 V、80 mΩ、TO247-3L)の特性に基づき、50 Aのスレッシュホールドが設定されています。

この保護機能に関するすべてのフォールトラインを統合して、MCUへの1本の入力を生成します。

この入力はPWM生成に対するハードウェア停止命令の役割を果たします。障害条件のリセットは、GUIから発行するリセットコマンド、またはパワーダウン

ン/パワーアップシーケンスのみであり、基本的にHW/SWリセットを意味します。Figure 4に、ハイレベルSW動作の概要を示します。

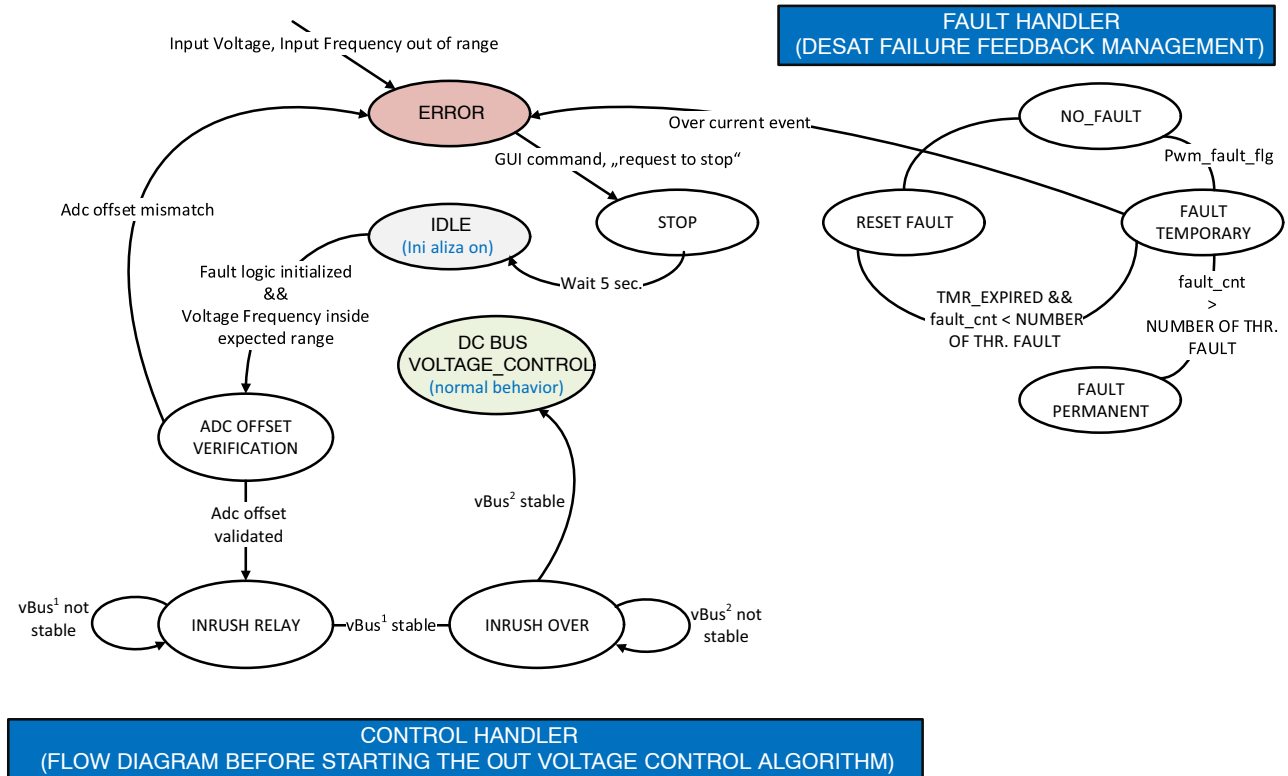


Figure 4. Flow Diagram of Preliminary Steps before Activating DC Bus Voltage Regulation

アプリケーションがDC BUS電圧制御状態に入ると、障害イベントが発生していない場合、MCUは磁界方向制御(FOC)による電圧制御アルゴリズムを実行します。

この制御アルゴリズムは内部ループが電流成分を制御するモータ制御方式に似ています。外部ループはバス電圧を制御します。PFCの目標は、各相の電

圧と各相の電流の間で0°の位相差を保証することなので、電圧安定化機能はD軸電流に対して働きかけます。Q軸電流は0に設定されます。D軸は「ACTIVE (有効)」電力成分を表すのに対し、Q軸は「REACTIVE (無効)」電力成分を表します。Figure 5に、制御アルゴリズムのブロック図を示します。

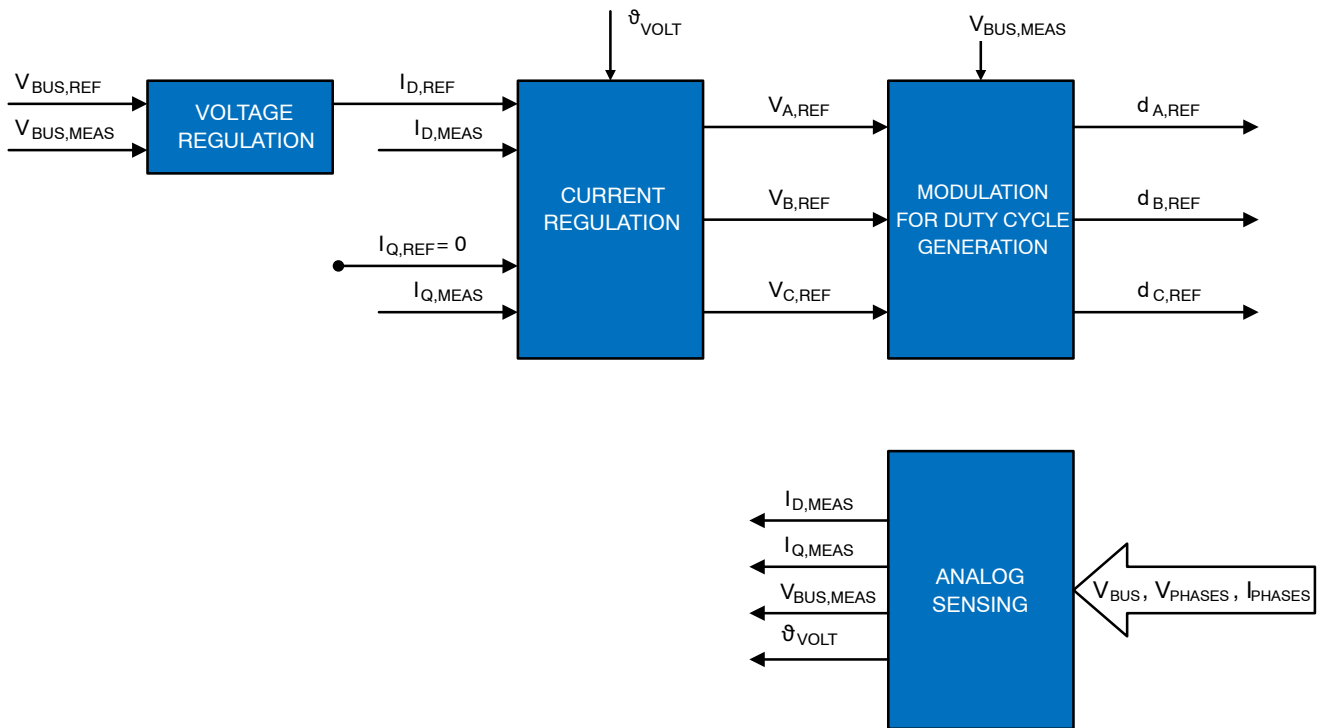


Figure 5. Control Block Diagram

制御アルゴリズム実行のためにサンプリングされるアナログ測定値は、以下のとおりです。

- 相電流(3系統)
- ライン電圧(3系統)。入力コネクタに中立ポイントが存在しないのでライン電圧を測定
- DCバス電圧

ライン相互間の電圧を使用して、AC電圧フェーザの実際の位置が判定されます。次に、この角度 $\theta$ を使用して、電流の相遅延を $0^\circ$ で安定させます。これがPFCの主な役割です。この電圧位置を使用し、クラーク変換とパーク変換を実行して固定的なABC座標系基準から、回転系DQフレームに切り替えます(PFCの場合、D軸は相電圧フェーザの振幅を意味する)。

$\theta$ を把握できているので、すべての電氣的測定値をDQ系内で表現できます。このような単純化により、確実に簡潔なPI/PIDレギュレータを使用できます。ここで略称の定義を記載すると、PIDはProportional Integral and Derivative (比例、積分、微分)安定化の略称で、これらを単独にまたは組み合わせて系に適用できます。いかなる場合でも、安定化させる機器の伝達関数に基づいて適切な選択肢が決まります。

1個の定数を基準測定値として指定した場合、PIレギュレータは確かに効果的な安定化を行って誤差を0にすることはできませんが、AC基準測定値を安定化する能力はありません。いずれの場合も、PIのループ帯域幅と時間応答の間で良好なトレードオフを実現する適切なシステム安定性を確保するには、PIレギュレータのキャリブレーションが必要です。電流

ループ(内部)の高速応答と、外部ループ(電圧)の応答速度低下を予想するのが一般的です。

Figure 7に、実装済み制御ループの詳細な図式を示します。このような制御ループは、選択されたPWM変調周波数に関係なく20 kHzで動作します。特定のPWMカウンタ値でADCペリフェラルをトリガする目的で同期手順が存在しますが、PWM周波数は制御周波数からほぼ独立しています。

この手順を使用すると、複数の相電流の間で良好な関係を維持できます。絶縁型中立点を持つスター接続の3相系の場合、電流合計の瞬時値が0に等しくなることが予想されます。

この例で選択されたMCUはArm<sup>®</sup> M3をベースとする汎用品です。クロック周波数は84 MHz、多重化入力チャネル付き単一S/HおよびADC、1 MSPS、12ビット分解能を特徴としています。1回のADC変換の遅延時間はおよそ1  $\mu$ sです。

各相に流れ込む電流量は、読み取り遅延、高速PWM周波数、瞬時的なスイッチの状態、昇圧インダクタンスが原因で、ごく短時間のうちに大幅に変化する可能性があります。したがって、このような問題が発生しやすい状況を克服するために、3つの連続したPWM期間にわたって電流がサンプリングされます。これは、適切な機能を確保するために選択できる最小PWM周波数は、制御方式の3倍つまり60 kHzになることを意味します。もちろん、許容最大PWM周波数も存在し、140 kHzです。この制限を導入する理由は、新たな測定のためにADCペリフェラルを再度トリガする前に、各PWM期間で測定を行うのに必要な待機時間が存在するためです。Figure 6に、この制限の背後にある理由を示します。

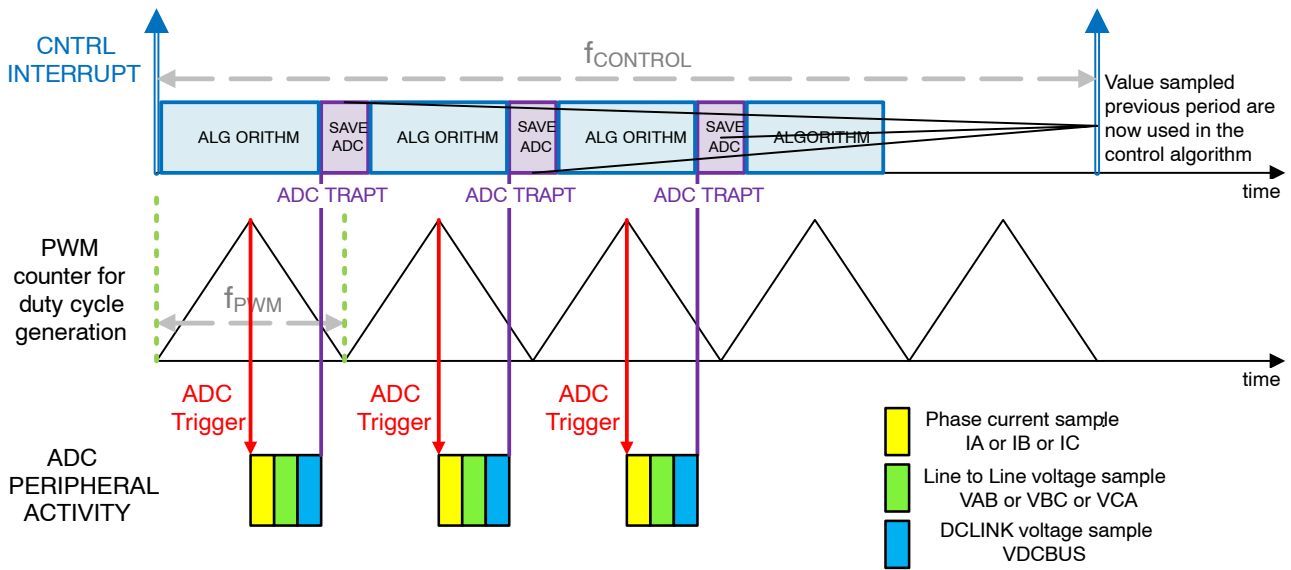


Figure 6. Main Peripheral Interaction and Control Algorithm Execution

Figure 6から分かるように、新しいADCトリガを発行できるのは、アナログ測定値が3回(電流1回、電圧2回)サンプリングされ、結果データレジスタをメモリに格納するためにADCからCPUに変換終了割り込みが発生され、ADCが新しい測定を行う準備ができたときです。各手順には約3.5  $\mu$ sを要します。3回のPWM期間が経過した後、読み取り方式を再度初期化する新しい制御割り込みが発生するまで、ADCがトリガされることはありません。

1回の制御期間中に収集された測定値は、次に使用可能な制御期間に使用されます。ADCからアナログ

測定値がサンプリングされたときから、制御方式でその値が実質的に使用されるまでに、明確な遅延が存在します。ただし、このような遅延は補償されません。その理由は、主要な動作周波数が選択された制御周波数の周期を大幅に下回っているためであり、結果的にこの遅延は無視できる値として扱われます。

ADCから測定値が取得できた時点で、制御の実装はFigure 7のように明解になります。

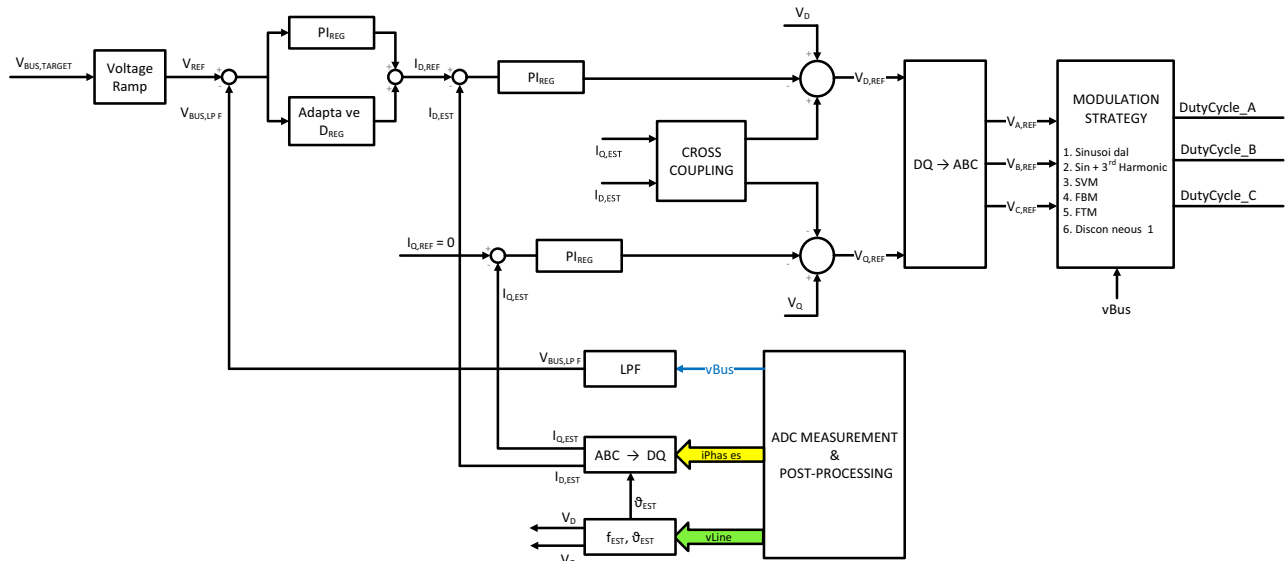


Figure 7. Control Algorithm, Detailed Description

上述したように、変調周波数は60 kHz～140 kHzの間で選択でき、これがシリコンカーバイドMOSFETを使用する利点です。もちろん、システム動作の観点からいえば、スイッチング周波数を高くすると、スイッチング損失が大きくなります。その結果、ダイの発熱量がかなり多くなり、温度上昇に伴って $R_{DS,ON}$ も増加するため導通損失も大きくなります。このため、従来はボード上にファンを実装して送風し、SiC MOSFETを取り付けたヒートシンクを継続的に冷却する方法を想定してきました。ファンを駆動するのはMCUですが、現時点ではその速度は固定されています。有効電力供給に基づくファン速度調整も実装可能です。この場合、電力供給量は $I_{D,REF}$ に正比例します。

損失を低減しシステム効率を向上させるために、別の駆動方式を実装することも可能です。結果を要約したセクションに詳細な情報を掲載します。

### ハードウェアの概要

このシステムは2枚のボードで構成されます。1枚は4層電源ボード、もう1枚は4層制御ボードです。

電源ボードには、以下の部品が搭載されています。

- 入力をバス電圧に変換するための全回路(リレー、昇圧インダクタ、SiC MOSFET、DCバスコンデンサ)
- アナログ信号のコンディショニングに使用する1次回路(5 V範囲への変換に使用)
- 1個のファンとその駆動回路
- ゲートドライバサブシステム(MOSFETごとに同等回路を実装)
- 高電圧から24 Vに変換するDC/DCコンバータ
- スwitchングノードでループ長を最小化する分散型コネクタ

制御ボードには以下の部品が搭載されています。

- マイクロコントローラおよび(シリアル通信経由での)絶縁型プログラミング用回路
- Figure 3に示すように、24 Vから各種DC電圧レベルへの変換
- 2次アナログ信号コンディショニング。電源ボードから入力を受け取り、3.3 V範囲に調整
- ゲートドライバから到着したフォールト信号を処理するロジックゲート
- 電源ボードに合わせたLEDおよび分散型コネクタ

### ファン

ファンには以下の2本のピンが必要です。

- FAN\_ON\_OFF：このピンをHighに設定するとファンに24 Vが供給されます。
- FAN\_PWM：これはパルス幅変調ピンです。デューティ比を高くするとファン速度が上昇し、強制通気量が増加します。

### リレー

リレーのレイアウトは、電源投入時にボード上に実装されている13.6  $\Omega$ の電力抵抗が突入電流を制限することを想定しています。この抵抗を切り離すには、INRUSH\_OFFピンの設定をデジタル値のHighに切り替えます。電源投入時にこのピンはLowに初期化されます。

### ゲートドライバシステム

このボードには、6個のゲートドライバが対称構造で実装されています。各ドライバは、絶縁型DC/DCコンバータ、デジタルアイソレータ、NCP51705ゲートドライバで構成されています。NVP51705は、SiC MOSFET駆動用の専用デバイスです。各セクションには、2つの入力と1つの出力(ゲートドライバから見た場合。MCU側からは2つの入力および1つの入力)の3本のデジタルピンがあります。MCUは、各ドライバにディセーブル信号を供給する必要があります。この信号は実際、PWM信号の反転入力およびPWM信号自体を表します。MCUはフォールトピンを検知する必要があります。このピンは、ゲートドライバレベルの障害条件を表します。

ゲートドライバの動作をより明確に理解するには、[onsemi.com](http://onsemi.com) Webサイトで入手できるゲートドライバのデータシートを参照してください。

ゲートドライバで障害が発生すると、ゲートドライバはPWM出力を自動的にディセーブルにします。フォールトピンはMCUに障害条件を通知するのに使用されます。このような障害が発生するのは、通常は過電流イベントが原因です。ただし、それ以外の異常条件によってトリガされる可能性もあります。

障害イベントが発生すると、ゲートドライバにPWM信号が供給されなくなり、ディセーブルピンが再びアクティブになります。

各ゲートドライバのフォールトピンは、6個の入力を持つ1個の「OR」ポートに集約されます。ついで、これらを組み合わせた結果を表すPWM\_FAULTが、MCUで利用可能なハードウェアPWM障害ピンに接続されます。

ゲートドライバの機能をディセーブルにするために、DISABLEピンはHIGHに初期化しなければなりません。制御方式が、有効なデューティサイクル情報を送出可能な状態になると、DISABLEをLowに設定する必要があります。

### テスト

以下のテスト結果は、ボードに230 Vrms、50 Hzを供給して生成されたものです。

制御アルゴリズムは、100 nsのデッドタイムを設定して、100 kHzのスイッチング周波数を供給するように構成されました。使用された昇圧インダクタは、平均インダクタンス330  $\mu$ Hのものです。

MOSFETを駆動するゲート抵抗値は、ソース時に22  $\Omega$ 、シンク時に4.7  $\Omega$ で、最大電流時に以下のスイッチング特性を保証しています。

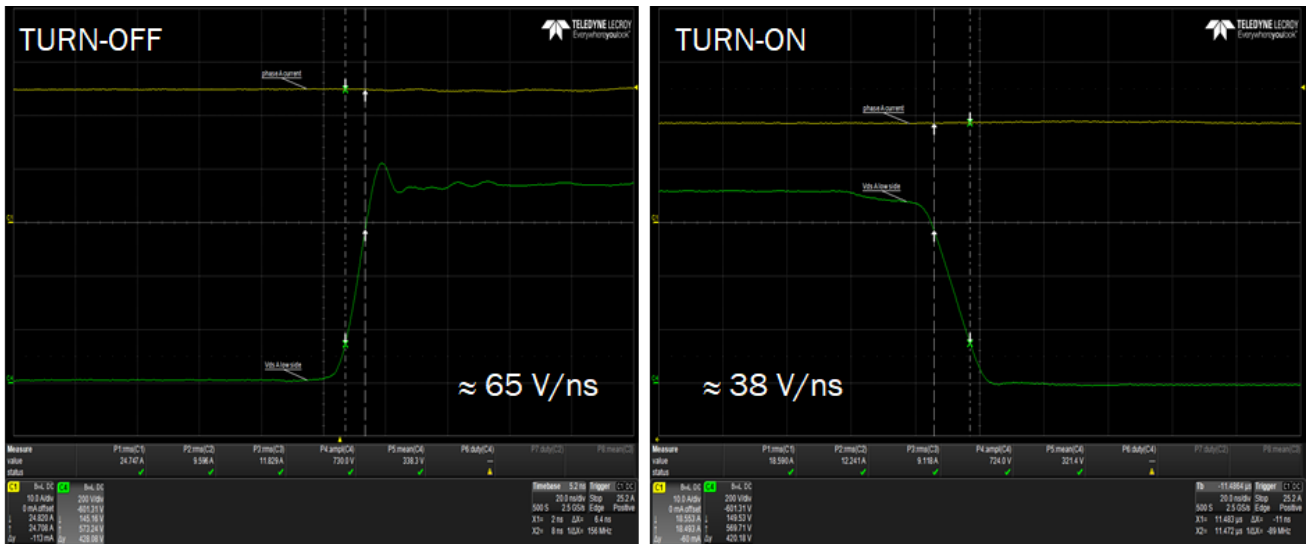


Figure 8. Switching Speed Low Side SiC MOSFET

PWMに関する様々な方式が実装されテストされました。これらの各方式は、低周波エンベロップが出力ターゲット電力に追従している間にインダクタで発生する高周波電流リップルに影響を及ぼします。

この電流リップルはPWM周波数とバス電圧に関連しますが、ゼロシーケンス電圧からも大きな影響を受けます。ゼロシーケンス電圧は、PWM期間中にインダクタ両端で生成される電圧に影響を及ぼします。

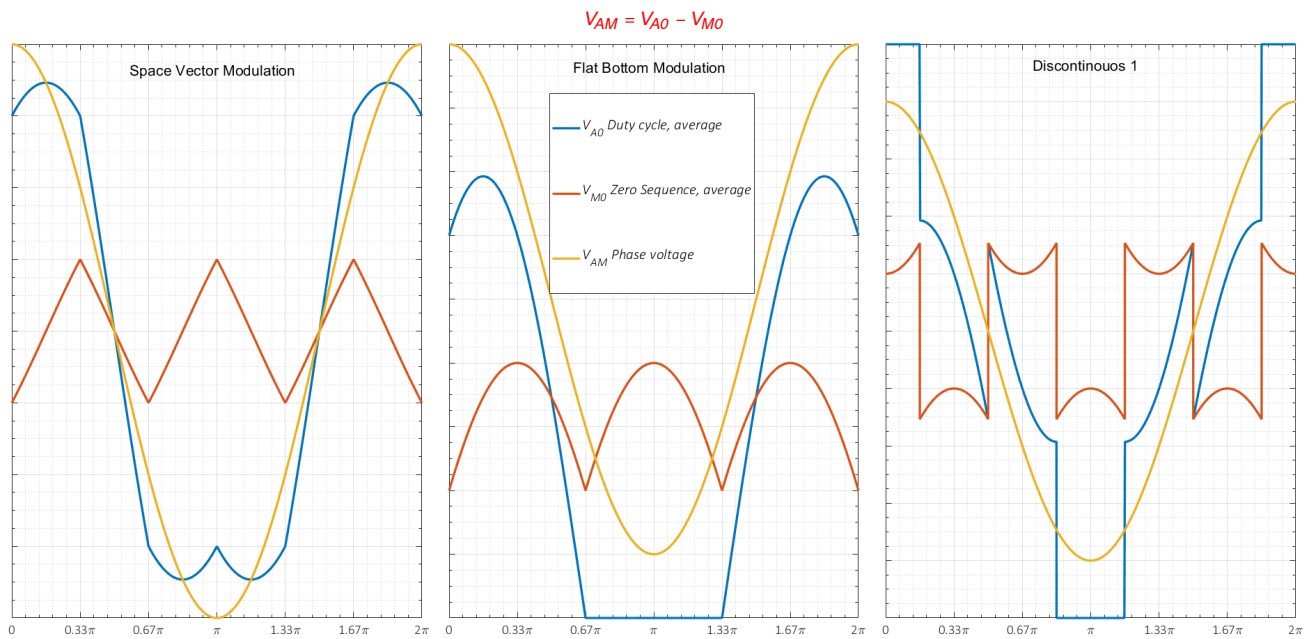


Figure 9. Tested Modulation Strategy

# AND9957/D



Figure 10. Efficiency Results @  $f_{PWM} = 100 \text{ kHz}$

最後に、PFCボードを100 kHzで動作させ、不連続タイプ1変調方式を選択した場合のシステム効率の結果を示します。

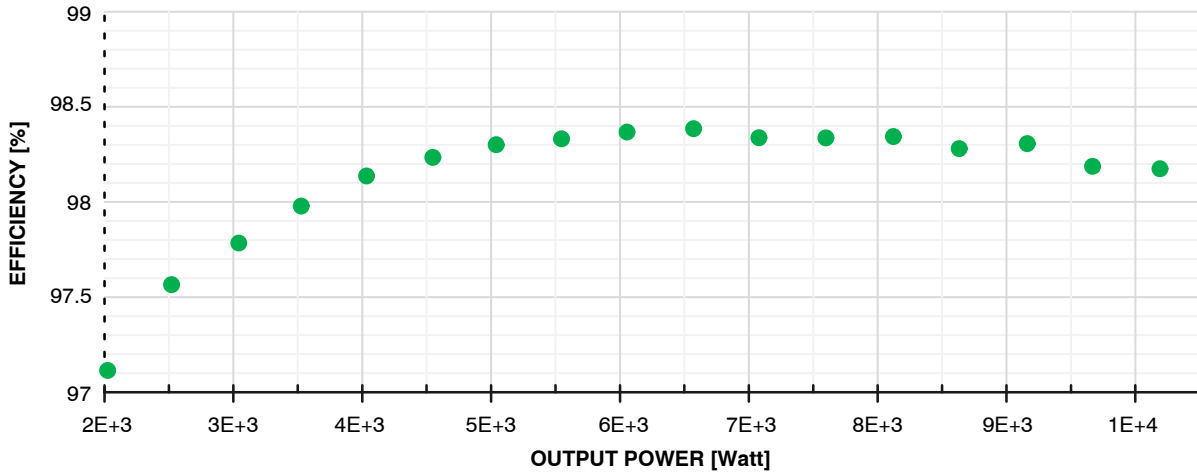


Figure 11. Efficiency Results @  $f_{PWM} = 100 \text{ kHz}$

**onsemi, Onsemi**, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "onsemi" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. onsemi owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of onsemi's product/patent coverage may be accessed at [www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf](http://www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf). onsemi reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as-is" and onsemi makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does onsemi assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using onsemi products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by onsemi. "Typical" parameters which may be provided in onsemi data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. onsemi does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. onsemi products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use onsemi products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold onsemi and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that onsemi was negligent regarding the design or manufacture of the part. onsemi is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

## PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:  
Email Requests to: [orderlit@onsemi.com](mailto:orderlit@onsemi.com)

TECHNICAL SUPPORT  
North American Technical Support:  
Voice Mail: 1 800-282-9855 Toll Free USA/Canada  
Phone: 011 421 33 790 2910

Europe, Middle East and Africa Technical Support:  
Phone: 00421 33 790 2910  
For additional information, please contact your local Sales Representative