

PFC 向けの新しい充電モード制御アルゴリズム

Bosheng Sun

System Engineer
Marketing/PDS, Dallas

はじめに

制御システムで何かを制御するには、それを検出する必要があります。これは、力率補正 (PFC) アプリケーションにも当てはまります。電力レベルが >75W のオフライン電源では、PFC が入力電流を制御して正弦波を生成します (正弦波入力 AC 電圧に追従)。入力電流を制御するには、入力電流を検出する必要があります。

最も一般的な電流検出方法では、入力電流を検出するため、PFC グランド帰還パスにシャント抵抗 (図 1 の R) を配置します。検出された入力電流信号 (I_{SENSE}) は、平均電流モードコントローラ [1] に送信されます (図 2 を参照)。基準電流 (I_{REF}) は入力電圧 (V_{IN}) で変調されるため、正弦波になります。制御ループが入力電流を強制的に I_{REF} に追従させることで、正弦波を実現します。

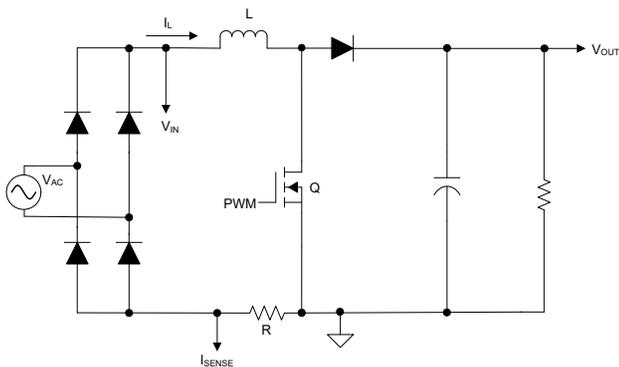


図 1. PFC の一般的な電流検出方法。

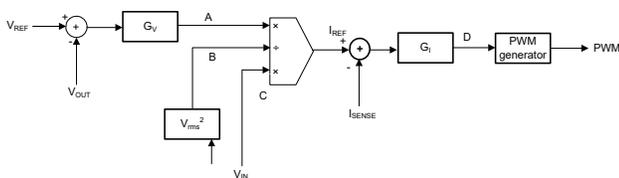


図 2. PFC の従来の平均電流モード制御。

ほとんどの連続導通モード (CCM) PFC コントローラは、従来型の平均電流モード制御を使用します。従来型の平均電流モード制御は優れた力率を達成し、全高調波歪みが小さいという利点がありますが、特にトータム ポール ブリッジレス PFC においていくつかの制限があります。この記事では、まったく新しい制御アルゴリズムである充電モード制御 [2] について説明します。

充電モード制御

充電モード制御アルゴリズムは、制御における新しい概念です。対象物を制御するのにそれを検出する必要はなく、それがもたらす結果を検出することにより間接的に制御します。PFC の場合、この制御アルゴリズムは、入力電流を直接制御する代わりに、各スイッチング サイクルで PFC 出力に供給される電荷の量を制御します。このために、電荷を制御することで入力電流が正弦波になるようにする特殊な制御規則を使用します。

電荷量情報を取得するには、いくつかの方法があります。図 3 に、電流シャントと、積分器として構成したオペアンプ回路を使用する例を示します。PFC 昇圧スイッチがオフになると、インダクタ電流が PFC バルクコンデンサの充電を開始します。この電流はシャント抵抗で検出され、その後積分器で積分されます。積分器出力のピーク値は、各スイッチング サイクルで PFC 出力に供給される総電荷量を表します。この電荷 (V_{CHARGE}) はコントローラによりサンプリングされ、制御ループの帰還信号として使用されます。積分器は、昇圧スイッチがオフになる前に、Q1 を介してゼロまで放電されます。

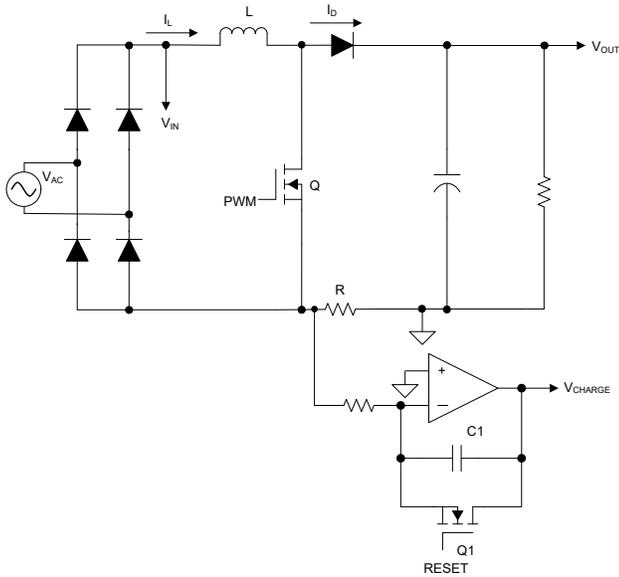


図3. 電流シャントとオペアンプを使用した電荷の取得

図4に、PFC出力側で電流トランス(CT)を使用する別の方法を示します。CT出力は、コンデンサC1に接続します。PFC昇圧スイッチがオフになると、インダクタ電流がPFCバルクコンデンサの充電を開始します。CTがこの電流を検出し、その出力がC1を充電します。C1の電圧が上昇します。C1のピーク電圧は、PFC出力に供給される総電荷を表します。ピーク電圧 V_{CHARGE} はコントローラによりサンプリングされ、制御ループの帰還信号として使用されます。C1は、昇圧スイッチがオフになる前に、Q1を介して0Vまで放電されます。

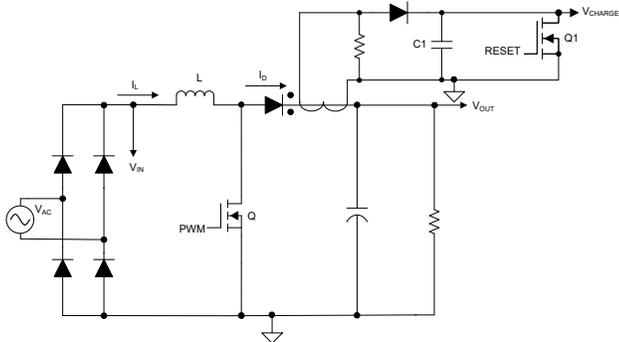


図4. CTを使用した電荷の取得

図5に、充電モード制御の代表的な信号波形を示します。

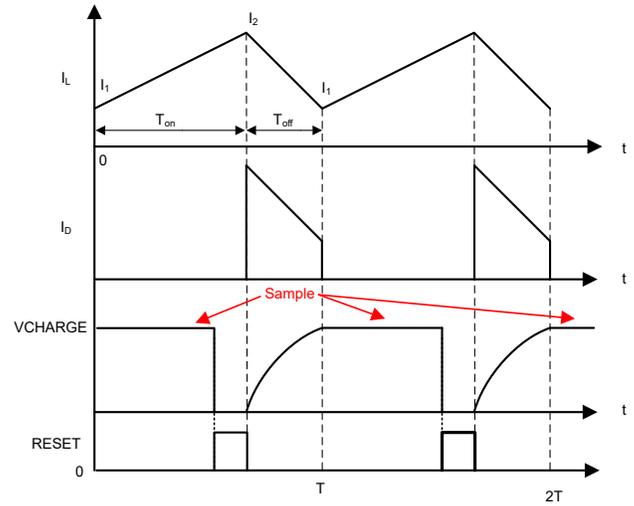


図5. 充電モード制御の標準的な信号波形

制御規則

各スイッチングサイクルの電荷量情報を取得する方法がわかったので、新しい制御規則を使用して正弦波入力電流波形を取得する方法を見てください(図6を参照)。

図2に示す従来の制御規則と比較して、次の2つの違いがあります。

- 電流ループの基準電流は、 V_{IN} ではなく V_{IN}^2 で変調されます。
- 帰還信号は、 I_{SENSE} ではなく電荷 V_{CHARGE} です。

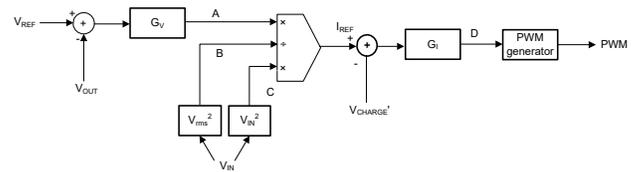


図6. PFCの充電モード制御規則

図6から、電流基準 I_{REF} は次の式で計算されます。

$$I_{REF} = \frac{A \cdot C}{B} \tag{1}$$

ここで、 I_{REF} は電流ループの基準電流、Aは電圧ループ出力 G_V 、Bは V_{IN} のフィードフォワード制御に使用される V_{rms}^2 、Cは V_{IN}^2 です。

図5から、各スイッチングサイクルの平均インダクタ電流は式2で計算されます。

$$I_{AVG} = \frac{(I_1 + I_2)(T_{on} + T_{off})}{2T} \quad (2)$$

ここで、 I_{AVG} は平均インダクタ電流、 I_1 は各スイッチング サイクルの開始時のインダクタ電流、 I_2 は各スイッチング サイクルのインダクタ電流ピーク値、 T_{ON} は昇圧スイッチ Q のターンオン時間、 T_{OFF} は昇圧ダイオード D の導通時間、 T はスイッチング周期です。

各スイッチング サイクルの C1 (V_{CHARGE}) のピーク電圧は、**式 3** で計算されます。

$$V_{CHARGE} = \frac{(I_1 + I_2) T_{off}}{2C} \quad (3)$$

ここで、C は C1 の容量です。

定常状態では、制御ループは V_{CHARGE} を強制的に I_{REF} に一致させます (**式 4** を参照)。

$$V_{CHARGE} = I_{REF} \quad (4)$$

定常状態で動作する昇圧タイプのコンバータでは、昇圧インダクタに印加されるボルト秒を各スイッチング周期で平衡させる必要があります (**式 5** を参照)。

$$T_{on} V_{IN} = T_{off} (V_{OUT} - V_{IN}) \quad (5)$$

式 1～**式 5** を統合すると、**式 6** が得られます。

$$I_{AVG} = \frac{G_V V_{OUT} C}{V_{RMS}^2 T} V_{IN} \quad (6)$$

式 6 で、定常状態では C と T は両方とも一定であり、 G_V 、 V_{OUT} 、 V_{rms}^2 は変化しないため、 I_{AVG} は V_{IN} に追従します。 V_{IN} が正弦波の場合、 I_{AVG} も正弦波となるので、PFC が実現されます。**式 2** と **式 3** は CCM と不連続導通モード (DCM) の両方に対して有効であるため、**式 6** は CCM と DCM の両方の動作に対して有効です。

RHPZ 効果とソリューション

PFC が DCM で動作する場合、充電モード制御のループ補償はシンプルです。ただし、昇圧コンバータが CCM モードで動作している場合、制御ループ内に右半面ゼロ (RHPZ) が現れるため、ループ補償は課題となります [3]。RHPZ は位相降下を引き起こし、制御ループの潜在的な位相マージンに悪影響を及ぼします。

式 7 は、制御ループの小信号モデルを表します。

$$\frac{\hat{v}_{CHARGE}}{\hat{d}} = \frac{V_{OUT}(1-D)T}{sLC} \left(1 - \frac{sL}{(1-D)^2 R_{LOAD}} \right) = \frac{1 - \frac{s}{\omega_z}}{\frac{s}{\omega_0}} \quad (7)$$

ここで、 R_{LOAD} は PFC の出力負荷、D はパルス幅変調のデューティ サイクル $\omega_0 = \frac{V_{OUT}T(1-D)}{sLC}$ および $\omega_z = \frac{R_{LOAD}T(1-D)^2}{L}$ です。

式 7 は RHPZ ω_z を明確に示しています。その周波数は、負荷、昇圧インダクタンス、D (D は入力電圧と出力電圧によって変動) によって変動するため、ループ補償は非常に困難です。

RHPZ を除去するため、**式 8** に示すように帰還信号を変更します。

$$V'_{CHARGE} = \frac{V_{CHARGE}}{T_{off}} \quad (8)$$

図 7 に、変更された制御規則を示します。この図では、 I_{REF} は V_{IN}^2 ではなく V_{IN} で変調されています。

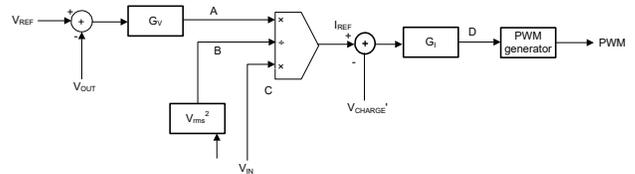


図 7. RHPZ 除去後の PFC の充電モード制御規則

この変更により、制御ループの小信号モデルは**式 9** で表されます。

$$\frac{\hat{v}_{CHARGE}}{\hat{d}} = \frac{V_{OUT}}{sL} \quad (9)$$

RHPZ が除去され、システムが 1 次システムになるため、補償が簡単になります。

図 8 に、新しい制御アルゴリズムを検証したシミュレーション結果を示します。正弦波入力電流波形が実現されています。

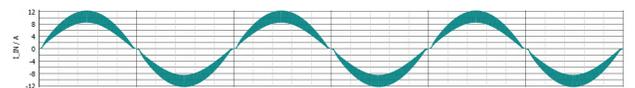


図 8. シミュレーション結果: 正弦波入力電流波形

まとめ

充電モードでは、入力電流を直接制御する代わりに、各スイッチング サイクルで PFC 出力に供給する電荷量を制御します。このアルゴリズムはすべての PFC トポロジで機能しますが、双方向インダクタ電流を検出するためにホール効果センサなどのセンサを必要としてきたトータム ポールブリッジレス PFC では特に有用です。ホール効果センサの問題は、高価であることに加えて、帯域幅の制限、磁界の影響を受けやすい、DC オフセットが温度により変化するなどの制限が存在することです。充電モード制御ではインダクタ電流を検出する必要がないため、高価な双方向電流センサは不要です。代わりに、電流センス抵抗をはるかに安価な低帯域幅オペアンプまたは CT と組み合わせて使用できます。

トータム ポールブリッジレス PFC は、高効率であることから、高効率が必要なアプリケーションに最適です。これまでは高コストが障壁となり広く採用されるに至っていませんでしたが、現在ではこの新しい制御アルゴリズムが、高効率と低コストの両方を必要とするアプリケーションでのオプションとなっています。充電モード制御は、テキサス・インスツルメンツの C2000™ マイクロコントローラや UCD3138 コントローラのような既存のデジタル コントローラを使用して実装することも、新しいアナログ PFC コントローラの開発で使用することも可能です。

参考資料

1. テキサス・インスツルメンツ:『[オフライン電源向けの力率の高いプリレギュレータ](#)』
2. 『[Charge Mode Control for Power Factor Correction Circuit](#)』米国特許 11,705,808 B2、2021 年 9 月 30 日出願、2023 年 7 月 18 日登録。
3. テキサス・インスツルメンツ:『[右半面ゼロ – 簡素化した説明](#)』

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.
すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated