

PFC の再突入電流を制限する方法

Bosheng Sun

Power Design Services

はじめに

最近公開されたモジュール型ハードウェアシステム向け共通冗長電 (M-CRPS) 仕様 [1] では、データセンターで使用される電源で入力電圧がブラウンアウトまたはブラックアウトイベント後に回復した際、既知の突入電流とは異なる再突入電流を制限する必要があることが規定されています。以前は、この再突入電流は特定されておらず、このイベントに対する特別な制御アクションは存在しませんでした。この記事では、M-CRPS の要件を満たす、低コストでシンプルかつ非常に効果的な方法をご紹介します。

突入電流と再突入電流の関係

75W を超えるフロントエンド電源 (PSU) では、力率補正 (PFC) が必要です。PFC は入力電流を強制的に入力電圧に追従させ、電子負荷が抵抗として表示されます。通常、PFC には大きな出力コンデンサがあります。起動前に PFC 出力コンデンサは完全に放電されています。PFC 構造は、 $V_{AC} > V_{OUT}$ のときに電流経路を提供するため、AC 電圧を印加すると大きな電流が生成されます。これは、入力電圧は基本的に、PFC 出力コンデンサに直接印加されるためです。この電流は、突入電流と呼ばれます。

正の温度係数のサーミスタ (R_T) と機械式リレーを PFC 入力側に配置すると、図 1 に示すように突入電流が制限されます。PFC 電源投入時、リレーはオフです。突入電流は R_T によって低い値に制限され、PFC 出力バルクコンデンサ (C_{BULK}) は徐々に充電されます。出力電圧 (V_{OUT}) が AC 電圧のピーク値 (V_{AC}) と等しい値まで充電すると、突入電流は 0 まで低下します。その後、 R_T をバイパスしてリレーがオンになり、通常動作時の電力損失を低減します。

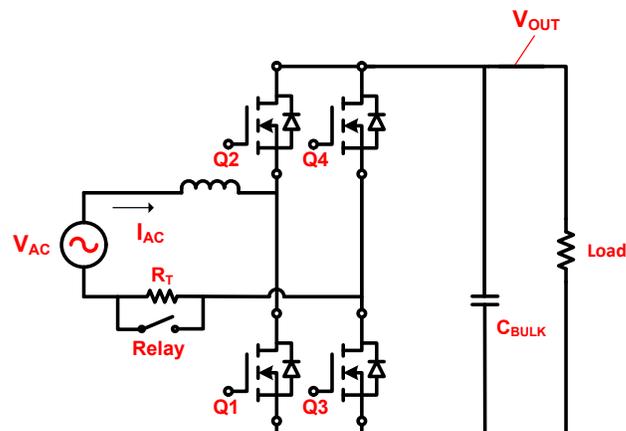


図 1. R_T とリレーを使用した PFC の突入電流の制限

再突入電流は、通常の PFC 動作時に発生する点で異なります。図 2 に示すように、PFC が正常に動作すると、AC 入力電圧が突然低下します。負荷が印加され続けているため、PFC V_{OUT} がより低い値に降下する可能性があります。その後、AC 電圧が回復した時点で、AC 入力電圧が V_{OUT} を上回ると、再び突入電流が発生します。この電流を、再突入電流と呼びます。

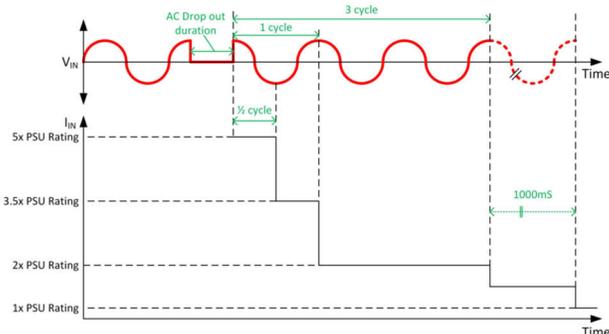


図 2. M-CRPS の再突入電流制限およびタイミング。

以前は、再突入電流を処理するのは、電源ステージの部品能力のみに依存していました。テスト結果によると、再突入電流が PFC 定格の最大入力電流の 10 倍以上に急増する可能性があります。このような大きな再突入電流は、電源に損傷を与えたり、寿命を短縮する可能性があります。このため、M-CRPS 仕様では AC 電圧が戻った後の再突入電流の

量が制限されています。再突入電流の二乗平均値は、入力周波数の半サイクルにわたって最大 PSU 電流定格 ($5 \times I_{\text{rated,RMS}}$) の 5 倍未満、および入力周波数の 1 サイクルにわたって $3.5 \times I_{\text{rated,RMS}}$ 未満でなければなりません。さらに、AC 入力の印加後、入力周波数の 2 サイクル以内に、入力電流は $I_{\text{rated,RMS}}$ の 2 倍以下の値に安定する必要があります。

この期間中に PFC のパルス幅変調 (PWM) 動作を考慮すると、より複雑になります。PFC が十分に制御されていない場合、AC 電圧が再開されたときに不適切な PWM デューティサイクルが発生する可能性があり、その結果、別の大きな入力電流スパイクが発生して、M-CRPS 仕様を超えることがあります。

一方、AC 電圧が再開すると、PFC は PFC 出力電圧をできるだけ早くレギュレーションレベルに昇圧するのに十分な電流を供給しなければなりません。そうしないと、重負荷により V_{OUT} が降下し続け、最終的に DC/DC コンバータの入力低電圧ロックアウトレベルが低下します。AC 電圧が再開した後に PFC 出力コンデンサを充電するには、 $V_{\text{IN}} > V_{\text{OUT}}$ のときの再突入、または $V_{\text{IN}} < V_{\text{OUT}}$ のときの PFC 制御ループから、大きな入力電流が必要になります。

このホワイトペーパーでは、この再突入電流に対処するソリューションを提供しています。これにより、AC 電圧がドロップアウトから回復した際、再突入電流 ($V_{\text{IN}} > V_{\text{OUT}}$ の場合) と非再突入電流 ($V_{\text{IN}} < V_{\text{OUT}}$ の場合) の両方が適切に制御され、 V_{OUT} を迅速に昇圧するのに十分なレベルを維持しつつ、M-CRPS の制限仕様を超えないようにします。

再突入電流制御方式の提案

図 3 に、提案されている低コストの再突入電流制御方式を示します。図 1 と比較すると、2 つの違いがあります。1 つ目は、 R_T が AC 側から DC 側に移動したことです。2 つ目は、MOSFET (金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ) Q_5 が、従来の機械式リレーを置き換えたことです。ソリッドステートリレーを選択する理由は、リレーをすばやくオンまたはオフにする必要があり、そのためには機械式リレーは遅すぎるためです。また、MOSFET は AC 電圧をオフにできないため、DC 側に配置されます。突入電流制限は、従来の方法と同様に機

能します。入力電圧が PSU に最初に印加されるとき、 R_T は突入電流を制限します。突入電流が流れると、 Q_5 がオンになり、 R_T はバイパスされます。

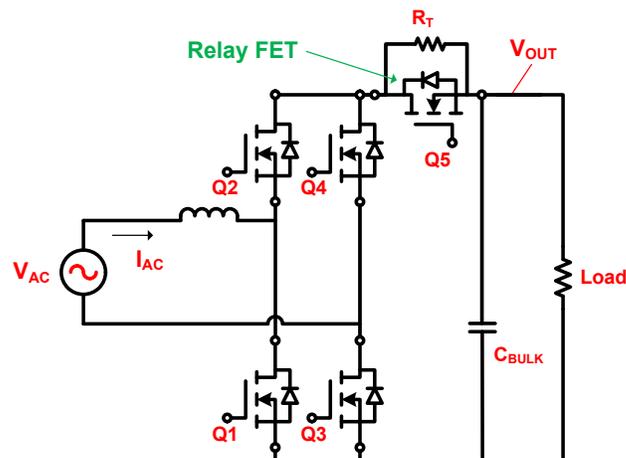


図 3. 提案された再突入電流制限ハードウェア構造。

図 4 に、提案されている再突入電流制御方式を示します。 V_{AC} は PFC 入力電圧、 V_{OUT} は PFC 出力電圧、 I_{AC} は入力電流です。 Q_1 と Q_2 は高周波スイッチで、各 AC 半サイクルで PFC 昇圧スイッチまたは同期スイッチとして交互に動作します。PFC が全負荷で動作している間、AC 線は 10 ミリ秒間降下し、その後ピーク値に回復します。これは、AC 電圧ドロップアウトの最悪のケースです。

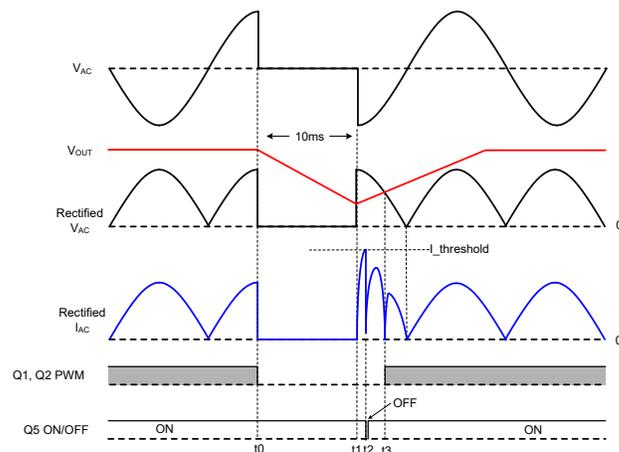


図 4. 提案されている AC 電圧降下と再突入電流制限の制御アルゴリズム。

これは、提案されている再突入電流の制御方法です。

- t_0 のとき: AC 電圧降下を検出すると、 Q_1 と Q_2 がオフになります。また、電圧ループと電流ループが引き続き動作

している場合、これらの積分器が蓄積するため、PFC の電圧ループと電流ループの両方をオフにする必要があります。AC 電圧が回復して PFC がオンになると、大きな PWM デューティ サイクルが発生し、電源を損傷する可能性のある大きな電流スパイクが発生します。

- 電流ループがオフになると、0 にリセットして、積分器の履歴をクリアします。積分器をクリアしない場合、AC 電圧が回復して PFC がオンになると、AC 電圧降下前と同じ PWM デューティ サイクルで PFC がオンになり、適切なデューティ サイクルでなくなる可能性があります。たとえば、ゼロクロス時に AC 電圧ドロップアウトが発生すると、PWM デューティ サイクルはほぼ 100% になります。クリアされた電流ループ積分器を使わずに AC 電圧が AC ピーク値で回復すると、AC ピーク値でほぼ 100% のデューティ サイクルが発生し、大きな電流スパイクが発生して電源に損傷を与える可能性があります。電圧ループについては、一度オフになったら、その内部値を保持するためにフリーズします。電圧ループ出力は負荷を表し、電流ループ基準の生成に使用されます。したがって、AC ドロップアウト中に負荷が変化しないように、その値を維持する必要があります。
- t_1 のとき: AC 電圧が戻ります。 $V_{AC} > V_{OUT}$ なので、生成された再突入電流によってバルクコンデンサが充電されます。 Q_1 と Q_2 はオフのままです。
- t_2 のとき: 再突入電流がプログラム可能なしきい値を超え、リレー Q_5 の遮断イベントが作動します。その後、 Q_5 がオフのときは再突入電流が R_T によって制限され、その大きさは急速に降下します。リレー Q_5 は非常に短い時間 (10 μ s など) だけオフになり、その後再度オンになります。 Q_5 がオンになると、再突入電流はしきい値を超えるまで再度増加します。このプロセスは、再突入電流が再び制限値を超えないようになるまで繰り返されます。このプロセスのフローチャートを、[図 5](#) に示します。
- t_3 のとき: $V_{AC} < V_{OUT}$. 今度は PFC をオンにします。電圧ループ基準電圧を t_3 での V_{OUT} の瞬時値と等しく設定し、電圧ループをオンにします。その後、電圧ループ基準電圧が、通常の設定点に達するまで徐々に上げます。電流ループの場合、最初にデューティ サイクル $D = (V_{OUT} - V_{AC})/V_{OUT}$ を計算し、電流ループがオンのときに電流ル

ープ出力が計算された D から始まるように、それを電流ループに注入します。その後、電流ループをオンにします。最後に、 Q_1 と Q_2 をオンにして、PFC 通常動作が可能になります。

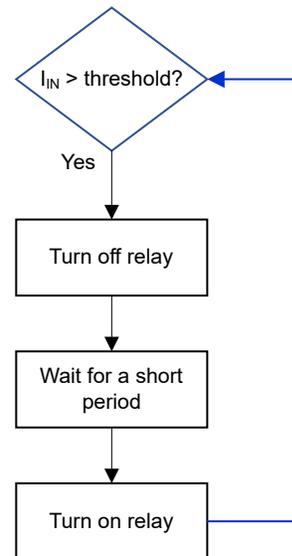


図 5. 提案されたリレーのオン/オフ制御アルゴリズムのフローチャート

V_{OUT} が V_{AC} を上回るまで、このプロセスが繰り返されます。

テスト結果

3.6kW トーテム ポール ブリッジレス PFC を使用して、提案する方法をテストしました[2]。[図 6](#) は、AC 電圧が降下すると、10 ミリ秒でピーク値まで回復することを示しています。チャンネル 1 (青) は PFC 入力電流の波形 (I_{IN})、チャンネル 2 (青緑) はリレーのオン/オフ制御信号です。[図 7](#) は、リレーのオン/オフ時の拡大図です。AC 電圧降下期間中は、リレー Q_5 はオンのままです。 C_{BULK} は、蓄積されたエネルギーを負荷に継続的に供給し、 V_{OUT} が降下します。リレーがオンで $V_{AC} > V_{OUT}$ なので、AC 電圧が再開した後で、再突入電流が急速に上昇します。再突入電流が事前定義された電流制限しきい値 (この例では 40A) に達すると、リレーはオフになり、再突入電流は R_T により非常に小さい値に減少します。リレーは 10 μ s の間のみオフとなり、その後再度オンになります。再突入電流は再度上昇します。このプロセス全体により、 C_{BULK} を高速に充電するために大きな電流を供給しながら、M-CRPS 仕様内で再突入電流を制限できます。また、この波形

は、非再突入電流 ($V_{AC} < V_{OUT}$) が大きな電流スパイクを発生させずに適切に制御されていることも示しています。

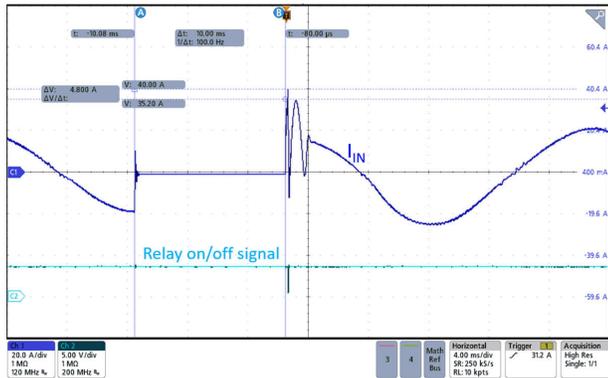


図6. ドロップアウト後に AC 電圧が再開したときの再突入電流制御。

図7に、勾配が制限された状態で2回目の再突入電流が上昇する例を示します。これは、電磁干渉フィルタのインピーダンスやプリント基板のパターンインピーダンスを含む PFC 入力インピーダンスが電流の立ち上がり勾配を制限するために発生します。この例では、2回目の再突入電流の大きさが 40A しきい値を超えないため、リレーは1回だけオフになります。2回目の再突入電流もしきい値を超えた場合、リレーは再びオフになります。

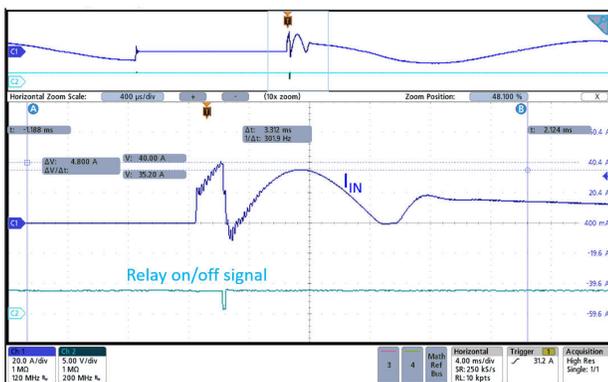


図7. リレーのオン/オフの瞬間の拡大図6。

まとめ

データセンターで使用する電源では、AC 電圧がドロップアウトから再開したときに再突入電流が、M-CRPS 仕様で定義さ

れている制限を超えないようにする必要があります。従来の機械式リレーをソリッドステートリレーに置き換え、再突入電流がプログラム可能なしきい値を超えたときにリレーを素早くオフ/オンすることで、再突入電流は M-CRPS 制限仕様を超えず、 V_{OUT} を急速に昇圧するのに十分な大きさになるように適切に制御できます。さらに、このファームウェアベースの手法で既存の R_T を活用することで、低コストで非常に効果的な再突入電流制御ソリューションを実現できます。

参考資料

1. **モジュール型ハードウェア システム向け共通冗長電源 (M-CRPS) の基本仕様** バージョン 1.05 RC5 オープン コンピュート プロジェクト: 米国テキサス州オースティン、2024 年 9 月 25 日。
2. テキサス・インスツルメンツ (発行年記載なし) **e メーター機能搭載、3.6kW、単相トータム ポール ブリッジレス PFC (力率補正) のリファレンス デザイン** テキサス・インスツルメンツのリファレンス デザイン No. PMP23338。2025 年 3 月 24 日アクセス。

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。

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

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかるテキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツ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 © 2025, Texas Instruments Incorporated