

# 如何限制 PFC 再浪涌电流

Bosheng Sun

Power Design Services

## 简介

近期发布的模块化硬件系统 - 通用冗余电源 (M-CRPS) 规格 [1] 要求, 当数据中心使用的电源发生输入欠压或断电事件后恢复输入电压时, 需要限制再浪涌电流 (与众所周知的浪涌电流不同)。以前, 这种再浪涌电流没有明确规格, 也没有针对这一事件的特殊控制措施。在本文中, 我将介绍一种低成本、简单且非常有效的方法来满足 M-CRPS 要求。

## 浪涌电流与再浪涌电流

对于功率大于 75W 的前端电源 (PSU), 需要进行功率因数校正 (PFC)。PFC 强制输入电流跟随输入电压, 以使电子负载显示为电阻。PFC 通常有较大的输出电容器。启动前, PFC 输出电容器已完全放电。由于 PFC 结构在  $V_{AC} > V_{OUT}$  时提供电流路径, 因此施加交流电压将生成巨大的电流, 因为输入电压基本上直接施加到 PFC 输出电容器上。此电流称为浪涌电流。

在 PFC 输入侧放置一个具有正温度系数的热敏电阻 ( $R_T$ ) 和一个机械继电器将限制浪涌电流, 如图 1 中所示。在 PFC 上电期间, 该继电器关闭。浪涌电流通过  $R_T$  限制为一个较低的值, PFC 输出大容量电容器 ( $C_{BULK}$ ) 将逐渐充电。输出电压 ( $V_{OUT}$ ) 充电至等于交流电压 ( $V_{AC}$ ) 的峰值后, 浪涌电流就会降至 0。然后, 继电器将打开, 并旁路  $R_T$ , 以减少正常运行期间的功率损耗。

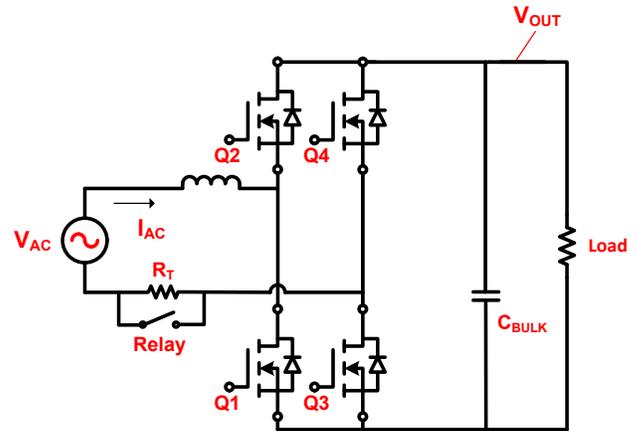


图 1. 使用  $R_T$  和继电器限制 PFC 浪涌电流。

再浪涌电流有所不同: 它在 PFC 正常运行期间发生。如图 2 中所示, 当 PFC 正常运行时, 交流输入电压突然下降。由于仍然施加负载, PFC  $V_{OUT}$  可能会降至较低的值。然后, 当交流电压恢复时, 如果交流输入电压高于  $V_{OUT}$ , 将再次出现浪涌电流。此电流称为再浪涌电流。

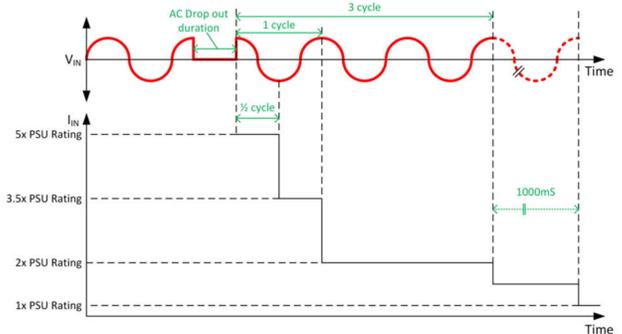


图 2. M-CRPS 再浪涌电流限制和时序。

在此之前, 它完全依赖于功率级元件处理再浪涌电流的能力。测试结果表明, 再浪涌电流可能会跃升至比 PFC 额定最大输入电流高 10 倍以上。如此高的再浪涌电流会损坏电源或缩短其使用寿命, 这就是 M-CRPS 规格限制交流电压恢复后再浪涌电流量的原因。在半个输入频率周期内, 再浪涌电流的均方根值应小于 PSU 最大额定电流的五倍 ( $5 \times I_{rated,RMS}$ ), 而在一个输入频率周期内应小于  $3.5 \times$

$I_{rated,RMS}$ 。此外，在施加交流输入后，输入电流应在两个输入频率周期内稳定至  $\leq 2 \times I_{rated,RMS}$  的值。

当考虑在此期间 PFC 脉宽调制 (PWM) 的运行情况时，问题变得更加复杂。如果 PFC 控制不当，当交流电压恢复时，可能会出现不合适的 PWM 占空比，从而导致可能超过 M-CRPS 规格的另一大输入电流峰值。

另一方面，当交流电压恢复时，PFC 需要提供足够的电流，以尽快将 PFC 输出电压提升至其稳压电平；否则， $V_{OUT}$  将由于负载较重而持续下降，最终触发直流/直流转换器的输入欠压锁定电平。在交流电压恢复后，为 PFC 输出电容器充电将需要较大的输入电流，该电流在  $V_{IN} > V_{OUT}$  时来自再浪涌，或在  $V_{IN} < V_{OUT}$  时来自 PFC 控制环路。

本文提供了一种处理此再浪涌电流的解决方案，能在交流电压下降后恢复时很好地控制再浪涌电流（ $V_{IN} > V_{OUT}$  时）和非再浪涌电流（ $V_{IN} < V_{OUT}$  时），使其足够高以快速提升  $V_{OUT}$ ，但不超过 M-CRPS 限制规格。

### 建议的再浪涌电流控制方法

图 3 展示了建议的低成本再浪涌电流控制方法。与图 1 相比，有两个不同之处。首先， $R_T$  已从交流侧移至直流侧。其次，金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)  $Q_5$  取代了传统的机械继电器。选择固态继电器是因为需要快速开启和关闭继电器，而机械继电器速度太慢，无法满足这一需求。另外，由于 MOSFET 无法切断交流电压，因此其位于直流侧。浪涌电流限制的工作原理与传统方法相同。第一次向 PSU 施加输入电压时， $R_T$  将限制浪涌电流。浪涌电流通过后， $Q_5$  开启且  $R_T$  被旁路。

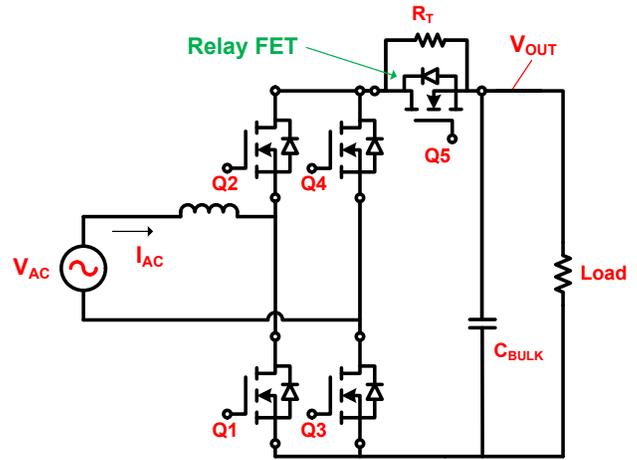


图 3. 建议的再浪涌电流限制硬件结构。

图 4 展示了建议的再浪涌电流控制方法。 $V_{AC}$  是 PFC 输入电压， $V_{OUT}$  是 PFC 输出电压， $I_{AC}$  是输入电流。 $Q_1$  和  $Q_2$  是高频开关，在每个交流半周期中交替用作 PFC 升压开关或同步开关。在 PFC 满负荷运行时，交流线路电压会下降 10ms，然后恢复到其峰值。这是交流电压下降最糟糕的情况。

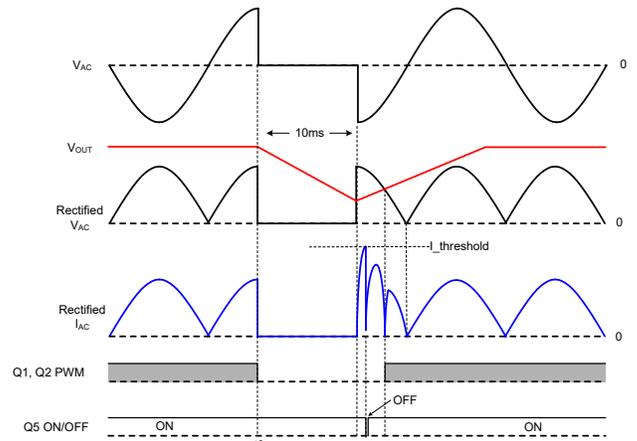


图 4. 建议的交流电压下降和再浪涌电流限制控制算法。

以下是建议的再浪涌电流控制方法：

- 在  $t_0$  时：检测到交流电压下降时， $Q_1$  和  $Q_2$  关闭。您还必须同时关闭 PFC 电压和电流环路，因为如果电压环路和电流环路持续运行，其积分器将累积。当交流电压恢复且 PFC 开启时，将出现较大的 PWM 占空比，从而导致较大的电流峰值，可能会损坏电源。
- 电流环路关闭后，将其复位为 0 并清除其积分器历史记录。如果不清除积分器，当交流电压恢复且 PFC 开启

时，PFC 将在交流电压下降前以相同的 PWM 占空比开启，而该占空比可能不合适。例如，如果在过零时发生交流电压下降，则 PWM 占空比几乎为 100%。如果交流电压恢复交流峰值而未清除电流环路积分器，则交流峰值时发生的占空比几乎为 100%，并将生成一个较大的电流峰值，这可能会损坏电源。对于电压环路，关闭后应将其冻结以保持其内部值。电压环路输出代表负载并用于生成电流环路基准；因此，您需要保持其值，以使负载在交流电压下降期间不会发生变化。

- 在  $t_1$  时：交流电压恢复。由于  $V_{AC} > V_{OUT}$ ，生成的再浪涌电流将为大容量电容器充电。Q<sub>1</sub> 和 Q<sub>2</sub> 保持关闭。
- 在  $t_2$  时：再浪涌电流超出可编程阈值并触发继电器 Q<sub>5</sub> 关闭事件。当 Q<sub>5</sub> 关闭时，再浪涌电流随即受 R<sub>T</sub> 限制，其幅度迅速下降。继电器 Q<sub>5</sub> 仅关闭极短的时间（例如 10μs），然后再次开启。Q<sub>5</sub> 开启后，再浪涌电流会再次上升，直至超出阈值。此过程不断重复，直到再浪涌电流不再超出限值。图 5 显示了此进程的流程图。
- 在  $t_3$  时：  $V_{AC} < V_{OUT}$ 。现在，是时候开启 PFC 了。将电压环路基准设置为等于  $t_3$  时的瞬时  $V_{OUT}$ ，然后开启电压环路。之后，逐渐增加电压环路基准，直到其达到正常设定值。对于电流环路，首先计算占空比  $D = (V_{OUT} - V_{AC})/V_{OUT}$  并将其注入电流环路，以在电流环路开启时使电流环路输出从计算出的 D 开始。然后，开启电流环路。最后，开启 Q<sub>1</sub> 和 Q<sub>2</sub> 使 PFC 正常运行。

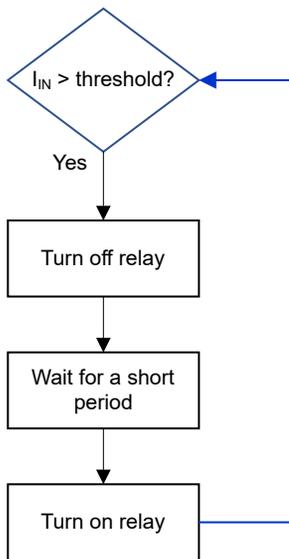


图 5. 建议的继电器开关控制算法流程图。

此过程不断重复，直到  $V_{OUT}$  超过  $V_{AC}$ 。

### 测试结果

我在一台 3.6kW 图腾柱无桥 PFC 上测试了建议的方法 [2]。图 6 显示，当交流电压下降时，其在 10ms 内恢复峰值。通道 1（蓝色）是 PFC 输入电流波形 ( $I_{IN}$ )，通道 2（青绿色）是继电器开关控制信号。图 7 是继电器开启和关闭时的放大图。在交流电压下降期间，继电器 Q<sub>5</sub> 保持开启。C<sub>BULK</sub> 持续将存储的能量输送给负载，且  $V_{OUT}$  下降。交流电压恢复后，由于继电器处于开启状态且  $V_{AC} > V_{OUT}$ ，因此再浪涌电流迅速上升。再浪涌电流达到预定义的电流限制阈值（本例中为 40A）后，继电器就会关闭，并且由于 R<sub>T</sub> 的原因，再浪涌电流会降到非常低的值。继电器仅保持关闭 10μs，然后将再次开启。再浪涌电流将再次上升。整个过程可以将再浪涌电流限制在 M-CRPS 规格范围内，同时仍提供大量电流快速为 C<sub>BULK</sub> 充电。该波形还表明，非再浪涌电流（其中  $V_{AC} < V_{OUT}$ ）控制良好，没有较大的电流峰值。

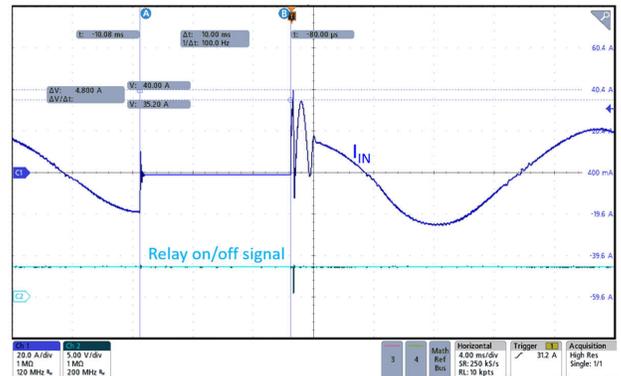


图 6. 交流电压下降后恢复时的再浪涌电流控制。

图 7 显示以有限斜率上升的第二次再浪涌电流，发生这种情况是因为 PFC 输入阻抗（包括电磁干扰滤波器阻抗和印刷电路板布线阻抗）限制了电流上升的斜率。在本例中，第二次再浪涌电流的幅度未超过 40A 的阈值；因此，继电器仅关闭一次。如果第二次再浪涌电流也超过阈值，继电器将再次关闭。

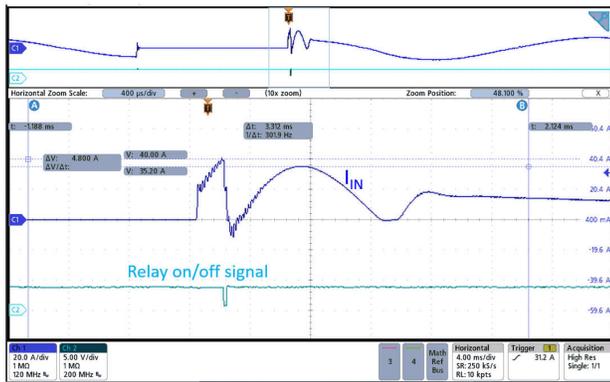


图 7. 继电器开启和关闭瞬间图 6 的放大图。

## 结语

数据中心使用的电源要求交流电压从断电状态恢复时的再浪涌电流不得超过 M-CRPS 规格中规定的限值。通过用固态继电器替代传统的机械继电器，并在再浪涌电流超过可编程阈值时快速关闭/打开继电器，可以很好地控制再浪涌电流，使其不超过 M-CRPS 限制规格，但又足以快速提升  $V_{OUT}$ 。此外，这种基于固件的方法利用了现有的  $R_T$ ，产生了一种低成本且非常有效的再浪涌电流控制解决方案。

## 参考资料

1. **Modular Hardware System – Common Redundant Power Supply (M-CRPS) Base Specification**（模块化硬件系统 - 通用冗余电源 (M-CRPS) 基本规格）。版本 1.05 RC5。开放计算项目：德克萨斯州奥斯汀，2024 年 9 月 25 日。
2. 德州仪器 (TI)（日期不详）**具有电表功能的 3.6kW 单相图腾柱无桥 PFC 参考设计**。德州仪器 (TI) 参考设计编号 PMP23338。2025 年 3 月 24 日访问。

**重要声明：** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司