

# 大功率阵列内实现电流分享



当要把多只 DC-DC 转换器或供电器并联来增大功率或实现容错或两者皆需要时，均流都是重要的考虑因素。较常用的是模拟式方案；方法之一是人为地增加模块的输出阻抗，或感应每个模块的输出电流，利用反馈控制来平均每个模块的电流。

同步式的均流是模拟式以外的选择。这方法是感应或量度每个模块的电流，不需增加输出阻抗。这两个方案互有长短，设计人员在决定选用哪一方案前，应了解其中窍门，知道如何取舍。

大部份功率元件如晶体管、整流器、转换器及离线式供电器等都不是固有地能均担负载。在转换器阵列，一个或多个模块会不合比例地承受负载，除非在系统中已包含了强制的电流平均控制电路。

一只模块，特别是输出电压最高的一只会输出达至其过流设点电流，表示其已在过载情况下工作。接著，它的电压降低，直至输出电压次高的模块开始送出电流。这样子，所有模块都输出电流，但负载则会不平均地分配。如果模块有限流功能，其中一个或多个模块所输出的电流可能会达到限流值（一般是标称值的 15% 至 20%）。而其它在阵列内的模块，只承担少部份负载。

试想像，在一个只有两个模块的阵列，它的负载由单一一个模块供应，如这模块坏掉，第二个模块即时由空载变为满载，在这时段输出会短暂压降，可能令系统故障，导致关闭或重设。

另一个情况，如果由两个模块均分负载，其中一个失效，另一个模块受到的瞬变影响会较小(由半负载至满载)，对输出电压的影响亦更小。当负载降至零(空载)时，电感电流中断，所有前向式模块、共振式或脉宽模块的动态反应都会降级。

同样在一个有两个模块的阵列，如果由一只模块负责所有负载，产生热力，那只模块的寿命亦会较短。依据经验法则，工作温度每增加 10 °C，元件的平均寿命便会减半。

在实现均流的系统，模块与系统都在相同的温度环境工作，这温度亦较在没有均流的阵列下工作的模块低。再者，相同的工作温度亦意味每个模块的寿命相等。

均流的重要性在于它改善了供电系统的表现，优化瞬变和动态反应，减轻热处理负担，提高可靠性及延长阵列中所有模块的寿命。故此，均流是功率阵列中重要元素。

并联模块或供电器时，有多个方案可以实现均流，其一是简单地加入电阻，与负载串联。较实用的有降压调衡 (Droop - Share) 方法。它因应电流增加而降低输出电压。而另外两种常用方法则是驱动器与倍增器阵列和模拟式均流控制。两者表面上看似相像，但实现起来，便不大相同。

驱动器与倍增器阵列通常需要有一只智能模块（或驱动器块）与一只或多只倍增器。而模拟式则并联多只完全相同的模块，每只模块都是有智能的。

在阵列中强迫均分负载最常用方法之一是感应每个模块的输出电流，将数值与平均电流值比较，然后把该模块的电流调节至与平均电流值相等。完成布局，需要一只电流感应电阻器与负载串联。在每只模块加上感应放大及需要一只加法放大器(summing amplifier)，然后利用电压调整端(trim pin)或电压检测端(sense pin)来调节输出电压，均分负载。

有些时候设计人员会省掉电流检测电阻而以铜线上的 IR 压降来感应电流值，但这会有不良影响。首先、铜有一个温度系数，当铜线受热，它的阻值升高，影响了它感应电流值的稳定性。再者、铜线氧化或腐蚀亦会改变参数。故此，一只精密的电流感应元件如精密的电阻器是必要的。

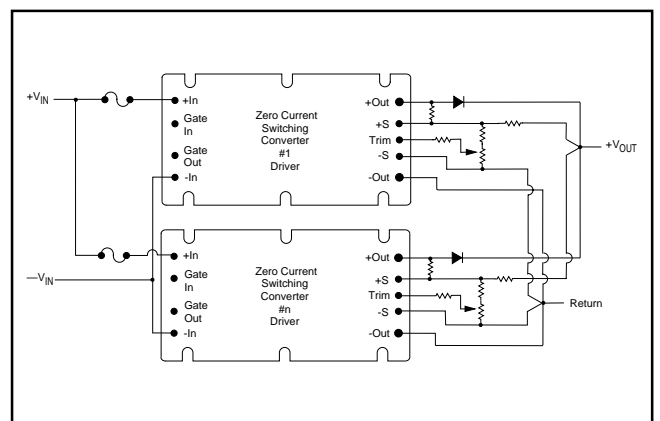


图 1 降压调衡(Droop Share)方案，增加模块的输出阻抗来实现均流。连接模块输出的二极管是以感应电流提供容错。

电阻器的值可以由几毫欧姆至 **100m Ω**，由耗电量或功率决定。选择一个适合的阻值需要在灵敏度及功耗量中的矛盾取平衡。电阻值愈大，信噪比或抗干扰能力愈佳，但功耗亦愈大。

如何决定合适的电阻从而取得稍高杂信的信号并不容易掌握。另一个难关是方案需要很好的电气和机械布局，它需要很准确的线迹阔度和最短线迹长度，配合去耦来减低噪声。一个经验丰富的工程师，这应当不成问题。但偶一不慎，仍有很多犯错的机会。

降压调衡方法是人工调节增加输出阻抗，令到电流平均分配。方法是在模块的控制环路内注入误差讯号，令输出电压跟随电流改变。当负载电流增大，电压便降低，由于它们在同一节点中的总和是相同，所有模块会输出大致相同的电流，如其中一只模块的电流较其它模块大，它的输出电压会被调低一点，令它在相同电压输出相同的电流，实践方法是利用二极管的压降与电压成比例的特性来调节有关模块的输出电压。

降压调衡有优点亦有缺点，它的优点是可以应用在任何拓朴架构上，而且设计简单，成本不高，缺点是它需要电流检测电阻，而且每个模块都需要加上一个这样的器件。此外，亦需要牺牲调压的精度，虽然这一般的应用不会构成问题。

在普通情况下，不建议把不同模块混合使用，尤其是均流原理不同的模块。尽管如此，降压调衡这方法还是包容性较强的方案，利用简单的外围电路，也可使不同型号模块，甚至不同供应商的模块混合使用而均流。

很多系统采用驱动器和倍增器（或主/从关系）阵列来增大功率（图2）。驱动器是用来设定及控制输出电压的；倍增器担当辅从的角色，用来加大功率以满足系统需求；用准共振（quasi-resonant）的驱动器/倍增器模块应用在阵列内，已固备了电流均分功能。因为在每个模块内，每一个脉冲盛载的能量是相等的，如果把输入输出连在一起，而模块工作频率相同，所有模块便会输出在元件误差范围内的等量电流。

阵列内的瞬态反应由单个号令模块决定，就是再增加模块的数目亦不会改变。辅从模块之间只需一个连接点，无须微调、修改或外加元件来实现均流。这均流是动态的，一般保证是5%，必须注意，当选用倍增器模块时，每个模块的输入、输出电压和输出功率必须与驱动器模块相同。

驱动器与倍增器阵列有两种好处。它只有一个控制环路，不会出现“环内有环”的不稳情形。同时，它的瞬态反应优越。但是，这方案没有容错备份。如果驱动器损坏掉，整个阵列内的电压便不能保持。

模拟式均流控制方案是用来并联两个或以上的相同模块，每个模块都有智能。模块内的电路会主动的调整电压，令多个电源输出等量的电流。这方法的缺点是，阵列内的每个模块本身是个独立的调压环路。同时需要均流元件和电流控制环路。

模拟式方法在某程度上支援备份，但它很容易损坏——纵使只是汇流排内的小错误。损坏轻微的会影响均流，严重的甚至会毁坏阵列内每一只模块，原因是模块以单线连接，流经的电流可以把模块打坏。

均流是容错阵列中的重要考虑，无论选用哪种方案，每当增加一个模块或供电器用作备份时，都要负担一个固有的成本。

顺带一提，今日很多应用除了要求容错或备份外，还要容许热插拔。这样，便需要设计热插拔咭，以免操作人员误触危险电流或电压。

同样需要留意，当有一只模块失效时，系统感应可以验测出来并发出警号。一个良好的热插拔系统必须保证在拔出时对汇流排的干扰减到最小。精确地说是受影响的电压汇流排，无论是输入或输出，一定不可以因压降而令系统故障。

供电失效可以损毁整个系统，故此、为了使系统可以持续工作，多加一个备份是值得的。在一组并联的模块内多加一只备份模块 (N+1) 可以大大提高系统的可靠性，成本也增加不了多少。

如何设计备份会受到可用空间及成本的限制。例如两个 **200W** 全型模块，可以并联提供 **400W** 输出，再加一只 **200W** 的模块便组成 **2+1** 备份阵列，总输出是 **600W**，所需空间是 **16.5 in<sup>3</sup>**。如改用 **4** 个 **100W** 的半型模块，则需要多加一只 **100W** 半型模块，组成 **4+1** 备份。总输出 **500W**，体积 **14 in<sup>3</sup>**。虽然这方案所需空间较小，它的滤积失效率却较多。因为这个阵列的元件数目包括模块、或门二极管较多，同时对监控电路及装配工序的需求亦增多。

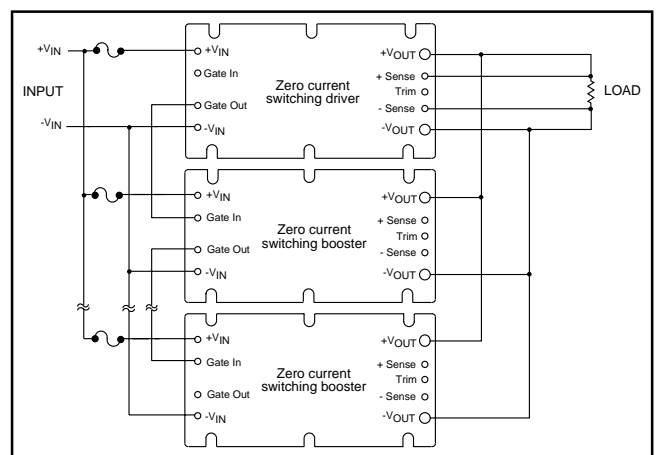


图2 大部份模块以驱动器/倍增器阵列增加输出功率。这阵列由一只具有智能的驱动模块，及一个或多个辅从模块来增大功率。

或门二极管可以与每只模块的输出串联以提共容错 (图1)，它在容错系统中保持容错隔离。如不加或门二极管，任何一只模块的输出短路会令整个阵列失效。但它亦会带来不利因素。包括减低整体效率和降低可靠性。要提高效率，或门二极管一定要高温工作，这样可以减少前向压降。二极管的反向漏电压出现在一只模块输出短路时才会是个问题，此时其工作在反向偏压情况，这方面涉及工作温度是重要考虑因素。

采用零电流开关架构模块、变频转换器都可以实现同步式的电流均分来增大功率实现容错 (图3)，每个模块都有控制阵列的能力，发号令的模块发出一个脉冲，使阵列内的模块以高频同步开关。

同步脉冲是通过连接模块的并联均流排线发送。该汇流排线由单线构成，而且是双向的，容许模块发送和接收脉冲讯号。所以、如果主导模块放弃控制权，另一只模块会取而代之，输出不受干扰。

脉冲讯号可以容许设计人员选择电容或变压器来实现模块与汇流排间直流隔离耦合。这种耦合防止阵列因模块某些内部失效而影响其它模块，达进一步容错作用。

若阵列内模块距离很远，或利用独立电源工作，可以采用变压器耦合变频模块来实现均流 (图4)。变压器耦合的脉冲讯号可以提供较强的共模杂信免扰性，同时与主电源隔离，保持电压在安全的低水平。这在需要机板对机板均分负载及备份的应用特别有效用。

同步式均流免除了电流感应或量度器件，也不影响稳压调整率，亦无需调节负载。此外、它的瞬态反应优越，消除多重环路控制的麻烦，及如上所述，备高水平的噪声免扰性。

以上所提的同步式电源均分方法只用于准共振模块和变频模块，如Vicor的第二代DC-DC转换器。这些转换器都有智能，在每一个均流脉冲提供相等能量。第二代电源模块包括48V、300V和375V系列，有2V、3.3V、5V、12V、15V、24V、28V及48V 8组输出，三种封装，最高功率达600W。

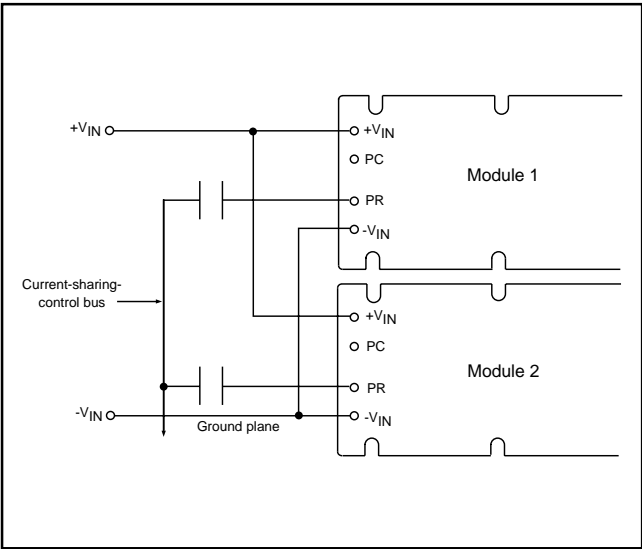


图3 同步式均流架构简化均流控制，提升容错表现，每只模块可以发送脉冲，令阵列内的模块同步开关。

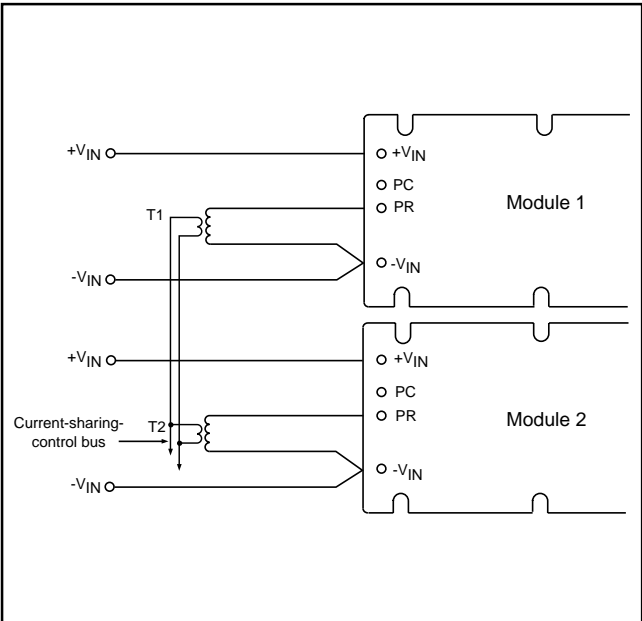


图4 在同步均流架构利用变压器耦合，提供高水平共模噪声抗扰特性，并能与主电源隔离，维持安全低电压。故模块的距离可以较远，及可以由独立电源供电。