

双向电源：“安静”改变世界的驱动力

David Bourner



摘要

在可靠电源互连上转换可互换的负载和电源，在开关模式电源设计艺术领域已变得越来越普遍。简单、可靠的方案最终应用在了美国宇航局国际空间站的 DC 母线系统以及我们更熟悉的汽车混合动力电动车等具有重要战略意义的应用中。[a] [b] 随着更加多样化的能源能够经济高效地转化为电力，优化将电源从一个 DC 电势提供给另一个 DC 电势的需求现已变得更加明显。开关模式电源转换是一种实现高效 DC 稳压极为成熟的方法。研究发现，适应专有开关模式谐振拓扑可带来高性能的可靠双向转换器 (BDC)。BDC 在众多应用中提供的灵活性可带来巨大的经济效益及运营成果。

双向功能不仅对我们熟悉的当前世界很重要，而且对可为开发非常适合扩展和处理各类远程位置的能源存储及实用方案提供无限可能的未来世界也很重要。

使用正弦幅值转换器的电源设计

正弦振幅转换器™(SAC™)运作的方式与采用硬开关的转换器极为不同，可提供高效率以及低传导和辐射等优势。[C] SAC 通常用于构建成一个电源系统，在其它地方有介绍过实例。[d] 它是一款无稳压的双端口恒功率转换器，可根据基于 $1/K$ 的给定变压比提供应用 DC 电压的比例换算，其中 K 是 SAC 的整数值转换因子。例如 $K = 8$ 而且将在其输入电压范围内的 260 至 400V 的 DC 电压输入模块，则其输出电压则在 32.5 至 50 VDC 之间。鉴于 BCM 的效率高达 98%，因此输入的 DC 电流可等效地乘以 K 因子。假设 384V 的输入电流为 1A DC，在输出端的电压将为 48V 左右，而电流为 8A 左右。

扩展 SAC 的效用

SAC 架构不涉及电子反馈的使用。无控制单元的功率级如图 1 所示。功率级包含为输入原边的串联谐振全桥，中间抽头的副边采用同步整流 MOSFET。与 SAC 的内部平面磁性有关的寄生参数特性得到了全面的描述和严格的控制。精确定义的漏感，可以用来优化原边和副边 FET 的零电压、零电流开关时序。图 2 是 SAC 引擎两个电源端口的电压及电流波形。为了简单起见，图 1 中省略了与原边控制器，该控制器可将隔离的驱动信号提供给每个 FET。该控制器不仅在功率转换过程中监测电流和电压，而且还可针对外部瞬态事件或故障提供保护，以防对 SAC 产生不利影响。对故障情况的响应通常仅需几个开关周期。开关频率在 1MHz 的级别，相应的纹波频率是基本开关频率的两倍。

在常规使用中，功率从原边或高压 (HV) 端口转换到副边或低压 (LV) 端口。正向模式为输入电压的降压功能。

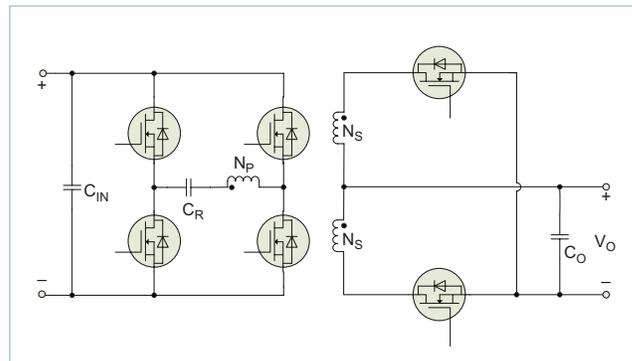
我们进行了一些实验来说明在反向模式下SAC的工作情况。一旦通过原边启动 SAC™后，功率流向由驱动特定电源端口的电源决定。最初的实验表明，反向工作模式提供一个非常高效的升压功能，该功能与加在转换器 LV 端上的电压和HV端相关的 K 因子无关。小到 1/32 的 K 因子的实例验证了这一事实。

图 3 所示的实例展示了一个启动步骤后实现反向模式工作的序列。在初始状态下，电路连接如图所示，HV 及 LV 源均关闭，电子负载为基础 (E LOAD) 的电阻器和开关组合与原边断开。

采用将42.5V电压加于 HV端，而 LV 端不加负载，与使用 255VDC 加在SAC端，K = 1/6 变压比的降压操作一致。图 3 中的绿色箭头突出显示了这一步骤。由于副边的二极管的阻挡，LV 端不能将电流输入 LV DC 源。进行任何负载连接之前，SAC会消耗由于维持待机模式所需的功率。对于额定功率为 1.65kW 的转换器，待机功率为 10W。

然后打开 LV 源，在 +OUT、-OUT 端之间施加 55.5V 的电压。LV 端口上的电压瞬间从 42.5 转换到 55.5V, SAC 的反应是将其 HV 端口电压升高至 333V，如图所示。HV 阻塞二极管可阻塞电流返回 HV DC 源的路径。我们可以通过关闭 E LOAD 开关将 E LOAD 带入该电路。在这一点上建立了两个新的电流电平：LV 电流紧随 E LOAD 电流之后，其可上升到

图 1 简化的常规 SAC 引擎。

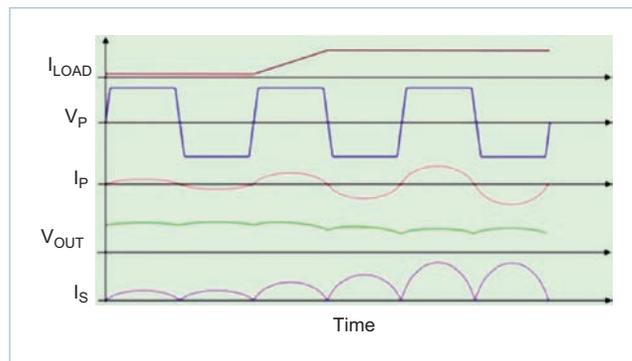


一个由E-LOAD 阻抗决定的水平，新的电流电平设置为与 BCM 的功率吞吐量能力相称的值。

在另一个启动序列中，可以在不影响 SAC 的情况下，首先为 LV 端施加电压。SAC 的 LV 端和 HV 端之间没有 DC 电流路径，这也需要纳入考虑范围内。下一步是为用来为 SAC 的原边控制器施加电压。小电流通过二极管从 HV 源到达 SAC 控制器，SAC 控制器通过内部连接至 HV 端口的偏置电路通电。

一旦控制器启动并执行其检查的预启动序列，它就启用了 SAC 功率级。在这种情况下，有了预先设置为 255V 的 HVDC 源，电压就直接从初始电压跳升到 333V。我们可以发现，一旦 E LOAD 开关关闭，BCM 就会以反向模式将电流从 SAC 的 HV 端口传输到 E-LOAD 电阻器中。

图 2 与负载跳变有关的 SAC 零电压开关的示波图。VP 是对角 MOSFET 开关动作产生的原边绕组电压。开关频率精确设置为 Cr 和电源频率磁场漏感形成的低 Q 振荡回路的谐振频率。请注意一次电流和二次电流 IP 和 IS 都天然都是正弦。SAC 内有限的互连阻抗可在负载开始时使电压略微下降。



与电压及电流有关的升降功能可在正向和反向模式之间互换。无论工作模式如何，方程式 1 是适用于 SAC 工作的通用公式：

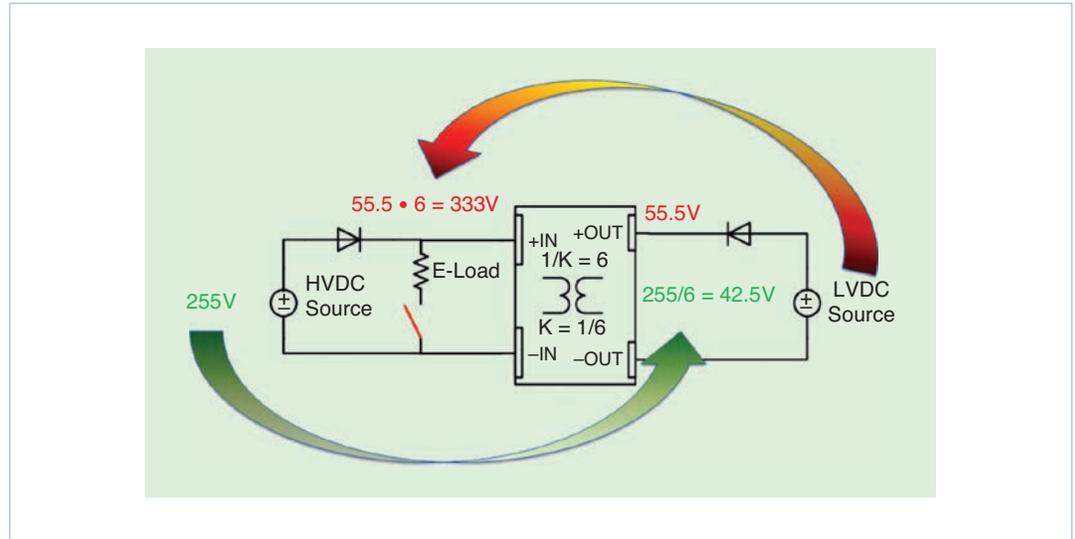
$$K = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{I_{IN}}{I_{OUT}} \quad (1)$$

修改的双向转换器

开关模式电源系统 (SMPS) 的一个特殊需求是提供 5 个以上的升压转换系数。SAC™ 在反向模式下以 5 个以上的升压因数非常高效地工作，这是它固有的特性。从这一点来看，它只是一个扩展功率级的问题，这已在修改的架构中实现了。这种布局非常适合 384VDC 配电方案，这些方案在有限的功率吞吐量下表现出了良好的转换效率。在这种反向处理能力的基础上，反向 SAC 可改变设计空间。一次侧包括堆栈的半桥布局。

输入堆栈采用具有中等品质因数的低成本 MOSFET 实现。这有助于实现具有极好电压平衡能力的前端。[E] 表 1 是一些用于比较双向转换新旧 SAC 拓扑的性能参数。

图3
SAC 反向启动
的实例



功率流向分类

我们可以根据图 4 中所示的基本配置对应用进行大致分类。SAC 的独特之处在于，当在双向模式下运行时，它会根据两个端口电压中的哪一个结束了驱动转换器而改变其模式。

BDC 应用实例

在分析最新双向转换器模块 (BDM) 的优势之后，我们可以了解到基于增强型 SAC 的部件如何用于实际设置，以解决独特的设计难题。

汽车能源收集与主动制导悬架系统

随着电动汽车的出现以及随之而来的利用马达-发电机总成（将汽车轮子与汽车底盘连接起来）收集能量的商机的出现，图 5 所示的未稳压功率级需要一个外部控制器来管理能量在 LV 电池中的输入输出。马达/发电机单元将动能转换为电能。在一些高端应用中，可以使用反向通道来帮助使用主动悬架提高乘坐体验，主动悬架可以跨过车轮前方障碍物。在本实例中，从 400V 采集母线收集的能量最终可存储在可以作为快速反应能量存储的 LV 电池及超级电容器中。请注意提供有反向起动机，其可用于通过独立于主功率级的升压转换器启动 BCM®，从而可从 LV（通常是 12 或 48V）电池启动 BCM。

与 SAC 的内部平面磁性有关的寄生特性参数得到了全面的描述和严格的控制。

表 1
执行 BDC 任务和处理 1.65kW
DC 功率的不同 SAC 引擎的
性能参数比较

参数	现有老式 BDC	最新 BDC	最新 BDC 的优势
转换器数	6	1	转换器更少
输入电压范围 (V)	360 – 400	260 – 410	输入电压范围更宽
开关频率 (MHz)	1.75	1.1	内核损耗更少
10% 负载时的效率 (%)	81	94.5	提高 13.5%
50% 负载时的效率 (%)	94.4	97.8	提高 3.4%
100% 负载时的效率 (%)	95.7	97.2	提高 1.5%
输出电阻 (mΩ)	28.3	22.6	电阻损耗更低
无负载功耗 (W)	39	10	更低的无负载损耗, 大约 1/4
体积 (cm ³)	28.86	10.48	占用更少的 PCB 空间
功率密度 (W/cm ³)	57.2	157.4	提高 2.75 倍
重量 (g)	84	41	重量仅一半

图 4
功率流向分类实例: 在每种
情况下, K 都是变压比

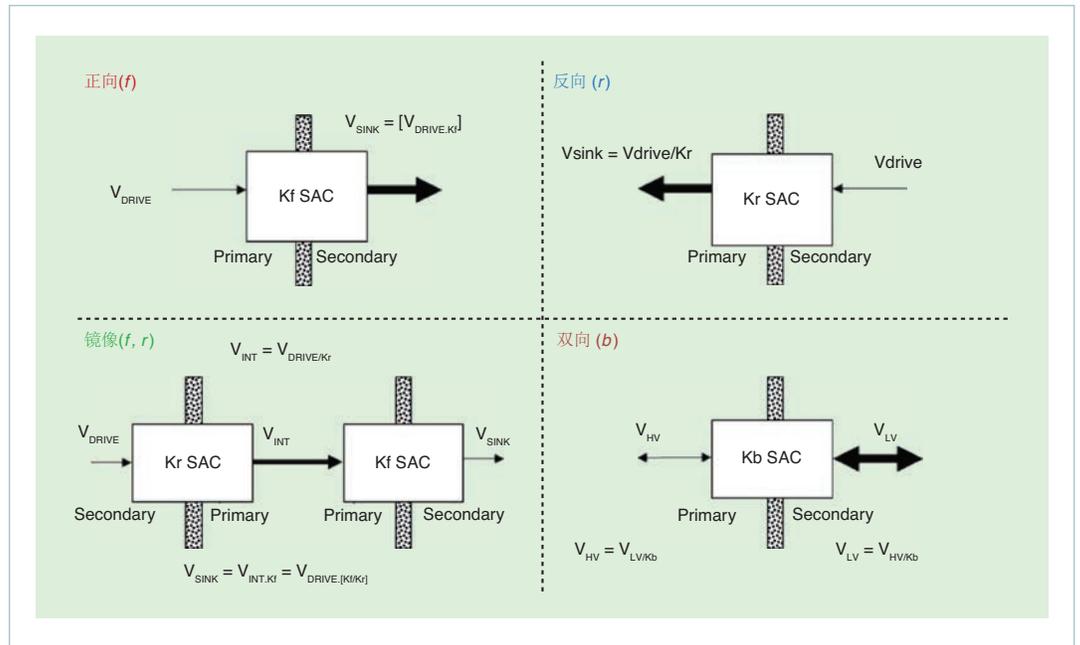


图 5
双向转换工作实例: 汽车反馈
制动能源采集系统应用

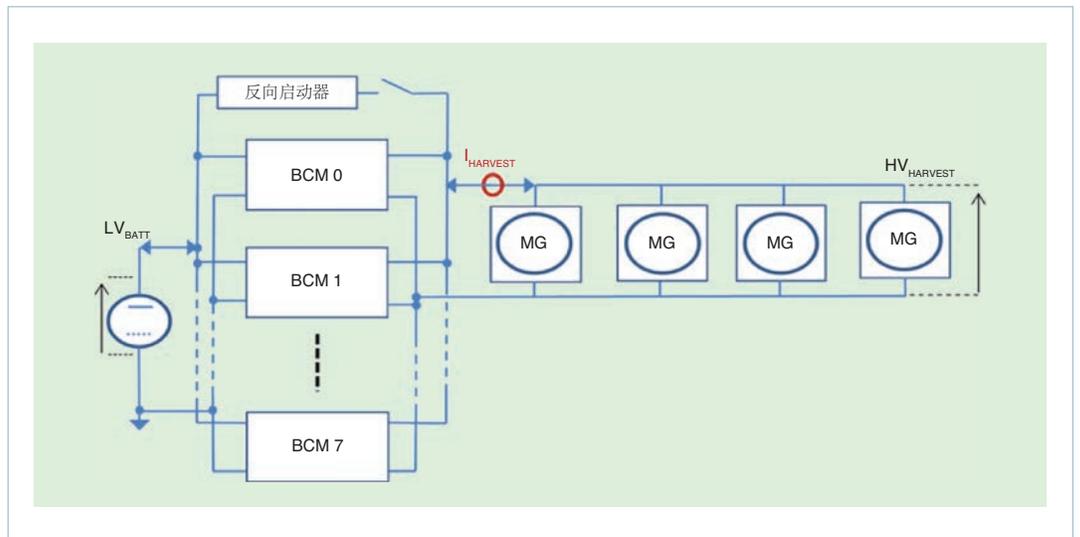


图6
民用混合电网实例

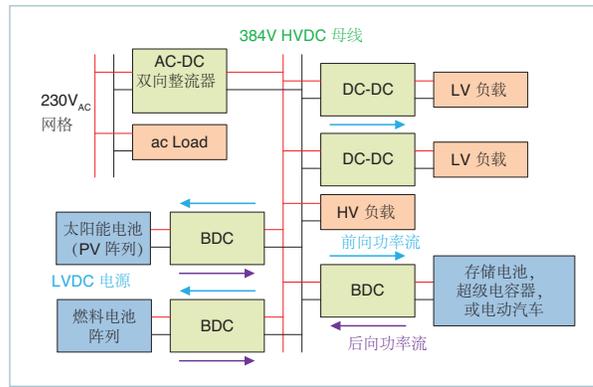
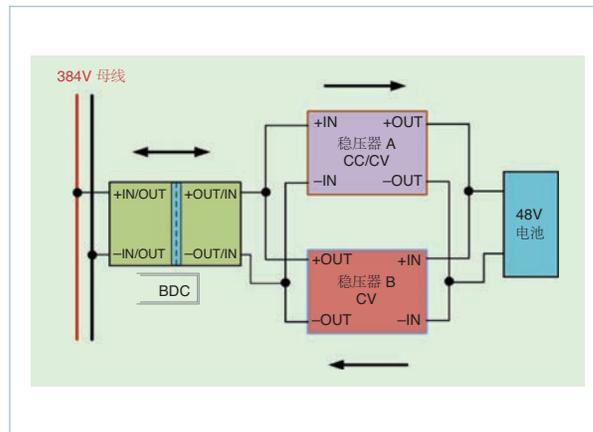


图7
使用两个专用单向稳压
功能构建双向功率级



基于 HV 连接的智能电源

随着智能电源的出现，住宅和商业应用都受到了关注，其中对供电进行了离网限制。高昂的成本使得 AC 配电设施无法提供给岛屿或偏远社区。交替排列可以为与交替电源相结合的负载提供 DC 电源。

在图 6 中，个人住宅的 AC 和 DC HV 及 LV 连接的负载可以通过微电网配电系统连接至其它电源和负载，在本例中，还包括电动汽车或混合动力汽车。BDC 可在个人用户、存储和微电网电源系统组件之间提供连接。

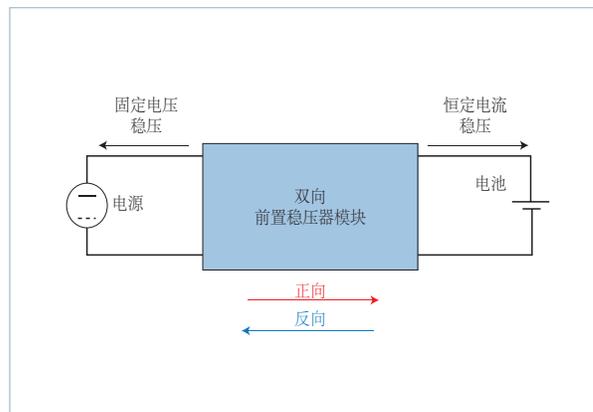
该方案需要在系统层面施加外部控制，才能管理所需的电源再分配或应对异常情况。需要指出的是，在混合电网功率流背景下，电动汽车只是另一种潜在的电源，以及我们习惯使用后停车充电的常规负载。

临时观察结果

除此之外，SAC™ 这一架构还可为轻松改变功率流提供所需的灵活性。众多采用两象限开关实现的功率级可通过对控制、开关和传感的方式进行修改（而不必改变功率级本身）支持这种模式。有人预测，将会设计出新的电源组件，其可暗中移动电源，无需考虑初始启动过程中哪个端口需要激励。

图8

双向稳压器实例这可在任何既定时间工作在两个模式中的一个模式下：
恒流稳压，正向模式下在电池连接端口提供恒压小电流充电模式功能；电源/负载端口的固定稳压模式，在反向前置稳压器模块工作中实现



还有另一个挑战需要解决，涉及对输入存储元件的电源进行控制，如化学电池和超级电容器等。需要充电时，应用电流限制，直到达到预先确定的电压水平，电流限制是将充电系统维持在其安全工作限度内的首选措施。此外，包括监控双向功率流的一致性电池调节还可延长电池使用寿命。在双向电源方案中引入稳压器和电流调节器，可在任何实用系统中实现对关键分区的准确控制。

图 7 概述了一种提供稳压功能的方法，其可在所显示的两个端口（384VDC 母线和 48V 电池组）之间互换。在任何既定时候，都只使用两个稳压器中的一个，而另一个则处于待机状态。更好的方法将涉及针对专门设计的单个双向稳压器做一些工作。功率级原封不动，但传感及控制组件针对功率级的自动启动和快速重新配置进行了设计，可提供端口的无缝互换。数字控制可提供这个急需的可编程层，有助于重复使用相同的电源硬件，以获得少量数字控制开销。实际上，我们现在拥有一款稳压器，可补充 SAC 提供已变压的隔离式 DC 电压及电流的能力。这一概念的实例如图 8 所示。

总结

介绍了原理、定义以及大量双向功率转换实例。
基于这里所示解决方案的功能，对双向稳压器提出了建议。

双向功率转换是任何系统的重要组成部分，其中替代能源、能源存储和负载管理都处于竞争状态。在能源方面，需要将服务的应用看作封闭的系统。应用越远，电源设计和供电方面就越重要。

作者简介

David Bourner (dbourner@vicorpower.com)

于 1981 年毕业于英国巴斯大学，获电气与电子工程学士学位，1991 年毕业于南安普顿大学，获哲学硕士学位。此外，他还曾就读于约翰霍普金斯大学应用物理实验室的怀廷工程学院，并获微波优化系统硕士后证书。David 现在是 Vicor 公司马萨诸塞州技术销售中心的一名高级现场应用工程师，曾在休斯网络系统、美国模拟器件公司、美国国家半导体公司以及 Micrel 集团担任过各种职务，并曾于马里兰大学巴尔的摩分校担任过计算机工程教授。他的研究方向包括 MOS 模拟集成电路数据转换器系统设计，并于 1990 年获得英国国防部的拨款资助。

参考文献

- [a] R. W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, Norwell, MA: Kluwer, 1999.
- [b] U. Ghisla, "A novel, non-isolated bus converter enables high efficiency energy transport to supply high power loads in cars," in *Proc. Electric / Electronic Systems in Hybrid and Electric Vehicles and Electrical Energy Management Conf.*, Wiesloch, Germany, 2016, pp. 453 – 461.
- [c] M. Salato, "The sine amplitude converter topology provides superior efficiency and power density in intermediate bus architecture converters," Vicor Corp., Andover, MA, White Paper, 2011.
- [d] "Point of load sine amplitude converters and methods," by P. Vinciarelli. (2016, Dec). U.S. Patent 7,145,786. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US7145786>
- [e] A. Patel, "A new bidirectional DC-DC converter for fuel cell, solar cell, and battery systems," in *Proc. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conf.*, Long Beach, CA, 2016, pp. 150 – 155.

联系我们: <http://www.vicorpower.com/zh-cn/contact-us>

Vicor 公司
Room1610, 596 Middle
Longhua Road, Xuhui
District, Shanghai, China
Tel: 021-6029 3928
www.vicorpower.com

email

客服: vicorchina@vicorpower.com
技术支持: chinaapps@vicorpower.com