

Application Brief

电源转换系统 (PCS) 中的隔离式双向直流/直流转换器



引言

电源转换系统 (PCS) 是储能系统 (ESS) 的关键组成部分，控制着电池的充电和放电。PCS 可以将存储在总线中的电能转换为交流电，并为电网或用户设备供电。PCS 主要由双向交流/直流转换器、双向直流/直流转换器等组成。

图 1 显示了典型直流耦合储能系统的方框图，其中双向直流/直流转换器负责电池的充电和放电。由于总线电压较高 (360V 至 550V)，为安全起见，低压电池包系统 (40V 至 60V) 需要双向隔离式直流/直流转换器。本文从总体上分析不同隔离式双向直流/直流拓扑的优缺点。

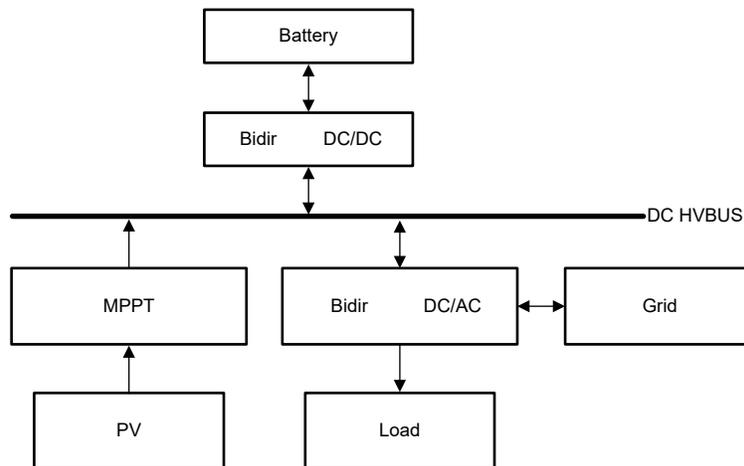


图 1. 直流耦合储能系统

双有源电桥 (DAB)

对于隔离式双向直流/直流转换器，双有源电桥 (DAB) 直流/直流转换器是常用拓扑之一，如图 2 所示。由于元件数量相对较少，因此 DAB 结构相对简单，在特定的工作范围内，初级侧开关可以实现零电压开关 (ZVS)。通过最基本的单相移 (SPS)，可以调整 DAB 初级侧和次级侧驱动信号之间相移角的极性和幅度，从而控制传输功率的幅度和方向。当初级驱动信号先于次级侧时，功率从初级侧流向次级侧，DAB 此时处于正向模式。相反，当 DAB 处于反向工作模式时，DAB 的传输功率随着相移角增大而增加。

但是，在传统的单相移控制 (SPS) 下，电感器电流峰值和 RMS 值很大。关断电流与峰值电感器电流相关，因此大电感器电流会导致高关断损耗和循环损耗。此外，DAB 的软开关范围也受负载和增益的影响。在轻负载和不匹配增益的条件下，很难实现软开关。有些文章提出了提高自由度 (DOF) 的方法，如双相移控制 (DPS)⁽¹⁾、扩展相移控制 (EPS)⁽²⁾、三相移控制 (TPS)⁽³⁾，以期改善这种情况，但自由度的增加也会导致系统和控制逻辑更复杂。

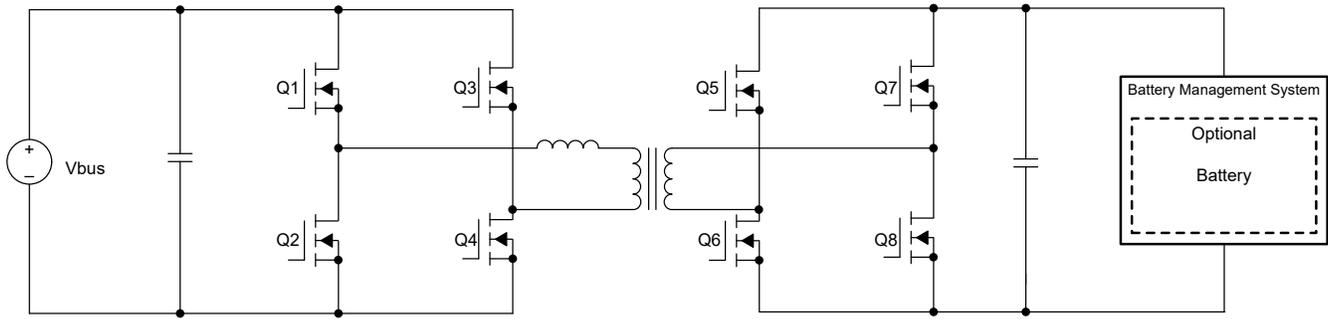


图 2. 双有源电桥直流/直流转换器

双有源电桥串联谐振转换器 (DAB-SRC)

图 3 展示了 DAB-SRC 拓扑。与图 2 中所示的传统 DAB 相比，DAB-SRC 的谐振回路多了一个谐振电容器。这个电容器可以对隔离式变压器的直流偏置进行隔离，并通过谐振降低 H 桥的开关损耗。此外，由于谐振回路具有低通特性，DAB-SRC 中的电流几乎是正弦波，因此将产生更小、更高阶的谐波并减小滤波器尺寸。

与传统的 DAB 类似，DAB-SRC 可以通过控制不同的自由度⁽⁴⁾ 来实现零无功功率、全范围软开关和最小 RMS 电流，这意味着该拓扑可以实现非常高的效率和功率密度。

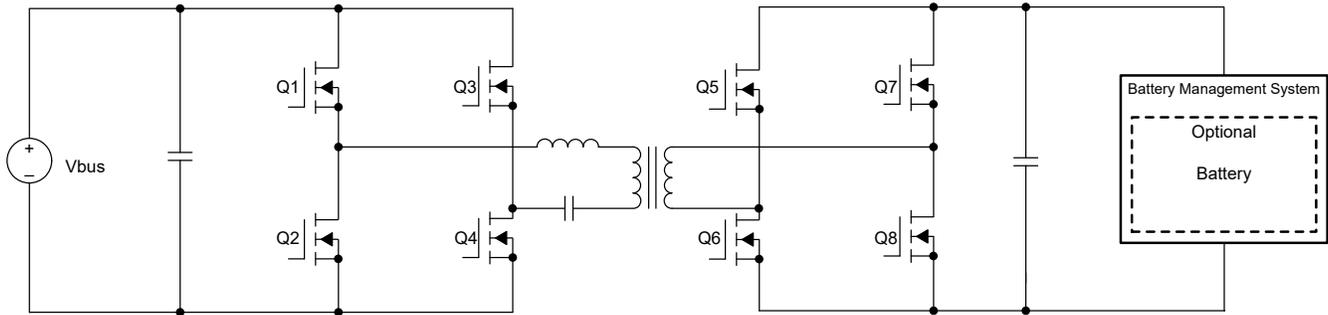


图 3. 双有源电桥串联谐振转换器

LLC 谐振转换器

与 DAB 无法通过 SPS 实现全范围软开关的情况不同，LLC 谐振转换器可以在满负载和增益范围内轻松实现软开关。但是，传统的 LLC 谐振转换器仅用于单向功率传输；由于 LLC 具有良好的软开关特性，因此将 LLC 引入双向转换器已成为研究的焦点，如图 4 所示。双向 LLC 转换器的拓扑使用全桥网络取代了传统 LLC 转换器中使用的次级整流器网络。在正向运行模式下，次级侧的全桥网络用于同步整流，这意味着双向 LLC 谐振转换器可以在特定增益范围内实现初级侧的 ZVS 和次级侧的零电流开关 (ZCS)。

在反向模式下工作时，LLC 类似于串联谐振转换器，电压增益小于 1，LLC 在需要高压增益时难以应用。采用具有降低频率范围控制功能的串联谐振转换器为电动汽车车载充电器实施 3.3kW 直流/直流转换器文章提出了一种特殊的控制方法来实现高于 1 的增益⁽⁵⁾。

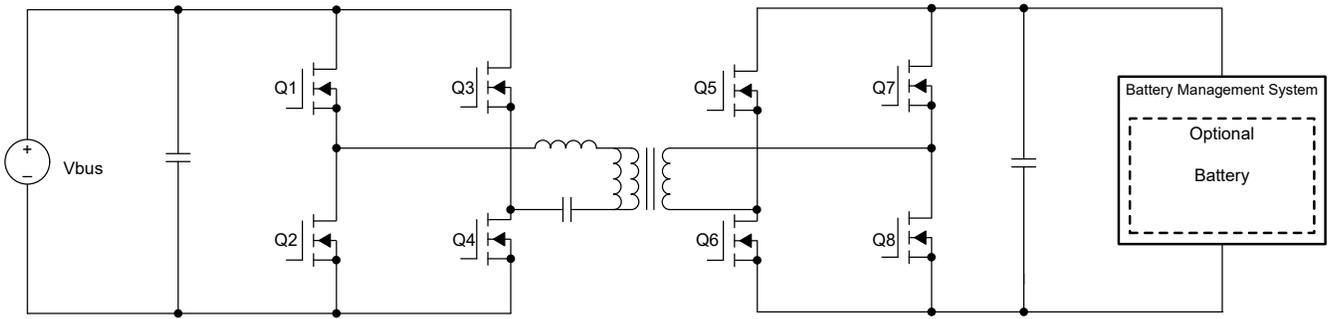


图 4. LLC 谐振转换器

CLLLC 谐振转换器

当双向 LLC 在正向和反向两种运行模式下工作时，为了保持原始 LLC 的增益和谐振特性，可以通过在变压器的次级侧添加谐振元件来形成双向 CLLLC 谐振转换器。图 5 提出了一种对称的双向 CLLLC 拓扑，其中在变压器的次级侧增加了一个谐振电感器和谐振电容器。转换器谐振回路是对称的，所以正向和反向运行模式是一致的，可以实现 ZVS 和 ZCS，并保持 LLC 的谐振定律和增益特性，这有助于降低转换器分析和设计的复杂性。

但是，对称 CLLLC 的谐振网络包含五个谐振元件，这会增加转换器的尺寸和成本，尤其是低压侧的电容器。与此同时，额外的磁性元件也会增加传导损耗。因此，图 6 提出了一种非对称 CLLLC 结构，在变压器的次级侧只有一个谐振电容器，这种结构将谐振网络简化为四元件结构，减少了元件数量。该结构有助于减小转换器的尺寸并降低其成本，有利于提高功率密度并避免次级侧电感器的传导损耗。在运行特性方面，非对称 CLLLC 与对称 CLLLC 是一致的，这意味着对称和非对称 CLLLC 都可以在正向和反向模式下实现软开关，并且 CLLLC 具有 LLC 的共振定律和增益特性。但是，由于非对称结构，非对称 CLLLC 的正向和反向模式的谐振定律和增益特性存在差异，因此分析和设计过程的复杂性很高。

此外，当 CLLLC 在反向模式下工作时，次级侧谐振回路 RMS 电流很大。无论是对称还是非对称 CLLLC，低压侧电容器的成本和可靠性都不能忽视。

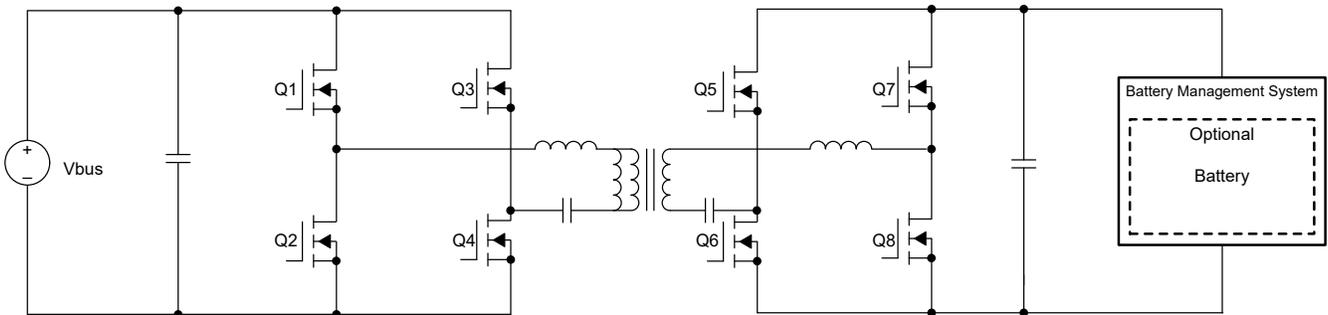


图 5. 对称 CLLLC 谐振转换器

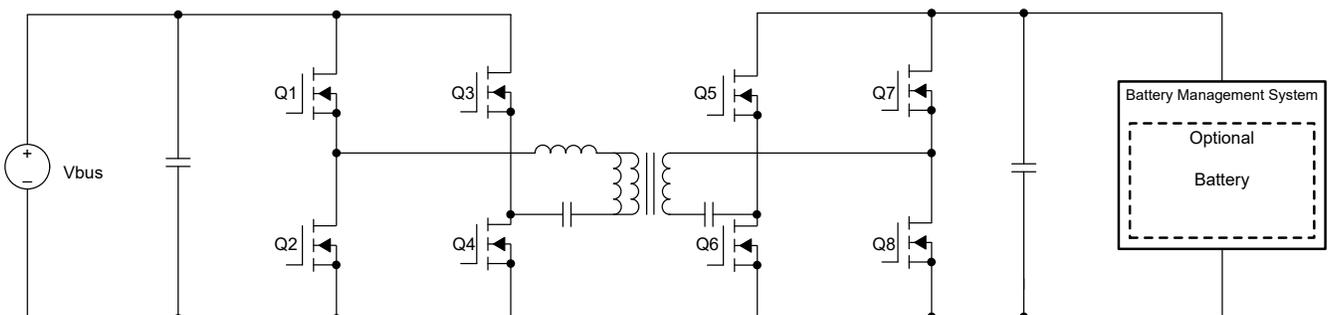


图 6. 非对称 CLLLC 谐振转换器

结语

在直流耦合储能系统中，低压电池包系统通常需要使用隔离式双向直流/直流转换器来对电池进行充电和放电，并且隔离式双向直流/直流拓扑的选项有很多。

DAB 拓扑很简单且易于控制，但是在传统的 SPS 控制下很难实现全范围软开关，并且损耗很大。虽然 DAB 可以通过增加自由度进行优化，但控制却很复杂。

DAB-SRC 在 DAB 的基础上增加了谐振回路，可以实现更好的软开关范围和更低的关断电流。DAB-SRC 还可通过多 DOF 控制功能实现高效率和高功率密度。

LLC 是一种典型的谐振拓扑，可以通过设计工作区来实现完整的初级侧 ZVS 和次级侧 ZCS。虽然 LLC 效率很高，但问题是，在反向模式下工作时，该拓扑相当于串联谐振转换器，其中最大增益为 1，需要使用特殊控制逻辑进行升压。

CLLLC 基于 LLC，但在次级侧添加了谐振回路来实现对称增益范围，其软开关的特性与 LLC 类似，但问题在于低压侧电容的成本较高并且反向模式下工作时具有较大的电流 RMS 值。

参考资料

1. S. Shao, M. Jiang, W. Ye, Y. Li, J. Zhang, and K. Sheng, "Optimal phase-shift control to minimize reactive power for a dual active bridge DC - DC converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 10, pp. 10193 - 10205, Oct. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2890292.
2. R. T. Naayagi, A. J. Forsyth, and R. Shuttleworth, "Performance analysis of extended phase-shift control of DAB DC - DC converter for aerospace energy storage system," in *Proc. IEEE 11th Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, Jun. 2015, pp. 514 - 517, doi: 10.1109/PEDS. 2015.7203567.
3. S. S. Muthuraj, V. K. Kanakesh, P. Das, and S. K. Panda, "Triple phase shift control of an LLL tank based bidirectional dual active bridge converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 10, pp. 8035 - 8053, Oct. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2637506.
4. M. Yaqoob, K. H. Loo, and Y. M. Lai, "A four-degrees-of-freedom modulation strategy for dual-active-bridge series-resonant converter designed for total loss minimization," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 2, pp. 1065_1081, Feb. 2019.
5. G. Liu, Y. Jang, M. M. Jovanovic, and J. Q. Zhang, "Implementation of a 3.3-kW DC - DC converter for EV on-board charger employing the series-resonant converter with reduced-frequency-range control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 4168 - 4184, Jun. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2598173.

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司