

# 隔离式双向功率转换器的数字控制

Juan Carlos Rodriguez, 功率转换系统工程师

## 摘要

本文探讨隔离式双向DC-DC功率传输的实现方案, 即通过调整专用数字控制器, 使其除了具有标准的正向功率传输(FPT)功能外, 还支持反向功率传输(RPT)功能。文中将介绍系统建模、电路设计和仿真, 并通过实验对理论概念进行了验证。应用表明, 在两个能量传输方向上, 转换效率始终高于94%。

## 简介

模块化电池储能系统(ESS)有助于可再生电力的有效利用, 因而是构建绿色能源生态系统的关键技术。梯次利用电池ESS应用日趋广泛。在这个子市场中, 预计高达80%的废弃电池会用于

ESS, 在固定电网服务中焕发新生, 从而将电池的使用寿命从5年延长到15年。预计到2030年, 这些系统会给电网增加1 TWh的容量。在不久的将来, 这种新兴应用必将在能源市场中变得更加重要。

典型实现方案是将不同电池模组堆叠起来, 通过功率转换器将其能量传输到集中式交流或直流母线(随后以某种形式将能量分配给负载)。此类系统的挑战在于, 每个模组具有不同的化学组成、容量和老化曲线。在传统的模块化拓扑中, 最弱的模组会影响整个电池堆的总可用容量(图1)。

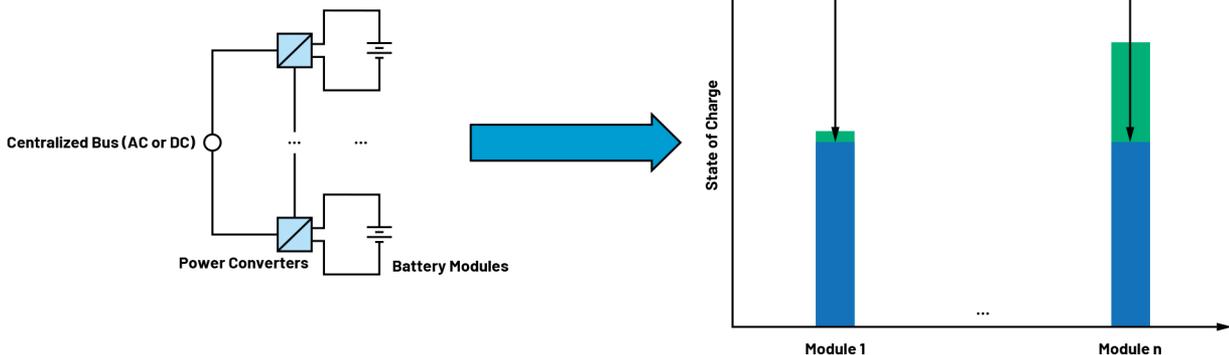


图1. 模块化ESS的挑战

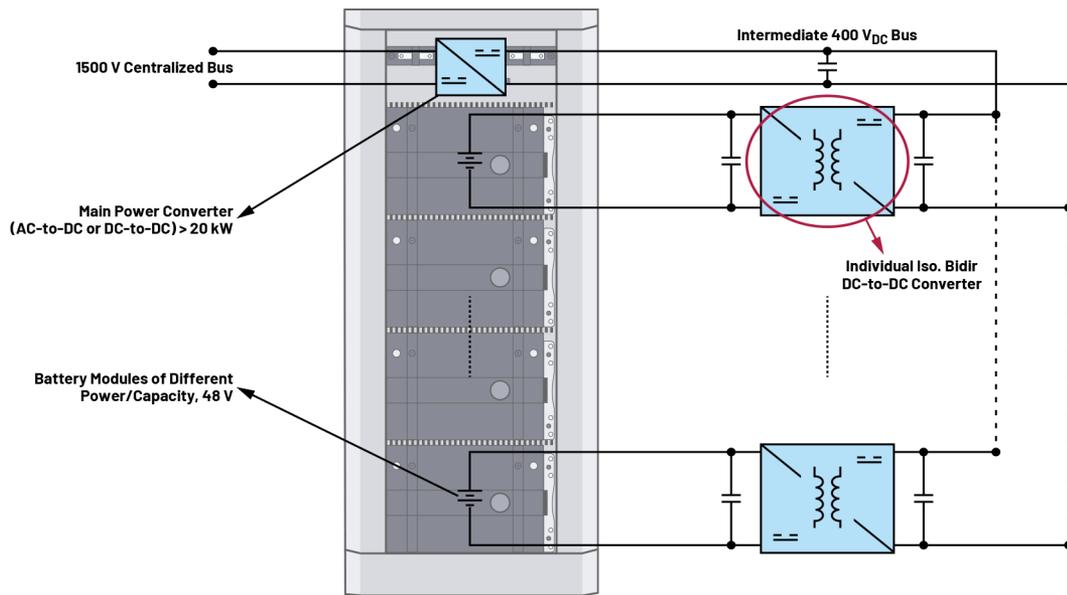


图2. 基于电池的模块化ESS

为了解决这一限制，在图2所示的架构中，电池堆中的能量通过每个电池模块的单独DC-DC转换器传输到公共中间直流母线。然后，该能量通过主功率转换器支持集中式中压(MV)交流或直流母线。图2中的电压和功率水平是根据市场上ESS的典型数据选择的：48 V电池模组、400 V (DC)中间直流母线、20 kW以上（高功率）主功率转换器以及高达1500 V的集中式母线<sup>2</sup>。

在图2中，电池堆中每个模块的接地基准不同，因此需要通过隔离让每个电池模块实现单独的DC-DC转换器。此外，为了支持梯次利用电池ESS等混合系统，每个转换器还必须能够双向传输功率。这样，就能轻松实现每个模块的独立充放电以及电荷平衡。因此，本文讨论的应用核心模块是DC-DC转换器，它既是隔离的也是双向的。

下面将说明，如何调整功率转换专用的数字控制器（通常仅针对单向功率传输而构建），使其支持双向操作，这样控制器就能作为一种良好的替代方案来安全可靠地实现所需类型的DC-DC转换器。

## 功率转换应用的专用数字控制器

对于高功率DC-DC转换器（大于1 kW）中开关器件的控制，数字控制是当前的工业标准，而且它通常基于微控制器单元(MCU)<sup>3</sup>。尽管如此，由于各种工业应用更加重视功能安全(FS)，因此使用专用数字控制器可能更有优势。从系统设计的角度来看，更简单的功能安全认证可以简化设计过程，从而缩短总体开发时间，更快获取收益，因此在模块化实施中特别有利。

专用数字控制器优于MCU的一些原因概述如下<sup>4</sup>。

- ▶ 微控制器依赖于软件，包含的状态数量较多，被认为不稳定，因此在IEC 61508标准制定之前，安全系统中不允许使用微控制器。MCU的大量“功能安全”工作都在软件开发阶段。
- ▶ 除了软件之外，MCU本身也必须经过认证。
- ▶ 虽然专用数字控制器（作为可配置设备）仍然是数据驱动的，但其配置过程使用有限可变语言(LVL)，而不是MCU特有的完全可变语言(FVL)。
- ▶ 作为顺序数字机，专用数字控制器的功能可以通过测试全面验证，而这对于MCU中的软件来说一般是不可能的。因此，当使用专用控制器时，设备会集成核心安全功能。
- ▶ 与专用控制器中的集成安全功能相比，MCU实现方案中增加的安全功能可能需要相当多的额外硬件。当使用故障模式、影响和诊断分析(FMEDA)时，额外的硬件往往会增加系统级别的复杂性。
- ▶ 使用专用控制器时，额外的安全性（如果需要）可以通过外部MCU（通常在系统级别提供）获得。

ADI公司的ADP1055是一款专为隔离式DC-DC高功率转换而设计的数字控制器，提供了一系列功能来提高效率和安全性。这些功能包括：可编程过流保护(OCP)、过压保护(OVP)、欠压保护(UVLO)和过温保护(OTP)。与市场许多现成的等效器件一样，该控制器设计用于单向能量传输，即FPT。为了实现双向操作，使用该控制器的应用必须进行调整，以便也能在RPT下工作。下一部分将

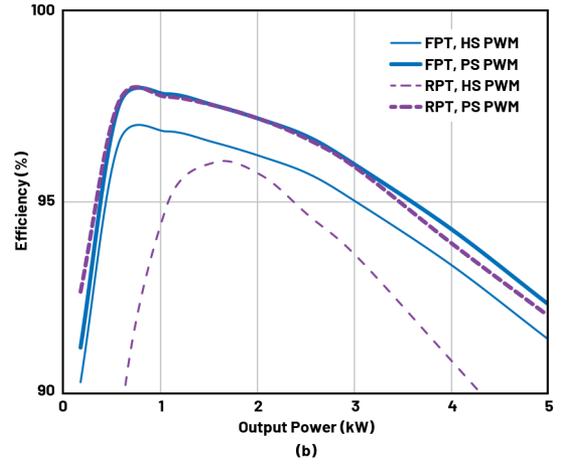
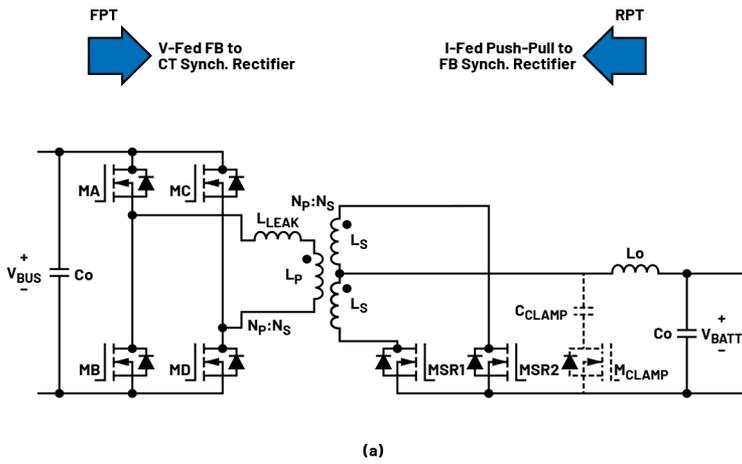


图3. 功率转换拓扑仿真：标准操作中的(a)模型和(b)效率

探讨对FPT和RPT模式都很重要的一个方面，即目标DC-DC转换器的效率，在调整过程开始之前必须了解这一点。

### 实现高效能量转换

在各种隔离式双向直流功率传输技术中，图3a中的架构因其实现简单而成为商业上最常用的架构之一<sup>5</sup>。

表1. 仿真研究参数

电路参数	值
额定直流母线电压	$V_{BUS} = 400 \text{ V (DC)}$
额定电池电压	$V_{BATT} = 48 \text{ V (DC)}$
开关MA、MB、MC、MD	SCT3017AL 650 V/18 A SiC MOSFETs
开关MSR1、MSR2、 $M_{CLAMP}$	IPB065N15N3 150 V/136 A MOSFETs
变压器	$N_p/N_s = 6:1$ , $L_m = 50 \mu\text{H}$ , $L_{LEAK} = 0.1$ 至 $1 \mu\text{H}$
扼流圈电感	$L_o = 50 \mu\text{H}$
箝位电容	$C_{CLAMP} = 1 \mu\text{F}$
母线电容	$C_o = 10 \mu\text{F}$
开关频率	100 kHz (有效200 kHz)

这种拓扑既可以看作是FPT中的电压馈送全桥到中心抽头同步整流器，也可以看作是RPT中的电流馈送推挽式转换器到全桥同步整流器。为了说明应用的常见挑战，图中显示了一个典型用例，

其初级（直流母线）为400 V(DC)，次级（电池模组）为48 V(DC)，功率水平大于1 kW。使用LTspice®对开关频率为100 kHz的典型宽带隙(WBG)功率器件的操作进行仿真。仿真使用的参数如表1所示。

图3b中的结果显示，当使用常规硬开关(HS) PWM时，较高功率水平下的效率迅速下降。将RPT与FPT进行比较时，这一点更加突出。为了改进操作，我们确定了两种主要损耗机制，通过下文说明的相应开关技术可以降低损耗。

- ▶ 软开关：图4a显示在这种低漏感设计中，当使用常规PWM时，初级开关MA和MB在无源到有源开关转换过程中不会快速关断。这种状况会在整个系统中产生较高的开关损耗。在这种情况下，使用相移(PS) PWM（亦称零电压开关(ZVS)或软开关）有助于在这些转换期间将漏源电压降至零。为此，我们可以提供与负载相关的适当死区时间，使得开关的漏源电容可以完全放电。应用相移的结果如图4b所示。
- ▶ 有源箝位：图5a显示在次级开关MR1和MR2关断期间，在其漏源电压上观察到很大的尖峰和振铃。这些瞬态事件会危及开关的完整性，浪费能量，并导致电磁干扰(EMI)。使用附加开关（例如图3中的 $M_{CLAMP}$ ）实现数字控制有源箝位是减轻该尖峰负面影响的较佳备选方案<sup>6</sup>。这样可以进一步提高该架构的效率。应用某种形式有源箝位的结果如图5b所示。

实施这些策略后，5 kW时RPT模式下的转换器效率从不足80%提高到90%以上。这些仿真研究也预测到FPT和RPT具有相似的效率，如图3b所示。

为了实现这些开关功能，ADP1055提供6个可编程PWM输出以形成开关时序，并提供2个可配置为有源箝位吸收器的GPIO。这两种功

能都可以在用户友好的GUI中轻松编程实现。有关该数字控制器的这些和其他功能的优势，请参阅ADP1055-EVALZ用户指南，其中考虑了标准FPT应用。

确定实现可行效率水平的机制（对于本应用的FPT和RPT模式均适用）后，接下来我们探讨如何调整以适应RPT。

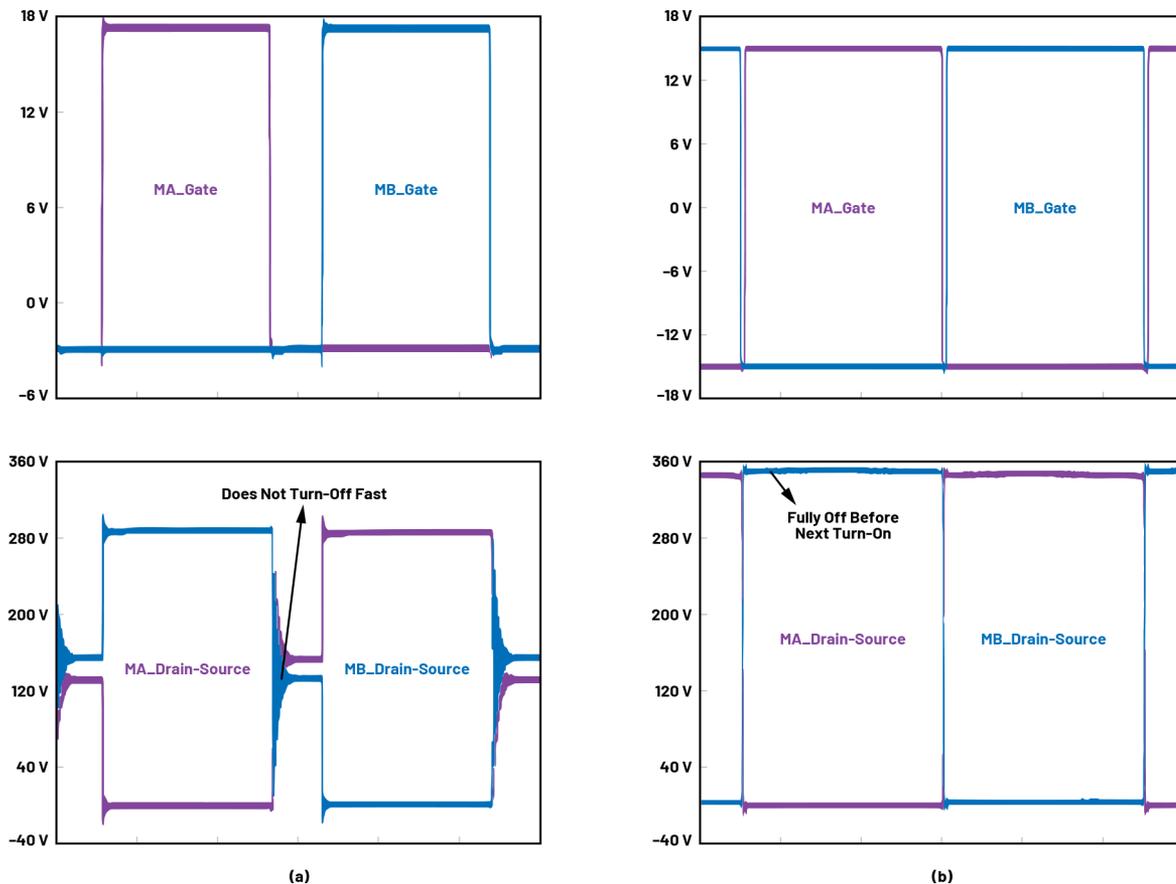


图4. 初级开关无源到有源转换：(a) HS PWM, (b) PS PWM

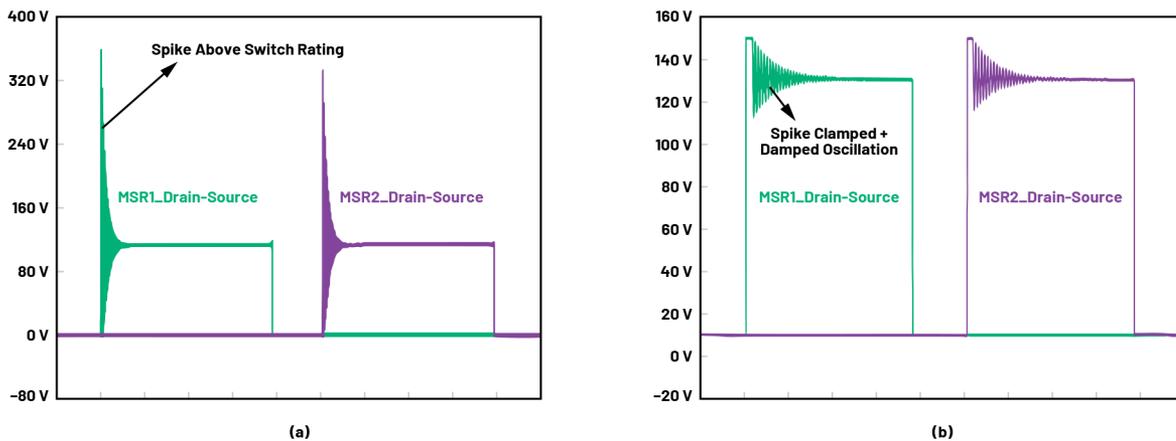


图5. 初级开关无源到有源转换：(a) HS PWM, (b) PS PWM

## 适应反向功率传输

为了演示所研究的应用在RPT下的运行情况，我们创建了低压(LV)实验装置进行概念验证。此装置基于ADP1055-EVALZ用户指南中的硬件，最初设计用于48 V<sub>DC</sub>至12 V<sub>DC</sub>/240 W FPT的标准情况，使用

ADP1055作为主控制器，开关频率 $f_{sw} = 125 \text{ kHz}$ 。为了适应RPT操作，需要适当修改硬件和软件。图6(上)显示了针对此任务的信号链硬件部分，其重点如下：

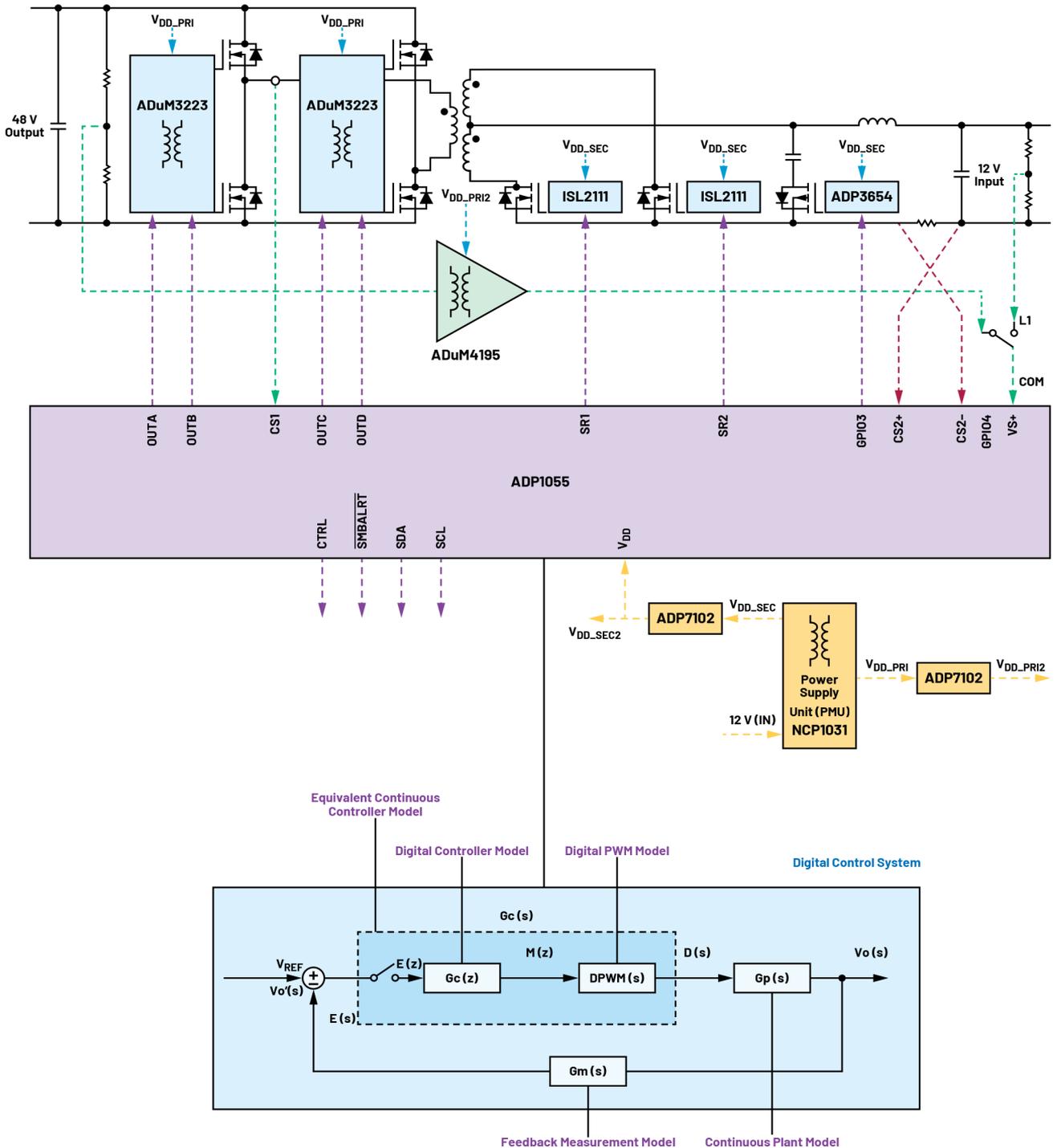


图6. 信号链利用专用数字控制器来适应RPT

- ▶ 使用两个匹配的隔离式半桥栅极驱动器ADuM3223来导通和关断四个初级开关。这些驱动器的精密时序特性（隔离器和驱动器最大传播延迟为54 ns）可准确地将控制信号反映到PWM中。
- ▶ ADP1055-EVALZ用户指南中的隔离电源单元经过重新接线，并补充了一个辅助精密LDO(ADP1720)，以适应系统中的两个接地基准，并为应用中的所有不同IC供电。
- ▶ 在测量部分，分流电阻上的电流测量端子发生交换，以便在控制器的端子CS2+和CS2-上以正确的方向测量整个转换器的变压器次级的输出电流。
- ▶ 最后，隔离式放大器ADuM4195用于安全、准确地测量直流母线电压。在RPT模式下，直流母线电压是输出变量，而在FPT模式下，电池侧电压是受控输出。

基于ADuM4195的测量方案是对控制环路硬件的一项重要补充。除了安全的5 kV隔离电压（从高压初级侧到低压控制侧）、多达4.3 V的宽输入范围以及精度约为0.5%的基准电压外，ADuM4195还有高达200 kHz的最小带宽。与典型的并联稳压器和光耦合器解决方案相比，它支持实现更快的环路操作，从而提供更好的瞬态响应，这对于应用在125 kHz开关频率下的运行至关重要。图7显示了最终的实验装置，图6中增加的硬件在基于ADuM4195的测量子卡中实现，该子卡已添加到ADP1055-EVALZ用户指南中的原始评估板中。

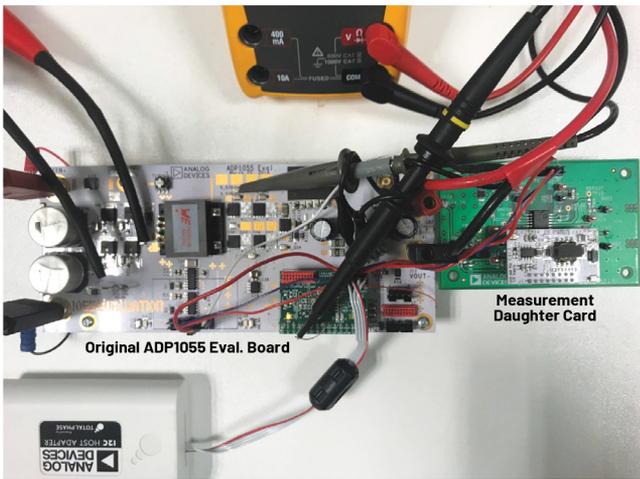


图7. RPT概念验证的实验装置

图6（下）还描述了为适应RPT在软件方面的配置。我们深入研究了数字控制系统。结果通过流程的描述块进行总结说明，如下所示：

- ▶ 通过更改PWM设置，使占空比变化与次级电感充电成比例，来实现正确的稳态响应。这是根据该架构在RPT模式下的升压型操作而得出的。
- ▶ 我们采用ADP1055-EVALZ用户指南中设计的LCL输出滤波器，通过交流小信号等效电路技术来确定设备在拉普拉斯域中的

转换函数 $G_p(s)$ 。与FPT不同，设备在RPT下的响应是具有右侧零点(RHZ)的二阶系统的响应，这是升压转换器在CCM下的典型响应。请注意，这种类型的系统本质上不稳定，需要减少误差放大器的带宽。

- ▶ 利用MATLAB® System Identification Toolbox，根据用作隔离跟随器的ADuM4195的频率响应，对反馈测量 $G_m(s)$ 进行建模（图8）。经确认，主导极点在200 kHz左右，可确保在控制系统的目标带宽（250 kHz可观测双频的10%左右）之上仍能提供快速响应。

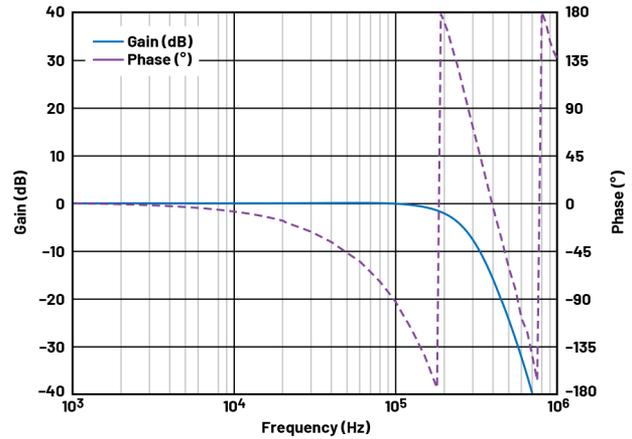


图8. ADuM4195的频率响应

- ▶ 我们选择在控制器的标准数字补偿器中添加一个极点，以减少整体控制系统的带宽，这在这种非最小相位升压式转换器设备中是必要的。因此，我们使用公式1中的数字控制器（常数定义参见ADP1055用户指南）。

$$G_c(z) = \frac{d}{1-z^{-1}} + c \frac{1-bz^{-1}}{(1-az^{-1})(1-ez^{-1})} \quad (1)$$

为将分析保持在拉普拉斯域内，我们根据数字控制理论创建了 $G_c(z)$ 的连续时间模型 $G_c(s)$ 。因此，首先添加一个计算延迟( $z^{-1}$ )，而连续时间中的最终表示通过如下方式实现：利用(a) Tustin近似 ( $z = \frac{4f_{sw} + s}{4f_{sw} - s}$ ) 和(b) Padé近似模拟离散PWM(DPWM)延迟( $T_{sw}/2 = 1/4f_{sw}$ )，使得：

$$G_c(s) = \frac{G_c(z)}{z} \Bigg|_{z = \frac{4f_{sw} + s}{4f_{sw} - s}} = \frac{4f_{sw} + s}{4f_{sw} - s} \times \frac{1 - \frac{s}{8f_{sw}}}{1 + \frac{s}{8f_{sw}}} \quad (2)$$

- ▶ 最后，为了设计一个稳定的响应，我们利用MATLAB Control System Designer作为常规连续时间控制环路，研究了开环转换函数 $G_o(s) = G_p(s) G_m(s) G_c(s)$ 。

由此可以观察到，如果使用与FPT相同的控制常数，RPT下的响应将不稳定。因此，正确设计 $G_c(s)$ 中常数的最终值对于确保运行可靠至关重要。一旦通过设计实现了稳定的开环转换函数，控制器就会变换回数字域。图9（左）显示所设计的数字滤波器的频率响应 $G_c(z)$ ，利用图9（右）中ADP1055的GUI可以通过图形化方式轻松配置该滤波器。

我们还配置了上一节中研究的提高效率功能（具有自适应死区时间和有源箝位的PS PWM）。实验发现，为了在RPT的有源到无源转换中实现适当的ZVS，有必要修改PWM序列中的死区时间。具体来说，我们修改了次级开关的导通时间点，使其发生在每次有源到无源转换间隔之前，以允许电流反向<sup>9</sup>。

测试表明适应RPT的修改工作是成功的，从12 V次级输入获得了48 V初级输出。对于负载和输入电压变化，输出电压调节都很出色，相对标准差(RSTDEV)分别为0.1%和0.02%，如图10a所示。图10b和图10c分别显示了转换效率和对50%负载变化的阶跃响应。两种情况下，RPT模式下的效率水平都与FPT模式相似，在中等功率范围内的峰值效率为94%。阶跃响应参数（过冲和建立时间）在RPT模式下为(1%; 1.5 ms)，而在FPT模式下为(2%; 800  $\mu$ s)。我

们观察到，较低的过冲，稍慢的建立时间，构成稳定的瞬态响应。这些结果证明，调整数字控制器以支持双向功率传输的设计过程是有效和成功的。

## 结论

为在能源市场中实现安全可靠的应用，采用功率转换专用数字控制器是一种不错的备选方案。这是因为，与微控制器相比，数字控制器有助于简化功能安全认证，从而缩短系统级设计时间，更快地获取收益。这些器件通常是针对单向功率传输构建的，本文探讨了如何进行修改以支持双向操作。通过理论模型、仿真和实验研究展示了隔离式双向DC-DC转换器在基于电池的ESS中的应用。结果验证了该应用的可行性，两个方向的能量传输实现了相似的性能。

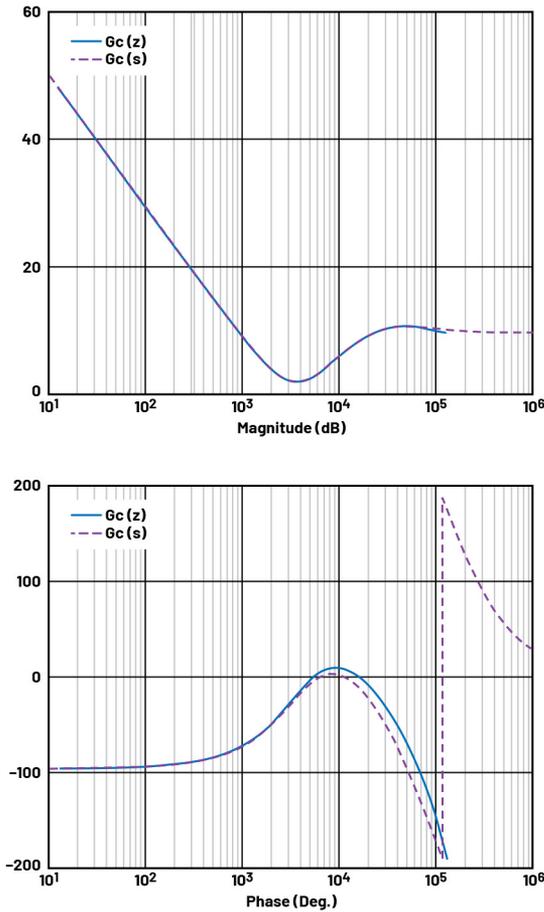
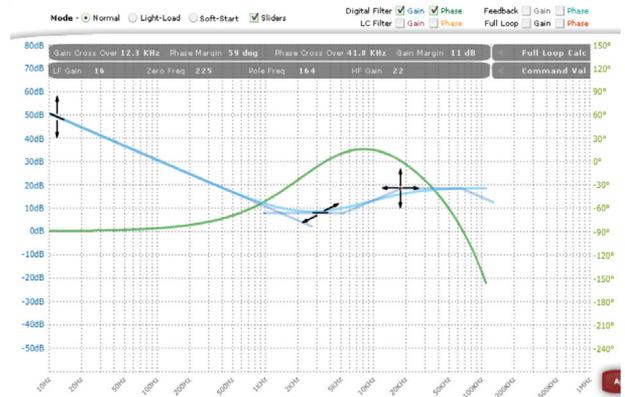


图9. ADP1055上配置的数字滤波器响应



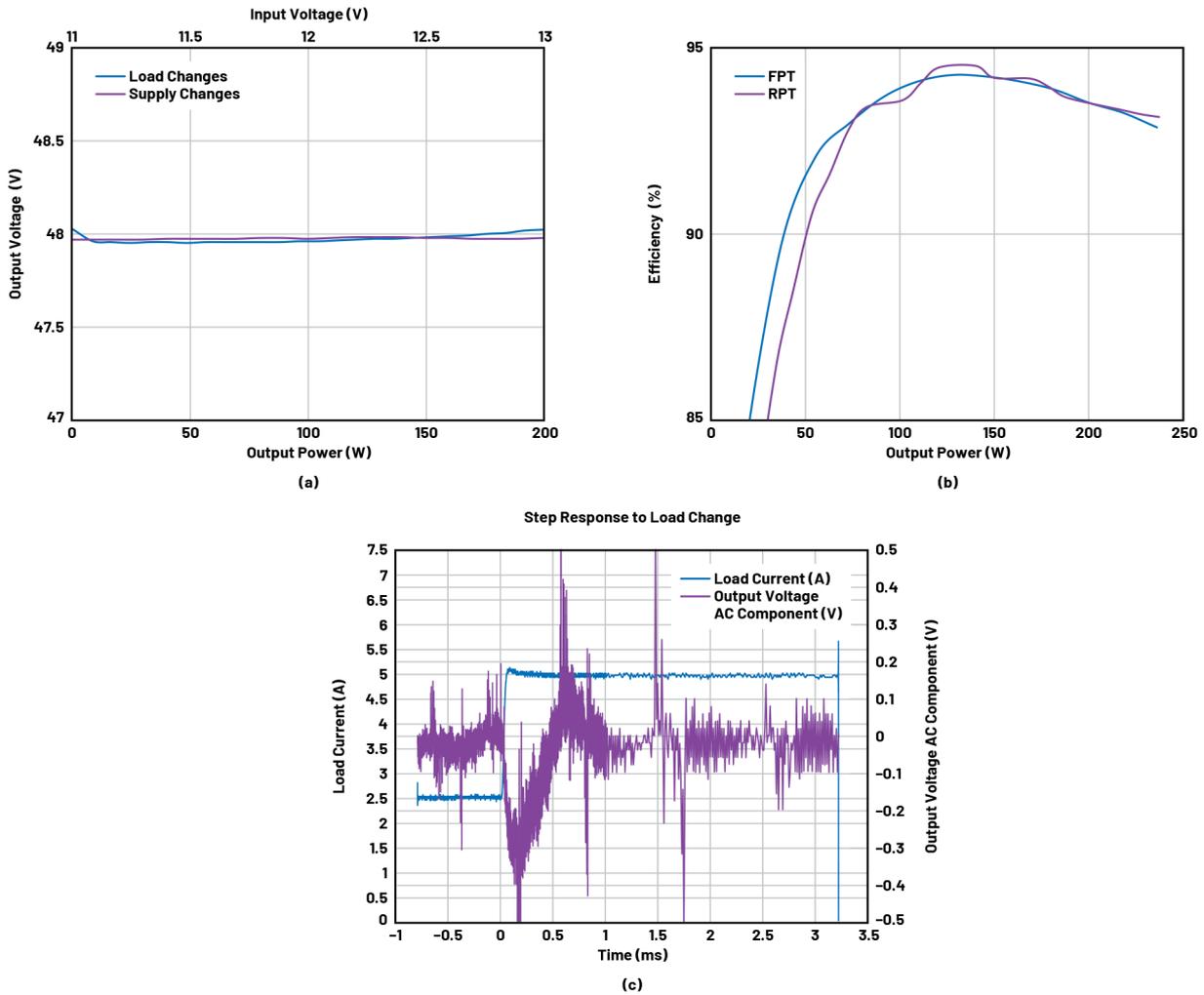


图10. RPT模式下得到的(a)输出电压调节、(b)效率和(c)50%负载阶跃响应

## 参考资料

- Venkata Anand Prabhala、Bhanu Prashant Baddipadiga、Poria Fajri和Mehdi Ferdowsi。“直流配电系统架构及优势概述。” *Energies*, 第11卷第9期, 2018年9月。
- Gerard Reid和Javier Julve。“Second Life-Batterien als flexible Speicher für Erneuerbare Energien。” Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE), 2016年4月。
- Hrishikesh Nene和Toshiyuki Zaitzu。“采用独特PWM控制的双向PSFB DC-DC转换器。” IEEE应用电源电子会议暨展览会(APEC), 2017年。
- Tom Meany。“功能安全的理想电源监视器。” EngineerZone, 2020年6月。
- Yu Du、Srdjan Lukic、Boris Jacobson和Alex Huang。“适用于PHEV/ EV直流充电基础设施的高功率隔离式双向DC-DC转换器综述。” IEEE能量转换大会暨展览会, 2011年。
- Subodh Madiwale。“数字控制实现高可靠性DC-DC功率转换及有源缓冲。” ADI公司, 2016年9月。
- Robert W. Erickson和Dragan Maksimovic。*电力电子基础*, 第二版, Spring, 2001年1月。
- Simone Buso和Paolo Mattavelli。*电力电子数字控制*, 第二版, Morgan & Claypool Publishers, 2015年5月。
- Guipeng Chen、Yan Deng、Hao Peng、Xiangning He和Yousheng Wang。“具有宽范围ZVS和较低尖峰电压的全桥/推挽式双向DC-DC转换器的优化调制方法。” ECON 2014-2014年IEEE工业电子学会第40届学术年会。



## 作者简介

Juan Carlos Rodríguez博士于2009年获得厄瓜多尔军事理工学院（厄瓜多尔基多）电气工程学士学位，并于2011年和2017年分别获得RMIT大学（澳大利亚墨尔本）硕士学位和博士学位。从利默里克大学（爱尔兰）获得博士后职位后，他于2019年加入ADI公司，从事隔离式电源应用和可再生能源工作。他的工作领域包括工业自动化、智能电网和物联网应用的能量收集以及可持续电力的电源电子转换。

