

在高功率开架式反激电源中实现超高效率的方法

Han Cui、Jason Yan和Silvestro Fimiani | Power Integrations、美国



摘要

得益于宽禁带(WBG)开关、同步整流(SR)和自适应控制技术的进步,反激式变换器的效率得以提高,使其能够应用于以往通常依赖谐振拓扑结构的应用场景。随着效率提高,反激式变换器在中功率应用中的作用正日益扩大,尤其体现在电动自行车和电动工具的开架式充电器中。采用750V GaN初级开关并结合可变关断时间PWM控制的300W设计方案,在未增加系统复杂性或显著提高成本的情况下,实现了93%的效率。设计过程中对SR、零电压开关(ZVS)以及宽禁带器件的相关考量进行了分析。本文提出了一种混合开关控制方法,可在宽负载范围内保持高效率。实验结果表明,通过有针对性的优化,反激拓扑结构可在高达400W的中功率应用中有效替代谐振变换器,在性能与成本之间取得切实的平衡。

1. 简介

1.1. 高效率与高性价比的完美融合

快充适配器的发展为提升反激式电源的效率提供了直接动力。更轻巧的体积和更低的重量逐渐成为厂商需要的市场差异化优势,并推动了技术创新,使反激式电源的效率在不到5年内从89%提升至96%。通过减少超过50%的能量损耗(热量),得以省去金属散热片,从而实现更小尺寸的设计。宽禁带(WBG)开关技术、同步整流(SR)以及先进的开关控制算法共同推动了效率性能的提升。

本文探讨了如何将这些技术要素应用于开架式电源应用中,其典型代表为高功率电动自行车和电动工具充电器。在这类应用中,成本与性能之间的权衡对变换器的架构设计提出了严苛的要求。

1.2. 从高效率转向高性价比

反激式电源长期以来被视为功率变换拓扑结构中性价比最高的方案,其效率已提升至96%以上。这一效率突破标志着该技术开始具备在高功率应用中取代半桥谐振拓扑的能力,尤其适用于以效率为首要需求的应用场景中。

该功率范围内的许多应用面向的是便携性要求较低的设备,例如电动自行车和电动工具电池充电器。这类应用虽然同样能够从效率提升中受益,但与手机和笔记本电脑充电器相比,无法从极致的小尺寸和最轻重量中获得同等价值;而正是后者推动了充电器效率不断向更高水平发展。对于开架式电源而言,效率提升的价值主要体现在更小的尺寸和重量上,但为实现效率提高所增加的电路成本,必须通过移除或简化元件等物理成本节约来大幅抵消。在这种情况下,最可能实现成本节约的途径包括:缩小散热片尺寸、缩减外壳和PCB面积,以及简化装配过程。与此同时,诸如工作温度降低(以及潜在的电气应力减小)所带来的可靠性提升及相关品牌价值,加上更小的体积和重量,构成了难以直接量化的无形价值。这些因素虽然能够形成差异化优势,但其经济收益却不容易精确评估。因此,选择采用何种效率策略,必须反映效率提升所带来的综合成本影响。

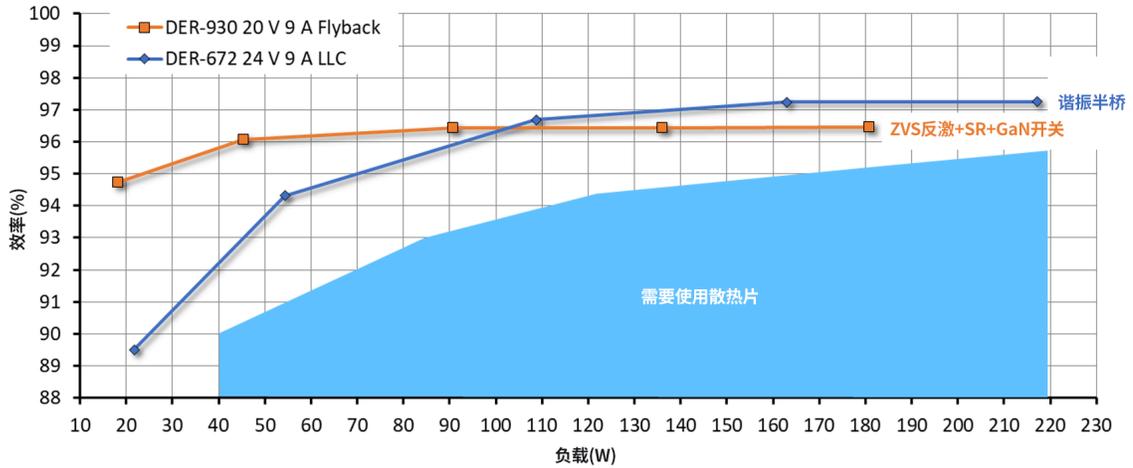


图1. 180-240 W 高效率反激与 LLC 半桥拓扑的效率对比 (散热器需求按充电器形式计算) [Smith, 2023]

电路要素	效率贡献	成本增加项	无形效益	注释
开关控制算法	2%	零	提升轻载效率, 有利于满足法规要求	可在所有输入电压及负载下实现性能的优化
初级开关技术(WBG) [2]	1-2%	GaN的成本约为同等硅 MOSFET的1.2 - 1.5倍	增强对浪涌和电压骤升的保护	GaN不会发生雪崩击穿
零电压开关(ZVS)	0.5-1.5%	有源钳位电路以及相关定时与控制功能	开关频率更高 - 变压器更小, 缓冲电路成本更低	可能将操作限制在较窄的输入/输出电压范围内(DCM)
同步整流(SR)	0.2-3%	SR MOSFET取代二极管、并增加定时/控制电路及隔离要求	改进多路输出设计的交叉调整率	最适用于低输出电压应用; 对于24V以上的输出, 效率贡献可忽略不计

表1. 反激式功率变换中采用不同高效率策略的相关成本与收益
GaN开关的成本将随着时间的推移而降低, 最终接近硅器件的成本[Balakrishnan2024]

2. 选择能带来最佳投资回报的效率提升方案

将反激拓扑性能最大化所带来的成本负担,主要可归纳为四个方面:开关算法、功率开关器件、零电压开关(ZVS)及同步整流(SR)。每种策略带来的贡献与挑战详见表1。

从对表1的初步分析可以看出,开关算法是一个值得深入研究的方向,因为其在直接成本较低的情况下即可带来明显收益。传统的脉冲宽度调制(PWM)技术在低负载和中等负载下性能有限。随着最大功率的增加,这一问题会变得更加严重,从而导致功率开关的尺寸增大(进而增加每周期开关损耗)。PWM在降低初级开关的 I^2R 损耗方面具有明显的优势,因此在高负载条件下可以显著提高效率。另一方面,开关-关断(on-off)控制在输出功率高于20W时,由于脉冲串容易出现噪声问题,但由于开关损耗降低,因此在轻载情况下效率极高。本文将进一步探讨混合开关控制方法的优势,以展示其在不同负载范围内对效率提升的潜力。

对于通常需要高于逻辑电平电压的开架式应用而言,同步整流所带来的效率提升相对有限(但在多路输出设计中,可提供更好的交叉调整率)。

ZVS能够提高效率,但其代价是显著增加开关电路的成本与复杂度。它需要一个能量源,该能量源可来自初级侧有源钳位电路,也可来自次级侧的同步整流级。此外,ZVS还需要额外的开关器件-例如有源钳位中的单独高压功率开关,或SR ZVS架构中的SR MOSFET。虽然SR ZVS无需额外增加元件,但它需要初级和次级开关级的精确同步(通常只有通过高度集成才能实现)。如果不使用SR FET(而是用二极管代替),则在开架式电源中,ZVS控制在效率提升与成本投入之间的性价比将难以成立。

宽禁带氮化镓(GaN)开关的应用情况则更为复杂。在较低功率下,GaN器件的成本与效率优势并不明显,因为硅器件在开关损耗与导通损耗之间的权衡仅在较高初级电流(约30W以上)时才变得显著,此时硅器件的导通电阻与开关损耗限制因素开始凸显。GaN开关的高性能在典型开架式电源功率水平下能带来显著的效率优势。集成式GaN器件不会为功率变换增加额外元件或复杂性(在使用分立式GaN器件时情况则不同)。鉴于GaN与硅器件在价格方面预计将趋于一致,GaN成为50W以上开架式应用的不错选择,而在150W以上功率段则是不二之选。

3. 基于PWM的控制方法 - 使用可变关断时间(关断时间调制)与可变电流限流点

为了同时利用 PWM 在高电流条件下较低的峰值电流(及相应降低的导通损耗),以及轻载时可变频率运行所带来的低开关损耗,本文提出了一种新的控制方法。开关频率由输出负载决定。

次级侧发出的开关请求通过光耦器传输到初级侧控制器。开关事件的发生速率反过来决定了初级开关的电流限流点(I_{LIM}),如图2a、2b和2c所示。由于初级开关电流在导通后的电流上升斜率是固定的(由变压器的励磁电感决定),提高 I_{LIM} 值实际上会增加每个开关周期的导通角。当负载减小、开关频率下降并进入可听频率范围时, I_{LIM} 在轻载条件下会进一步降低,这一点对于抑制功率变压器的磁致音频共振至关重要。

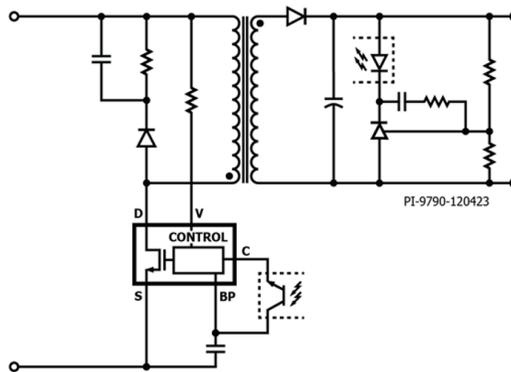


图2a. 电路简图

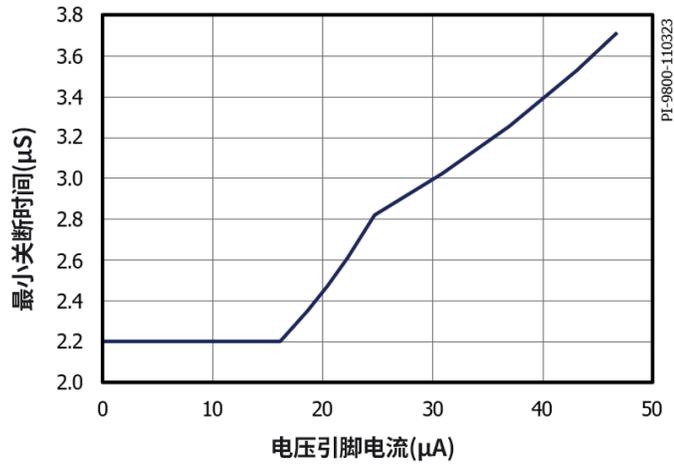


图2b. t_{off} 与C引脚电流的变化关系

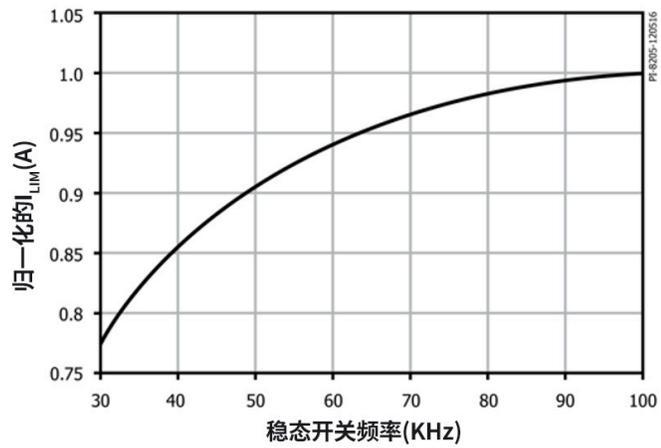


图2c. $f_{SWITCHING}$ 与 I_{LIM} 的变化关系

图2a为显示反馈机制的电路简图;图2b显示反馈关断时间(以及相应的开关频率)与控制(C引脚)电流成正比;图2c显示了初级开关的开关频率和电流限流点(I_{LIM})之间的关系。

4. 适合成本优化型反激式应用的高效率方案

通过利用高效GaN开关的优势并结合改进的开关算法,可在不增加成本负担的情况下提高反激效率。对于低功率应用,可以将相同的算法与传统的MOSFET开关结合使用。

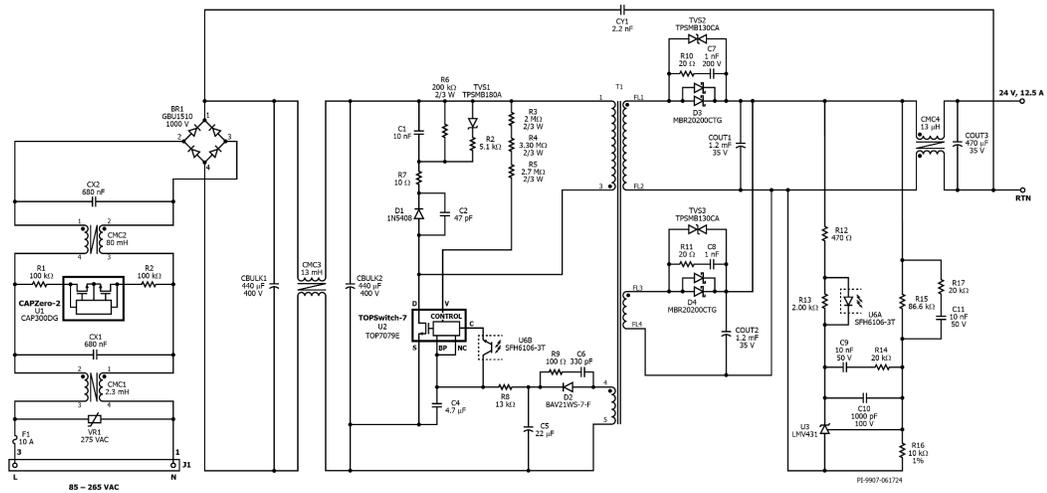


图3a.

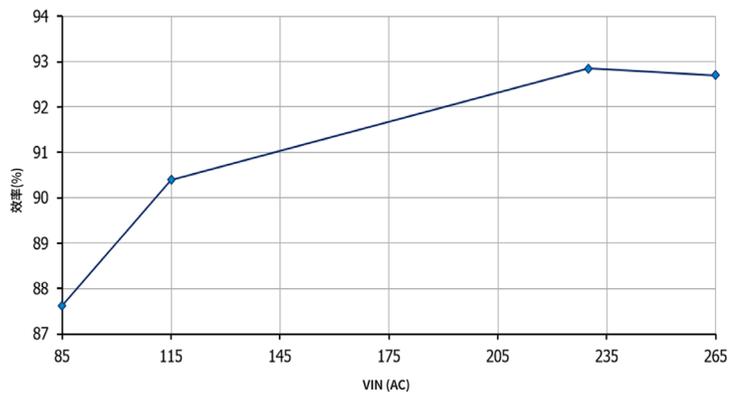


图3b.

图3.所示为采用单级反激电路实现93%效率的300W (24V 2.5A)应用方案, 该方案结合了750V GaN初级开关与基于PWM的可变关断时间控制算法。

4.1. LLC 的切换点

增大输出功率会导致初级电流升高, 尽管采用低导通电阻($R_{DS(ON)}$)的GaN开关有助于降低开关损耗, 但反激式变换器在可高效输出的功率范围上仍然存在实际的上限。对于单级反激拓扑结构而言, 其最大占空比(导通损耗)受限, 从而限制了变压器的利用率(尺寸), 并进一步增加导通损耗。因此, 在功率超过约400W的应用中, 半桥变换器因具有更高的占空比和更优的变压器利用率而更具优势。虽然功率因数校正(PFC)前级可通过提高变换器输入电压略微改变这一切换点, 但对于单级反激设计而言, 初级开关电流仍是主要的限制因素。

5. 结论

采用现代宽禁带 (WBG) 开关器件和更优开关控制方法的反激式变换器,可在中功率开架式应用中实现高效率,同时保持高性价比。通过选择合适的策略,反激拓扑结构可以在50-400W范围内取代谐振拓扑结构,为相关应用提供一种结构更简单且性能可靠的解决方案。

参考资料

1. Andrew Smith, 2023, 1250-Volt GaN Switcher ICs Extend GaN Application Range, Bodo's Wide Bandgap Conference 2023
2. Balu Balakrishnan, 2024 APEC Keynote Address: How innovations in efficiency enable us to do good for the environment while doing well as a business, https://ieeetv.ieee.org/live_event/apec-2024-plenary-session

更多详情, 请访问
power.com[™]



© 2026 Power Integrations | Power Integrations, Power Integrations 徽标, power.com, PowiGaN 和 InnoMux 是 Power Integrations, Inc. 在美国和/或其他国家/地区的商标或注册商标。NVIDIA、Google、Microsoft 和 Meta 是其各自所有者的商标。