

面向脉冲负载特性的功率变换器 拓扑结构优化设计研究

张允浩

(上海杰瑞兆新信息科技有限公司, 江苏 连云港 222061)

摘要 脉冲负载具有峰值功率高、持续时间短、重复性强和峰均功率比大的特点, 易引起功率变换器输出电压跌落、输入电流脉动增大、器件应力集中和储能单元配置失衡。本文围绕脉冲负载工况下的供能需求, 从负载作用机理、拓扑优化目标、结构设计方法和性能验证路径展开分析, 提出以分层供能和快速动态响应为核心的拓扑优化思路。结果表明, 通过对主功率回路、母线储能单元与控制环节进行协同设计, 可有效抑制输入脉动电流, 提升输出动态响应, 降低储能冗余, 提高系统效率、功率密度与运行可靠性。

关键词 脉冲负载; 功率变换器; 拓扑优化; 动态响应

中图分类号: TM46

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.18.004

0 引言

脉冲负载广泛存在于雷达发射、脉冲激光、电磁装备、特种测试电源等应用场景, 其负载电流往往在极短时间内由低值跃升至高值, 随后又迅速回落, 供电过程呈现明显的瞬态突变特征^[1]。传统功率变换器多按连续或缓变负载设计, 在面对高峰值、短脉宽和周期性冲击工况时, 容易出现输出侧电压波动加剧、输入侧脉动电流增大、器件热应力累积及系统稳定性下降等问题, 仅靠增大输出储能电容容量, 虽能在一定程度上缓解冲击, 却会带来体积增大、效率下降和功率密度受限等副作用。功率变换器拓扑结构与脉冲负载特性的匹配程度, 已成为决定系统动态性能和工程适用性的关键因素。

1 脉冲负载特性及其对功率变换器的作用机理

1.1 脉冲负载的基本类型与时域变化特征

脉冲负载可分为周期性脉冲负载、突发式脉冲负载、储能放电型负载和复合型脉冲负载。不同类型在脉宽、占空比、重复频率和峰值功率等方面存在差异, 但共同特点是短时功率集中, 平均功率与瞬时功率分离明显。相比稳态负载, 其电流上升沿和下降沿更陡, 负载阻抗变化更快, 功率变换器需在一个脉冲周期内完成快速供能、间歇恢复和再次冲击准备。因此, 供电系统不仅要满足平均功率输出, 还需具备较强的峰值支撑和能量恢复能力。

1.2 脉冲负载对电压稳定性与电流冲击的影响

脉冲负载突然接入时, 负载功率瞬间上升, 而控制回路和功率级存在响应滞后, 输出电容与中间储能单元往往先承担供能任务。若储能不足或拓扑响应偏慢, 输出电压将显著跌落; 脉冲负载撤除后, 电感电流回落不及时, 又将引起电压过冲。与此同时, 输入侧电流周期性波动, 寄生电感与大电流变化率叠加后, 还会带来尖峰电压、电磁干扰和局部过热。因此, 脉冲负载下的供电问题不仅表现为电压波动, 还涉及输入扰动、器件应力和热稳定性的耦合变化。

1.3 脉冲负载工况下功率变换器面临的主要技术约束

脉冲负载工况对功率变换器的约束主要体现在器件应力、磁性元件抗饱和、储能单元快速充放电能力以及控制系统动态性能等方面。功率器件需承受更高的瞬态电压和电流应力, 储能元件既要提供快速能量补偿, 又要控制寄生参数带来的损耗与振荡。控制系统还需兼顾响应速度和稳定裕度, 避免调节迟缓或系统失稳。若仍采用单级、单通道供能方式, 只能依赖大容量输出电容缓解电压跌落, 但这会显著增加体积和重量, 不利于高功率密度设计^[2]。因此, 脉冲负载条件下的拓扑优化, 本质上是对平均供能与峰值支撑关系的重新分配。

作者简介: 张允浩 (1995-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 开关电源。

2 面向脉冲负载的功率变换器拓扑优化目标与设计原则

2.1 拓扑结构优化的核心目标设定

面向脉冲负载开展拓扑优化,应综合考虑拓扑结构的动态响应能力、抗冲击能力、功率密度和长期可靠性。对于输出侧,应减小脉冲期间的电压跌落与过冲,缩短恢复时间;对于输入侧,应抑制脉冲功率向电源端传递时形成的大幅电流脉动,降低对供电系统的扰动;对于变换器本体,应控制开关器件峰值应力、减轻磁性元件饱和风险和热循环损伤,同时兼顾体积、效率和扩展性。只有将“输出稳”“输入稳”和“器件稳”统一起来,拓扑优化才具有真正的工程意义。

2.2 主功率回路与储能缓冲单元的协同设计原则

针对脉冲负载平均功率较低而峰值功率较高的特点,主功率回路与储能缓冲单元宜采用分层供能思路。主回路负责稳态能量供给和脉冲间歇期的恢复充电,储能单元负责脉冲瞬间的快速放能和短时功率补偿。如此,主回路不必直接承担全部峰值冲击,脉冲期间的能量缺口可由中间母线储能环节补足,前后级之间形成相对清晰的职责分工。采用两级级联结构时,前级将高压输入变换为一定范围内可波动的中间母线电压,后级再将该母线电压快速调节为稳定输出,从而实现平均功率传输和脉冲功率支撑的解耦。此方案可同时兼顾隔离需求、储能需求和动态调节需求,更适用于脉冲负载的功率变换器。

2.3 效率、动态响应与系统可靠性的综合平衡

脉冲负载供电系统难以只追求单一性能。单纯强调动态响应,往往需要提高开关频率或降低滤波参数,从而增加开关损耗和电磁干扰;单纯强调高效率,又可能使系统储能冗余不足,导致瞬态支撑能力偏弱。合理的拓扑设计应在效率、动态响应和可靠性之间形成平衡:通过软开关降低前级开关损耗,通过交错并联减小输出纹波和单相电流压力,通过适度降额与热设计提升长期稳定性,通过控制环节补偿结构局限,使系统既能在脉冲负载期间快速响应,也能在长期运行中保持可靠。

3 功率变换器拓扑结构优化设计方法与关键参数配置

3.1 典型拓扑方案的适应性比较与优选

前级隔离拓扑中,反激式结构简单,但瞬态调节能力较弱,效率较低,不利于高功率密度应用;正激式结构在中等功率范围内具有一定适用性,但在高输入、大功率工况下,动态与效率优势不明显;全桥类

拓扑更适合高输入、高功率场景,引入软开关后还能降低开关损耗和器件应力^[3]。结合脉冲负载对高输入适应性、快速响应能力和效率的要求,前级采用不对称全桥软开关结构更为合理。后级承担快速稳压任务,相比单相 Buck,多相交错并联同步 Buck 在降低输出纹波、分担电流应力和提升动态响应方面更具优势。因此,采用“前级不对称全桥软开关+中间母线储能+后级三相交错并联同步 Buck”的两级级联方案,更符合脉冲负载供电需求。

3.2 关键储能元件与开关器件参数优化设计

拓扑确定后,参数配置决定结构性能能否落实。以典型高峰均比脉冲负载工况为例,后级输出电压为 36 V,额定输出电流 30 A,脉冲峰值电流 100 A,脉宽 2 ms,周期 6.67 ms,稳态纹波控制目标为 360 mV,中间母线电压在 45~75 V 范围内波动。后级采用三相交错并联同步 Buck 后,总脉冲电流由三相分担,单相平均电流约为 33.3 A。为兼顾连续导通与动态响应,输出滤波电感可表示为:

$$L_o = \frac{(V_{bus,max} - V_o)D}{rI_{o,avg}f_{sw}} \quad (1)$$

式(1)中, $V_{bus,max}$ 为中间母线最高电压, V_o 为输出电压, D 为占空比, r 为电感电流纹波系数, $I_{o,avg}$ 为单相平均输出电流, f_{sw} 为单相开关频率。取中间母线最高电压 75 V、输出电压 36 V、单相开关频率 200 kHz、纹波系数 0.5、单相平均输出电流 33.3 A 进行计算,可得单相输出滤波电感约为 5.67 μ H。该参数既能够限制单相电流纹波,又不会因电感过大而牺牲动态响应速度,与三相交错并联方案追求低纹波和快速响应的目标相一致。

在脉冲负载条件下,输出电容不仅承担滤波作用,也直接影响瞬态支撑能力。若沿用常规稳态负载设计思路,输出滤波电容可按下式估算:

$$C_o \geq \frac{(P_{out} - V_o I_s)t_p}{V_a \Delta V_o} \quad (2)$$

式(2)中, P_{out} 为脉冲峰值输出功率, I_s 为稳态输出电流, t_p 为脉冲持续时间, ΔV_o 为允许输出电压跌落量。代入 $V_o=36$ V、 $I_s=30$ A、 $P_{out}=3\ 600$ W、 $t_p=2$ ms、 $\Delta V_o=2$ V 后,可得常规方案所需输出滤波电容约为 72.86 mF。若不进行拓扑重构,仅依靠输出侧增加大容量电容应对脉冲冲击,系统体积和重量都会明显增加。两级式结构将主要储能任务转移至中间母线,输出侧电容可压缩至约 2 072 μ F,仍能满足 34~37 V 的输出控制要求,说明拓扑解耦能够在减小储能冗余的同时提升功率密度和动态性能。

开关器件选型也需与拓扑协同考虑。前级因输入电压较高且兼顾效率与隔离,应选用耐压裕量充足、适合软开关运行的器件;后级工作于45~75 V母线侧,更关注低导通损耗和大电流承载能力。三相并联后,单相器件电流应力下降,有利于缩小器件尺寸并改善热分布。

3.3 控制策略匹配下的拓扑动态性能提升路径

拓朴性能能否发挥,取决于控制策略是否匹配。前级不对称全桥在脉冲负载工况下若采用平均电流控制,往往需要降低电压外环带宽,中间母线电压在突加脉冲时容易出现较大跌落,并增加储能电容需求;峰值电流控制更适合快速冲击场景,既具备逐周期限流能力,又能抑制输入电流上冲。脉冲期间,前级电压环可进入限流状态,中间母线电容参与供能,脉冲结束后再由前级回充恢复。后级三相交错并联同步Buck的控制重点在于均流、输出电压前馈和补偿网络设计。均流控制可减小单相偏载,电压前馈可增强对母线波动的适应能力,补偿优化则有助于提高系统的动态响应与稳定性。由此形成的“前级限流抑制+后级快速稳压”控制链条,能够提升两级拓扑在脉冲负载工况下的动态一致性和工程可控性。

4 拓扑优化设计的性能验证与工程实现分析

4.1 脉冲负载工况下的性能测试指标构建

为验证两级拓扑在脉冲负载条件下的实际适应能力,性能评价不能只停留在稳态输出层面,还应围绕分层供能、动态解耦和连续运行可靠性展开。测试应在额定工况、单次脉冲负载工况和重复脉冲负载工况下分别进行,重点考察输出电压跌落与过冲幅值、恢复时间、稳态纹波、中间母线最低电压、输入峰值电流、各相电流偏差及器件温升变化。对于工程应用场景,还应结合电磁兼容性、储能单元循环稳定性和工况切换时的运行连续性开展综合评价。这样形成的测试体系,才能较真实地反映拓扑优化后的动态性能与长期可靠性。

4.2 拓扑优化方案的运行效果分析

从典型工况算例和样机结果看,两级式结构在高压输入、低压大电流脉冲输出条件下,能够将输出电压控制在允许波动范围内,脉冲加载与卸载过程保持较平缓过渡,说明中间母线缓冲与后级快速调压之间形成了较好的协同关系^[4]。与单级直供方式相比,输入侧峰值电流得到明显抑制,母线电压虽会在脉冲时段短时回落,但仍能维持后级连续调节所需的工作区间,表明瞬态冲击未直接传递到前级电源端。多相并联支路的电流分配较为均衡,总输出纹波低于单相重载方式,器件热负担也得到分散^[5]。在额定工况下,

系统仍可保持较高转换效率,说明拓扑优化并未以明显牺牲稳态性能为代价换取瞬态改善。两级式方案的优势不仅体现在输出波动减小,也体现在输入抑制、储能分担和热应力缓解等方面。

4.3 工程应用中的实现难点与改进方向

从工程实现看,拓扑优化的难点主要集中在高频、高压和大电流条件下的细节控制。寄生参数会放大尖峰电压和动态振荡,因此需要在印制板设计中压缩高频电流回路面积,优化功率回路和去耦布局,降低连接路径电感^[6]。中间母线储能单元在频繁充放电条件下容易出现寿命衰减和热失衡问题,工程上应加强预充控制、均压管理和温升监测。多相并联系统虽有利于分流和降纹波,但也提高了采样、驱动和补偿整定难度,因此应重视相间一致性设计与控制参数协同优化。后续可在拓扑、控制、磁元件和热管理一体化设计的基础上,结合宽禁带器件、低寄生封装和模块化结构,进一步提升系统对不同脉宽、不同峰值功率工况的适配能力。

5 结束语

脉冲负载对供电系统提出的挑战,本质上是瞬态能量供给、动态调节能力与长期运行可靠性之间的统筹问题。功率变换器设计只有摆脱单纯依赖器件冗余的思路,转向拓扑重构、储能协同与控制匹配并重的优化路径,才能在峰值支撑、效率保持和功率密度提升之间建立更稳定的平衡。面向脉冲负载的拓扑优化并非局部参数调整,而是电源系统由被动承压向主动适配的设计转变,这一转变对于提升高动态用能装备的供电品质、工程可实现性和长期可靠运行能力具有现实价值。

参考文献:

- [1] 杨帆,李林,朱建鑫,等.面向高峰均比低频脉冲功率负载的脉冲电流补偿器及其控制方法[J].电工技术学报,2022,37(16):4193-4201.
- [2] 罗玮,陆益民.带恒功率负载多电平Boost变换器的复合非线性控制[J].太阳能学报,2022,43(07):506-512.
- [3] 王仁龙,李永建,李珊瑚,等.双有源桥变换器电流应力优化的双重移相调制方式[J].电源学报,2023,21(01):35-44.
- [4] 王有银,田崇翼,李明,等.建筑直流供电交错并联DC/DC变换器模型预测控制策略[J].电工技术,2021(10):22-26.
- [5] 郑俊雅,王淑艳.建筑直流供电系统发展现状及展望[J].现代建筑电气,2021,12(06):19-24.
- [6] 房建军.基于BIPV示范项目的低压直流配电一些关键问题研究[J].建筑节能,2020,48(11):111-115.