

地铁屏蔽门控制系统供电模块及自主均流

刘宿城^{1*}, 狄啟飞¹, 刘文杰², 刘晓东¹, 方 炜¹

(1. 安徽工业大学电力电子与运动控制省重点实验室 安徽 马鞍山 243032; 2. 南昌大学信息工程学院 南昌 330031)

【摘要】地铁屏蔽门作为城市轨道交通系统中的重要组成部分,保障其控制系统的供电是屏蔽门安全可靠运行的基本前提。根据地铁屏蔽门控制系统供电直流UPS电源模组的要求,该文首先设计基于LLC半桥谐振拓扑的DC/DC供电模块单元,能够在全负载范围内实现软开关,同时满足高转换效率及动态响应的综合指标;其次提出分段式非线性下垂控制策略,用于实现供电模组单元的自适应及自主均流,以改善均流效果与负载电压调整率之间的折中设计。给出了LLC DC/DC供电模块单元及其自主均流设计方案,制作了两台额定功率为600 W的模块电源样机,通过实验测试验证了供电模块单元及其自主均流的可行性。

关键词 自主均流; 半桥谐振变换器; LLC变换器; 地铁屏蔽门; 非线性下垂控制
中图分类号 TN86 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.04.010

Power Supply Module and Autonomous Current Sharing for Metro Platform Screen Door Control System

LIU Su-cheng^{1*}, DI Qi-fei¹, LIU Wen-jie², LIU Xiao-dong¹, and FANG Wei¹

(1. Key Lab of Power Electronics & Motion Control, Anhui University of Technology Maanshan Anhui 243032;
2. Information Engineering School, Nanchang University Nanchang 330031)

Abstract Metro platform screen door is an important part of urban rail transit system. To ensure power supplying of screen door control system is an essential requirement for metro operating with safety and reliability. According to the demand of direct current uninterrupted power system (DC UPS) for the metro platform screen doors, a DC/DC power supply module based on the LLC half-bridge resonant topology is firstly designed to fulfil the soft-switching in full load range. The module has the virtues of high conversion efficiency, high power density and well regulation, etc. Secondly, a piecewise nonlinear droop control strategy is proposed to realize autonomous and adaptive current sharing between the power supply modules and thus improving the trade-off design between current sharing and output voltage regulation. The design procedure for main parameters of the LLC DC/DC power module is described, and two power modules prototypes with rated power of 600 W are built to validate the design of power modules and their autonomous current sharing performance.

Key words autonomous current sharing; half-bridge resonant converter; LLC converter; metro platform screen door; nonlinear droop control

在城市轨道交通应用领域,地铁屏蔽门系统作为重要基础安全设施可将轨道与站台候车区有效隔离,形成与列车门相对应、多级控制开闭滑动门的连续屏障,已经成为不可或缺的轨道交通安全设施^[1]。随着地铁屏蔽门系统的不断更新,同时为了保障地铁屏蔽门安全可靠的运行,对其控制系统供电电源的功率等级、耐压等级和带载能力有较高的要求,并且为了达到节能环保的目的,对其噪声和转换效率等也有一定要求。

通常,地铁屏蔽门控制系统供电采用N+1冗余配置直流UPS电源模组,其中基于隔离型变换器的供电模块在满载时转换效率需高于90%,这使得供电模块需要实现软开关,即开关管的零电压开通(zero voltage switching, ZVS)和副边二极管的零电流关断(zero current switching, ZCS)^[2-5],以减小开关损耗,提高转换效率。由于屏蔽门需频繁开关动作,供电模块的负载表现为脉冲特性,因此要求供电模块具备良好的瞬态响应:从20%~80%负载阶跃变化

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-09-28

基金项目: 安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2016A804, KJ2017A067); 安徽省自然科学基金(170805ME106)

作者简介: 刘宿城(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子学方面的研究。E-mail: liusucheng@gmail

时恢复时间 T_r 少于200 μs , 且超调量 ΔV 保持 $\pm 2\%$ 以内。在众多低压输出谐振变换器拓扑中, LLC半桥谐振变换器不仅能在较宽输入电压范围内实现电压转换, 并且在全负载范围内能够实现高频开关管的ZVS和副边二极管的ZCS, 满足高转换效率要求^[2-3]。综合考虑屏蔽门控制系统直流UPS电源模组的技术需求, 选用LLC半桥谐振变换器作为供电模块的主电路拓扑, 并对主电路参数进行了设计。

另一方面, 为提高屏蔽门控制系统供电的可靠性, 其直流UPS电源模组由供电模块并联冗余配置, 因此要求模块间能够实现均流功能。现有均流控制主要以两种方法为基础, 即: 主从法和下垂法^[6-10]。主从法需要指定主模块作为输出电压控制单元, 同时向其他从模块发送电流指令, 具有电压调整性能好和均流精度高的优点。然而, 主模块的单元故障可能会导致整体系统的崩溃, 因此其可靠性较低。下垂法通过调节本地模块的虚拟电阻(下垂系数)能够实现自主均流, 各模块的地位均等, 单个模块的失效不会引起系统崩溃, 适于地铁屏蔽门控制对可靠性要求较高的场合, 但其均流精度和电压调整率之间存在矛盾。为此, 本文提出分段式非线性下垂控制策略, 在实现供电模组单元自主均流的同时, 改善了均流效果与负载电压调整率之间的折中设计。

本文从屏蔽门控制系统供电直流UPS模组的性能指标出发, 首先给出基于LLC谐振变换器的供电模块参数设计步骤, 在基波等效模型的基础上绘制了增益曲线并计算谐振参数; 对于供电模块并联运行, 提出非线性下垂的自主均流方案, 最后设计了两台额定功率为600 W的实验样机, 分别进行了单供电模块和模块并联均流的测试, 通过实验结果验证本文方案的可行性。

1 基于LLC拓扑的单供电模块设计

图1所示为地铁屏蔽门控制系统供电结构图, 其中直流UPS电源模组主要为屏蔽门控制室的中央接口盘(platform station controller, PSC)和远方报警盘(panel system of alarm, PSA)等单元供电。要求各并联运行的DC/DC供电模块的主要工作参数为: 额定输入电压为110 V, 且输入直流电压变化范围为90~130 V时, 额定输出电压达到 $24 \times (1 \pm 0.5\%) \text{ V DC}$, 额定输出电流为25 A。根据要求, 本文方案采用LLC半桥谐振变换器拓扑实现模块宽范围软开关运行。

LLC半桥谐振变换器拓扑^[11-13]如图2所示, 从功能上可分为5个部分, 分别为: 半桥部分、谐振电路、

变压器、二极管整流和输出滤波部分。其中, 半桥部分由上下两个MOSFET构成半桥, 上桥臂MOSFET管为 Q_1 , 下桥臂MOSFET管为 Q_2 , 其中 D_{Q_1} 和 D_{Q_2} 分别为开关管 Q_1 和开关管 Q_2 的体二极管, LLC谐振电路采用调频控制方式, 即通过改变工作频率来使输出电压达到稳定, 其中上下两个开关管在占空比为50%的驱动信号下交替导通, 为了防止上下开关管直通损坏主电路, 在驱动信号中加入一定的死区时间。谐振电路部分包含了3个元件, 分别是励磁电感 L_m 、谐振电感 L_r 和谐振电容 C_r , 谐振参数的合理与否直接影响了变换器的工作性能, 其中的谐振电容 C_r 不仅作为谐振元件加入谐振网络, 同时作为隔直电容, 阻隔通往功率变压器的直流分量, 防止功率变压器磁芯的饱和。在综合考虑体积以及成本等因素后, 整流部分采用全波整流电路, 由快恢复整流二极管 D_1 和 D_2 构成。

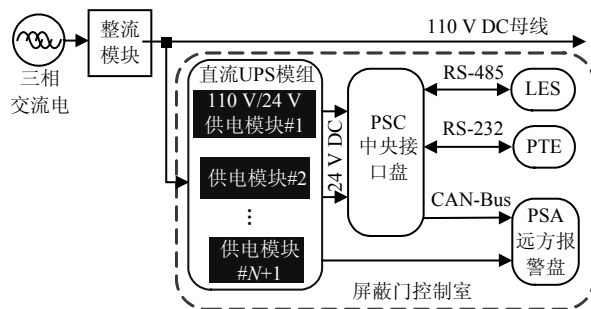


图1 地铁屏蔽门控制系统供电结构图

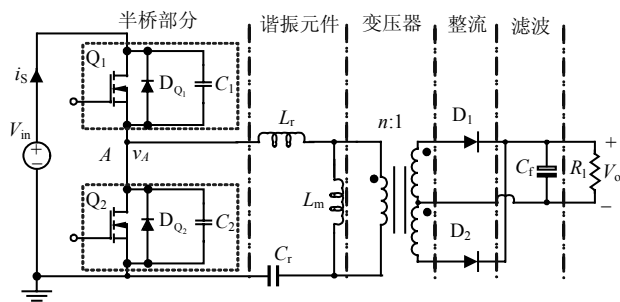


图2 LLC半桥谐振变换器拓扑

由于谐振部分存在3个谐振元件, 故存在两个谐振频率^[14-18], 分别为:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m) C_r}} \quad (2)$$

在LLC半桥谐振变换器中, 工作频率 f_s 会根据变换器输入电压以及负载条件的不同而进行调整, 谐振频率 f_r 和 f_m 会把工作区域粗略的划分为3个区域,

即 $f_m < f_s < f_r$ 、 $f_s = f_r$ 和 $f_s > f_r$, 根据不同 Q 值与 L_n (L_m 与 L_r 的比值)的选取, 变换器会工作在不同的区域中, 以保证变换器能够完全实现开关管的ZVS和整流二极管的ZCS。

LLC半桥谐振变换器在设计时, 需要先确定品质因数 Q 与 L_n 两个参数。而要确定这两个参数, 则需要对LLC谐振变换器的增益特性进行分析, 选取合适的参数, 才可计算出所需要的谐振元件的参数。基于谐振电路的基波分析法^[19-21], 可将变压器副边等效负载折算到原边, 得到交流等效电阻, 并且根据变换器的交流等效电路可以得到变换器的直流电压增益^[21]为:

$$M_g(L_n, f_n, Q) = \left| \frac{L_n f_n^2}{[(L_n + 1)f_n^2 - 1] + [(f_n^2 - 1)f_n Q L_n]} \right| \quad (3)$$

式中, 归一化频率 $f_n = f_s / f_r$; 电感比值 $L_n = L_r / L_m$; Q 为变换器的品质因数。LLC半桥谐振变换器的电压增益为:

$$M = \frac{nV_{out}}{V_{in}} \quad (4)$$

由直流电压增益式(3)可绘制出变换器的直流电压增益曲线, 由图3可以看出: 当负载从轻载变至重载时, 变换器的电压增益将会下降; 不同的 Q 值所对应的电压增益曲线都会在额定谐振点处相交, 且相交的点直流电压增益恒为1, 则在此时负载的变化对变换器的电压增益不会造成影响。

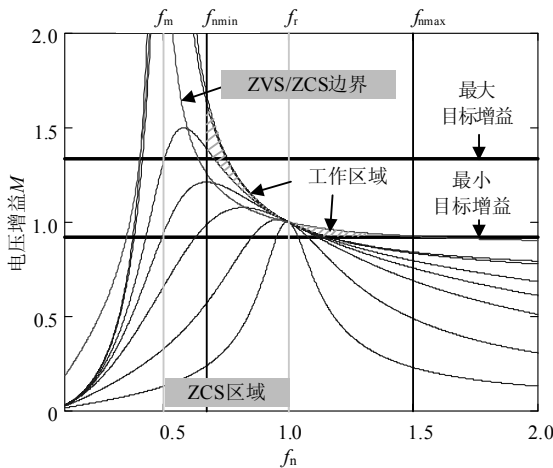


图3 LLC半桥谐振变换器的增益特性曲线

在选取 Q 值和 L_n 时, 保证增益曲线能够满足变换器的最大增益, 且超出最大增益10%左右的裕量以确保能够在最大增益处稳定工作。根据增益曲线选取品质因数 Q 和电感比值 L_n , 结合基波等效分析, 即可算出变换器的谐振参数为:

$$\begin{cases} C_r = \frac{1}{2\pi Q f_r R_{eq}} \\ L_r = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_r} \\ L_m = L_n L_r \end{cases} \quad (5)$$

2 非线性下垂自主均流策略的提出

前已述及, 地铁屏蔽门控制系统供电设计不仅包含单体模块, 还包含通过下垂控制实现模块的自主均流。图4为直流UPS模组供电模块并联运行的等效电路模型, 根据KVL方程, 可得到基本下垂控制下供电模块输出电流与负载电压之间的关系为:

$$V_o = V_{refj} - I_{oj}(R_{dj} + R_{lj}) \quad (6)$$

式中, 下标 j 表示第 j 个供电模块; V_{refj} 为参考电压; R_{dj} 为下垂系数(虚拟电阻); R_{lj} 为线缆电阻; I_{oj} 为模块电源输出电流; V_o 为负载的端电压。

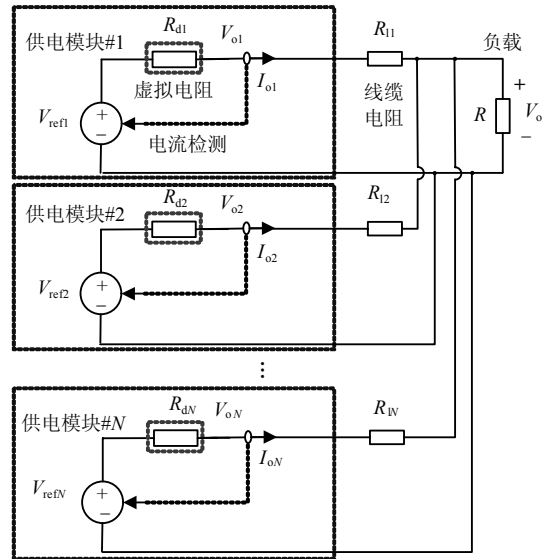


图4 直流UPS模组供电模块并联运行的等效电路模型

同时, 可推导第 i 个与第 j 个供电模块的输出电流之比为:

$$\frac{i_{oi}}{i_{oj}} = \frac{R_{dj} + R_{lj}}{R_{di} + R_{li}} \quad (7)$$

综合式(6)与式(7)发现: 当下垂系数增大时, 相对而言, 连接各模块的线缆电阻的影响也愈小, 此时均流精度主要取决于两模块下垂系数(虚拟电阻)的取值, 而同时下垂系数的提高也导致输出电压进一步降低。由此分析传统下垂控制可知, 系统均流性能的提高与母线电压偏差的改善之间存在矛盾关系, 并且系统在不同带载情况下, 传统下垂控制采用恒定下垂系数, 无法兼顾均流精度及母线电压偏差的要求。

为此, 本文提出负荷区间分段式非线性下垂控制策略(piecewise nonlinear droop control, PNDC), 根据负荷轻重不同分区配置下垂系数, 灵活设计系统输出特性曲线。轻载时采用低下垂系数以改进电压偏差, 而重载时增加下垂系数以提高均流精度, 在提高系统均流性能的同时改善系统母线电压偏差实现并联模块的优化运行。

图5为本文PNDC策略的示意图, 其中图5a为PNDC的下垂曲线, 这里将根据负荷轻重分为3个区域: 负载区1、负载区2及负载区3。从图中可以看出, 当输出电流小于分段点 I_{set1} 时模块工作在负载区1, 此时选择较小的下垂系数, 以获取优良的负载电压调整性能, 供电模块的 $V-I$ 输出特性曲线为#1, 下垂控制表达式为式(8); 当输出电流超出 I_{set1} 小于 I_{set2} 时模块工作在负载区2, 此时为了提高系统均流性能, 模块的 $V-I$ 输出特性曲线为#2, 则PNDC策略下模块的输出特性表达式为式(9); 而当输出电流超出 I_{set2} 时模块工作在负载区3, 为了满足重载情况下均流误差及母线电压偏差均小于5%的要求, 通过PNDC策略使得模块的 $V-I$ 输出特性曲线调整为#3, 此时模块的输出特性表达式则为式(10):

$$V_o = V_{ref} - i_{oj}(R_{dj} + R_{yj}) \quad (8)$$

$$V_o = V_{ref} - i_{oj}(R_{dj} + R_{yj}) - \kappa_1(i_{oj} - I_{set1}) \quad (9)$$

$$V_o = V_{ref} - i_{oj}(R_{dj} + R_{yj}) - \kappa_2(i_{oj} - I_{set2}) \quad (10)$$

式中, κ_1 、 κ_2 和 I_{set1} 、 I_{set2} 分别为PNDC控制中分段系数和分段电流设定点。

图5b为以两台供电模块并联运行为例, 比较PNDC策略与基本下垂控制的输出特性。图中标出了模块输出电流在 I_{set1} 和 I_{set2} 之间(负载区2)时, 采用PNDC控制策略的模块输出特性曲线为#2、#2', 而

基本下垂控制的模块输出特性曲线分别为 R_c 、 R'_c 。两种控制策略在相同的均流误差情况下(均流误差均为 ΔI_{c2}), 但PNDC控制策略的电压偏差 ΔV_{bus} 小于基本下垂控制的 $\Delta V'_{bus}$ 。

由此可见, PNDC控制策略的实施按照负荷区域分段电流 I_{seti} 设定点不同, 在不同负荷区间改变变换器模块输出电压电流 $V-I$ 特性曲线。根据直流母线电压偏差的约束条件, 下垂系数的取值需要满足:

$$R_{dj}i_{oj} \leq \Delta V_{max} \quad (11)$$

式中, ΔV_{max} 为母线电压最大允许偏差值, 通常为直流母线电压大小的5%。

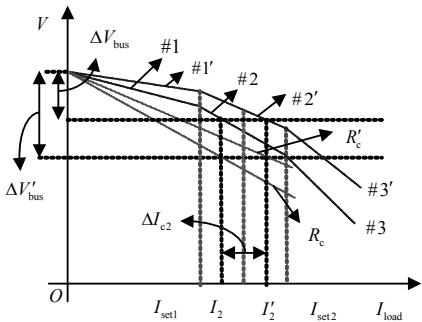
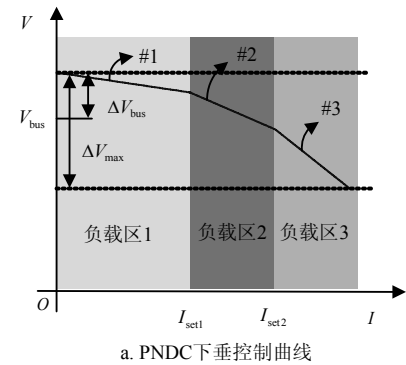


图5 PNDC控制策略示意图

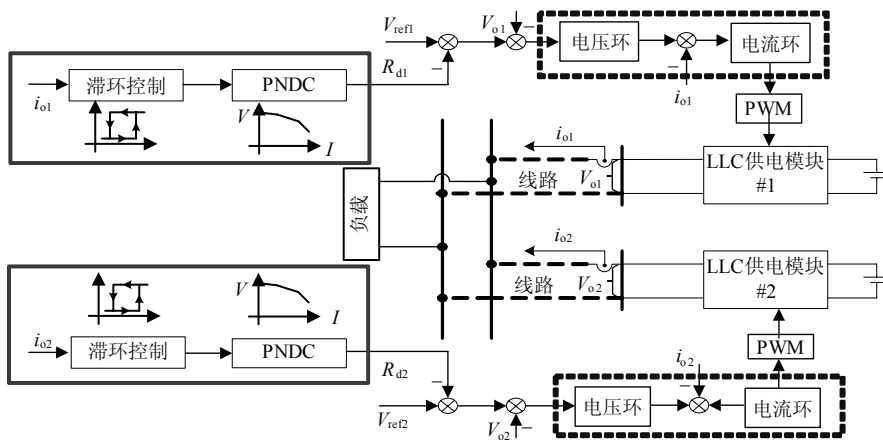


图6 基于PNDC策略的供电模块均流控制框图

为了满足式(11)即并联模块的下垂系数 R_d 均需要小于 $2\Delta V_{bus}/i_{load}$, i_{load} 为总负荷电流。选定初始下垂系数 R_d , 然后对总负荷进行区域划分并设定负荷区域的分段电流点为:

$$I_{seti} = \frac{\Delta V_{max}}{R_d} i \quad (12)$$

式中, i 表示第 i 个分段电流设定点。

根据直流微电网系统中母线电压偏差 ΔV_{bus} 的要

$$\kappa_i = \frac{V_{bus}(R_{c1} + R_{c2}) - I_{seti}RR_{c1}R_{c2} - 2R\Delta V_{bus} + \sqrt{(I_{seti}R - V_{bus})^2(R_{c1}^2 + R_{c2}^2) + 4R^2\Delta V_{bus}^2 - 2R_{c1}R_{c2} \times V_{bus}^2 + 4I_{seti}R(R_{c1}R_{c2}V_{bus} - R(R_{c1} + R_{c2})\Delta V_{bus})}}{2V_{bus} - 4I_{seti}R} \quad (15)$$

图6给出了PNDC策略实现两台LLC供电模块并联均流的控制框图, 这里LLC供电模块单元采用电压-电流双环调节以改善其动态响应, PNDC控制策略的实现加入了滞环控制, 其目的是防止电流采样干扰造成负载分段处不必要的频繁切换。

3 实验验证

3.1 供电模块单机实验

为了验证供电模块单元设计的有效性, 搭建了额定功率为600 W的LLC谐振变换器实验样机, 其中高频变压器采用EE结构的铁氧体磁芯, 其型号为E703166, 原副边匝数比为10:4:4, 原边励磁电感 L_m 设计值为30 μ H; 谐振腔的元件参数实际取值为: 谐振电容 C_r 为1.56 μ F, 谐振电感 L_r 和激磁电感 L_m 分别为9.7 μ H和29.6 μ H; 其中 C_r 分别采用3个0.47 μ F和1个0.15 μ F的CBB22电容并联而成; L_r 用EE55的功率铁氧体磁芯绕制。LLC变换器的额定谐振频率为40.9 kHz, 工作频率范围为29~61 kHz。

为了测试LLC供电模块在全负载范围的工作特性, 图7给出了在3种不同负载条件下原边高端功率MOSFET与副边整流二极管 D_1 的开关工作波形。首先, 由图7a、图7c与图7e的结果可知: 在10%负载、50%负载以及满载3种条件下, 当 V_{ds} 减小至零后, V_{gs} 才开始高电平, 上、下桥臂均能够实现ZVS。其次, 图7b、图7d与图7f的结果显示: 在10%负载、50%负载以及满载3种条件下, 整流二极管 D_1 关断时, 其电流 I_{D1} 已减小至零, 因此实现了ZCS, 有效地减小了关断损耗。通过实测LLC供电模块的效率发现: 20%供电负载时达到83.8%, 而满载时的效率则达到91.12%, 因此供电模块在全负载范围内均具有较高的转换效率。

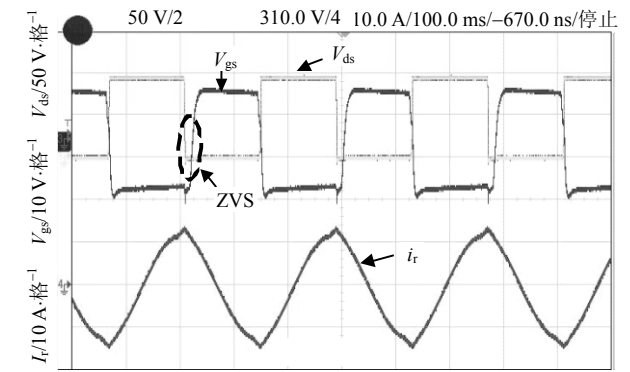
求, 可求得母线电压为:

$$V_{bus} = V_{ref}(1 - \Delta V_{bus}/V_{ref}) \quad (13)$$

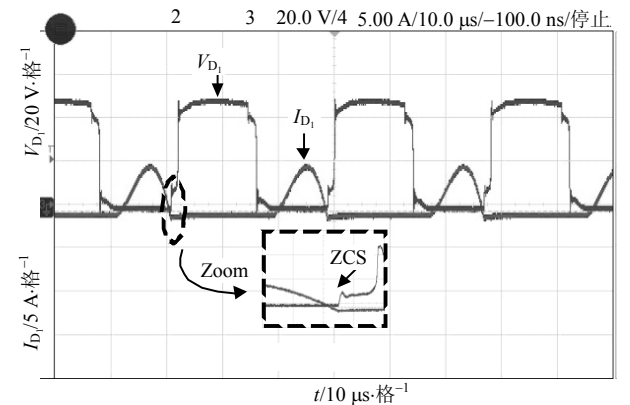
另一方面, 根据KVL和KCL, 可求得PNDC控制模块并联的直流母线电压为:

$$V_{bus} = \frac{V_{ref} + \kappa_i I_{seti}}{1 + (R_{c1} + \kappa_i)(R_{c2} + \kappa_i)/(R(R_{c1} + R_{c2} + 2\kappa_i))} \quad (14)$$

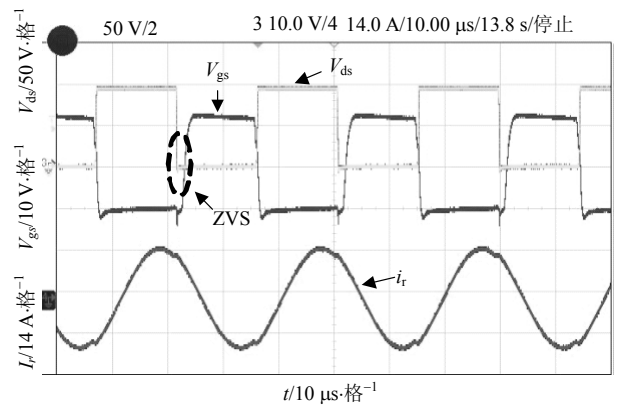
联立式(13)与式(14)可求解分段系数 κ_i 为:



a. 10%负载, Q1的ZVS工作波形



b. 10%负载, 副边D1的ZVS工作波形



c. 50%负载, Q1的ZVS工作波形

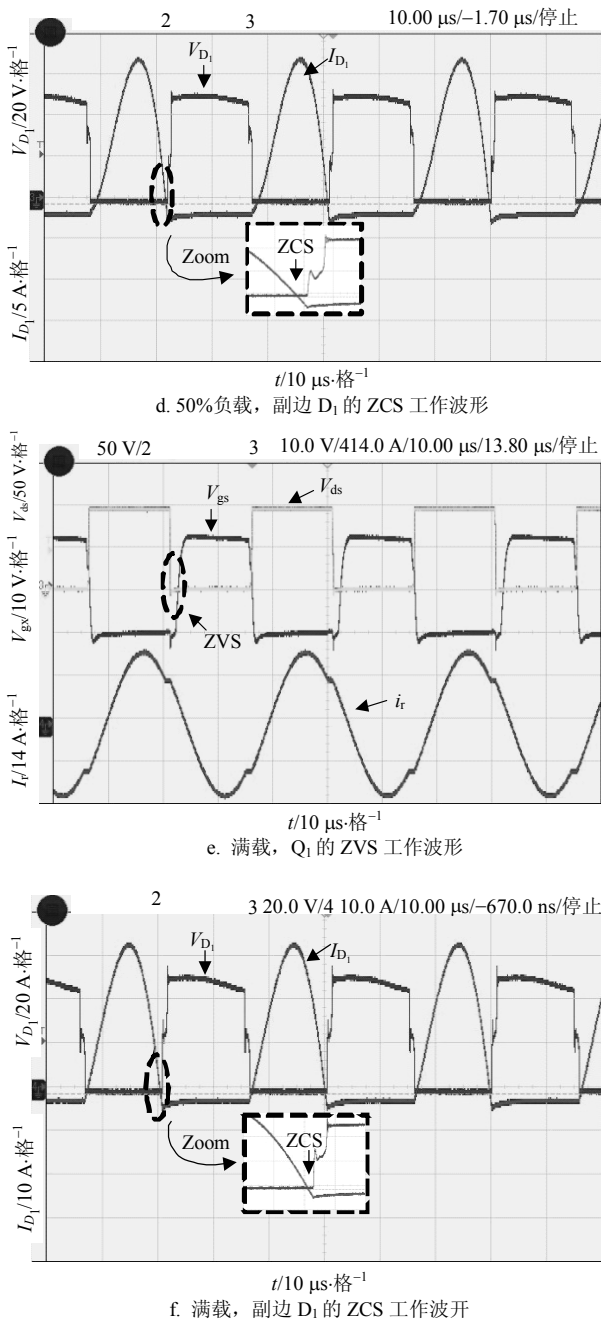


图7 开关管 Q_1 的ZVS及整流二极管 D_1 的ZCS工作波形

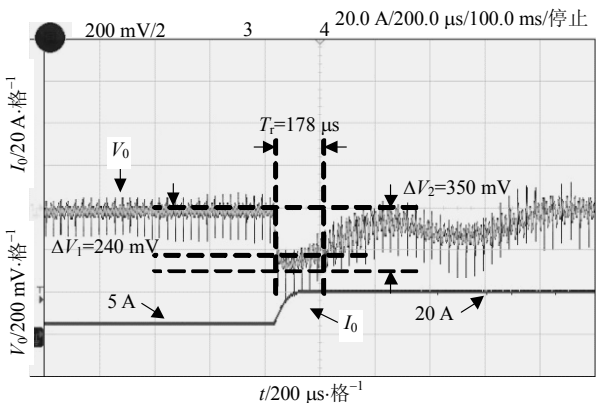


图8 LLC供电模块在负载突变时的瞬态响应

图8给出了LLC供电模块从20%负载至80%阶跃变化时的瞬态响应波形。由图中可以看出：输出电压的恢复时间 T_r 为178 μs ，其中恢复时间 T_r 为超调上升到1% V_o 处至下降到1% V_o 处的过渡过程， ΔV_1 为1%的输出电压(240 mV)，超调量 ΔV_2 为350 mV。

3.2 供电模块并联均流实验

为了满足直流UPS电源组供电模块冗余配置的工作要求，搭建了如图9所示包含两台供电模块并联均流实验平台，其中模拟连接两模块至直流母线的线缆电阻均取值为： $R_{l1}=R_{l2}=30 \text{ m}\Omega$ ，PNDC控制器的参数取值为： $R_d=0.04$ ， $k_1=0.5$ ， $k_2=0.4$ ，电流分段点设置为： $I_{set1}=6 \text{ A}$ ， $I_{set2}=16 \text{ A}$ 。根据设计参数，对本文PNDC下垂策略的实验结果分别测得稳态数据和瞬态响应波形。

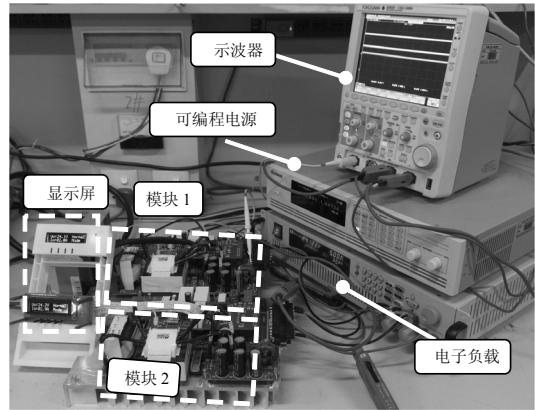


图9 电源模块均流实验平台

表1 模块均流实测数据

| 总负载电流/A | 模块#1输出电流/A | 模块#2输出电流/A |
|---------|------------|------------|
| 5 | 2.9 | 2.1 |
| 10 | 5.5 | 4.5 |
| 15 | 8.0 | 7.0 |
| 20 | 10.4 | 9.6 |
| 25 | 13.0 | 12.0 |
| 30 | 15.5 | 14.5 |
| 40 | 20.6 | 19.4 |

从表1的稳态实验数据可知：负载从5~40A变化时，两供电模块实现了均流，当负载电流达到40 A时，电流最大偏差为1.2 A，其均流误差 $\Delta_i < 5\%$ ，而此时输出电压为23.52 V。另外，从图10的瞬态响应波形可看出，当负载从20%跃变至80%，均流效果改善的同时电压跌落也控制在0.6 V以内，表明PNDC策略能够根据负载自适应调整下垂系数，较好地实现了均流精度和电压调整之间的折中设计。

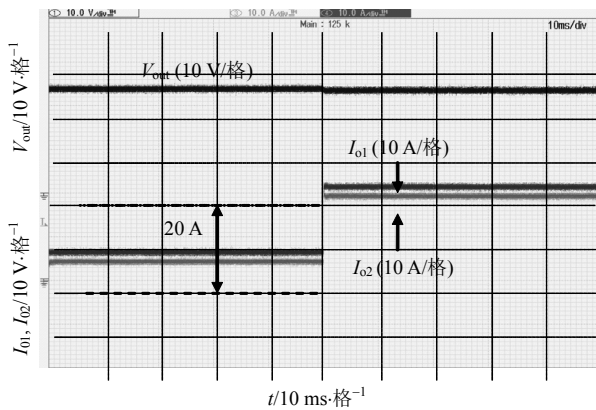


图10 20%→80%负载阶跃时的均流瞬态响应

4 结束语

本文根据地铁屏蔽门控制系统直流UPS供电模组的需求, 分别研究了基于LLC半桥谐振变换器的单模块设计与多模块均流实现, 并进行了实验验证, 得到以下结论:

1) LLC半桥谐振变换器的供电模块能够在全负载范围实现原边开关管的ZVS和输出整流二极管的ZCS, 实现了满载效率91.12%, 且具有良好的瞬态响应性能。

2) 基于分段式非线性下垂(PNDC)的自主均流策略通过负荷分区分段配置下垂曲线, 具有高度设计灵活性, 且对负载变化具有自适应特性, 能够改善均流精度与电压偏差之间的矛盾, 实现下垂曲线的多自由度优化。

参 考 文 献

[1] 于鑫, 夏德春, 王志飞, 等. 城市轨道交通屏蔽门控制系统关键技术[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(3): 137-143.
YU Xin, XIA De-chun, WANG Zhi-fei, et al. Key technology to platform screen door control system of urban rail transit[J]. China Railway Science, 2015, 36(3): 137-143.

[2] STEIGERWALD R L. A comparison of half-bridge resonant converter topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(2): 174-182.

[3] JEONG Y H, MOON G W, KIM J K. Analysis on half-bridge LLC resonant converter by using variable inductance for high efficiency and power density server power supply[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Tampa, FL, USA: [s.n.], 2017: 170-177.

[4] 王镇道, 赵亚魁, 章兢, 等. 半桥LLC谐振变换器参数模型与设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 51-55.
WANG Zhen-dao, ZHAO Ya-kui, ZHANG Jing, et al. Parameter model and design for LLC resonant half-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 51-55.

[5] COIMBRA J, PONTARA R, LOURES L, et al. An isolated bidirectional soft-switching converter based on LLC

resonant half-bridge with synchronous rectification[C]//2017 Brazilian Power Electronics Conference. [S.l.]: [s.n.], 2017: 1-8.

[6] HUANG Y, TSE C K. Circuit theoretic classification of parallel connected DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2007, 54(5): 1099-1108.

[7] KHORSANDI A, ASHOORLOO M, MOKHTARI H. An adaptive droop control method for low voltage DC microgrids[C]//Proc Conf Power Electronics, Drive Systems and Technologies. [S.l.]: [s.n.], 2014: 84-89.

[8] OBERTO V P, DEPEXE M D, NAIDON T C, et al. An improved droop control strategy for load current sharing in output parallel-connected DC-DC converters[C]//11th IEEE/IAS Conference on Industry Applications. Juiz de Fora: IEEE, 2014: 1-7.

[9] THOTTUVELI V, VERGHESE G C. Stability analysis of paralleled DC/DC converters with active current sharing [C]//Proc IEEE Power Electron Spec Conf. [S.l.]: IEEE, 1996: 1080-1086.

[10] YANG N, PAIRE D, GAO F, et al. Compensation of droop control using common load condition in DC microgrids to improve voltage regulation and load sharing[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 752-760.

[11] NARAHARISSETTI K. Design of half bridge LLC resonant converter using synchronous rectifier[C]//2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology. Dekalb, USA: IEEE, 2015:135-141.

[12] MA Lu-dan, HU Jian-ren, QIN Hui-bin. Design of half-bridge LLC resonant converter based on PLC810PG[C]//IEEE Conference on Electrical and Control Engineering. Yichang, China: IEEE, 2011: 4431-4434.

[13] 马焕, 王康平, 杨旭. 基于GaN器件的LLC谐振变换器的优化设计[J]. 电源学报, 2015(1): 21-27.
MA Huan, WANG Kang-ping, YANG Xu. Optimal design of GaN-based LLC resonant converter[J]. Journal of Power Supply, 2015(1): 21-27.

[14] 周伟成, 马皓, 张海军. 半桥LLC谐振变换器效率优化方案的研究[J]. 电力电子技术, 2007(9): 57-59.
ZHOU Wei-cheng, MA Hao, ZHANG Hai-jun. Research on the method for optimizing efficiency of half bridge LLC resonant circuit[J]. Power Electronics, 2007(9): 57-59.

[15] 李浩昱, 李振伟, 赵雷, 等. 宽输入LLC谐振变换器多电平控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 48-57.
LI Hao-yu, LI Zhen-wei, ZHAO Lei, et al. Multi-level control strategy of input LLC resonant converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 48-57.

[16] YANG B, LEE F C, ZHANG A J. LLC resonant converter for front end DC/DC conversion[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Dallas, USA: IEEE, 2002, 2: 1108-1112.

[17] HUANG Hong. Designing an LLC resonant half-bridge power converter[R]. [S.l.]: Texas Instruments Design Report SLUP263, 2010.

(下转第585页)

- [13] ZOU Q, NI L, ZHANG T, et al. Deep learning based feature selection for remote sensing scene classification[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2015, 12(11): 2321-2325.
- [14] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial nets[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2014, 27: 2672-2680.
- [15] MAKHZARI A, GOODFELLOW I, JAITLY J, et al. Adversarial autoencoders[EB/OL]. [2018-06-02]. <https://arxiv.org/abs/1511.05644>.
- [16] LUC P, COUPRIE C, CHINTALA S, et al. Semantic segmentation using adversarial networks[EB/OL]. [2018-06-02]. <https://arxiv.org/abs/1611.08408v1>.
- [17] ABADI M, AGARWAL A, BARHAM P, et al. TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems [EB/OL]. [2018-06-02]. <http://tensorflow.org/Software> available from tensorflow.org.
- [18] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Cham: Springer, 2015: 234-241.
- [19] LI Y, HE L, PENG B, et al. Geometric correction algorithm of UAV remote sensing image for the emergency disaster[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing: IEEE, 2018: 6691-6694.

编辑 叶芳

(上接第545页)

- [18] 杨帆, 杨玉岗. 基于UCC25600的LLC谐振变换器设计[J]. 电源技术, 2010(6): 589-591.
YANG Fan, YANG Yu-gang. Design of LLC resonant converter based on UCC25600[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2010(6): 589-591.
- [19] HUANG Y H, LIANG T J, WU W J. Analysis and implementation of half-bridge resonant capacitance LLC converter[C]//2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2016: 1302-1307.
- [20] WNIKSCH S, SCHLENK M, SCHENK K. Detailed analysis of a current-doubler rectifier for an LLC resonant converter with high output current[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Tampa, FL, USA: [s.n.], 2017: 1748-1754.
- [21] DOW Y S, SON H I, LEE H D. A study on half bridge LLC resonant converter for battery charger on board[C]//8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Jeju, South Korea: [s.n.], 2011: 2694-2698.

编辑 漆蓉