

一种新型的移动闪光焊轨机供电系统

陶启明¹, 夏梁志², 李文科², 曹泽², 谭洪涛³

(1. 西南交通大学, 成都, 610031; 2. 中车永济电机有限公司, 永济, 044502; 3. 成都艾格科技有限责任公司, 成都, 610097)

摘要: 针对传统柴油发电机组给移动闪光焊轨机供电的不足, 提出一种新型移动闪光焊轨机供电系统。通过分析移动闪光焊轨机工作特性, 提出采用超级电容器与双向 DC/DC 功率变换器连接后通过开关与蓄电池组并联, 构成蓄电池-超级电容混合储能供电系统应用于驱动移动闪光焊轨机工作。建立了其复合储能系统仿真模型并进行测试, 同时通过系统样机的产品开发进行试验, 结果表明, 该新型混合储能供电系统动态响应速度快、输出稳定, 可满足移动闪光焊轨机钢轨焊接的供电需求。除此之外, 该系统还能够克服传统柴油发电机组供电模式的三相负载不平衡, 产生废气污染环境等缺点, 具有低噪环保等优势。该系统的自主研发对国内无缝轨道焊接装备技术升级与创新具有重要参考意义。

创新点: 采用电池-超级电容混合储能供电系统首次成功应用于移动闪光焊轨机供电, 取代了现有的柴油发电机组的供电模式, 彻底避免了焊接过程中三相负荷不平衡, 污染环境等问题, 具有节能环保减排等优点。

关键词: 移动闪光焊轨机; 蓄电池; 超级电容器; 混合储能

中图分类号: TG 432 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20200524002

0 序言

中国高速铁路经过飞速发展, 其运营里程已雄踞世界榜首, 而轨道焊接技术是保证列车安全运行、旅客舒适度的关键环节之一^[1]。有统计表明, 目前国内无缝铁路的轨道焊接主要是采用闪光焊接技术, 约占无缝铁路接头总数的 87%^[2]。但在目前移动式钢轨闪光焊系统中, 多采用柴油发电机组作为焊机系统的供电电源。虽然这种供电方式具有环境适应性好、供电连续等优点。但是因为脉动闪光焊系统采用的是两相电源, 这就导致了柴油发电机组长期工作在三相负载不平衡的工况下, 这种供电方式不仅产生的噪音大, 排放有害废气污染环境, 同时也会产生影响柴油发电机组使用寿命等一系列问题, 严重制约着高铁的发展^[3-4]。

闪光焊轨机可被视为一种脉动负载, 其特点为瞬时的脉动电流及功率较大, 而平均电流较小, 通常要求供电电源具有高能量密度及高功率密度的特点。相比之下, 随着超级电容等新型储能器件的

发展, 它与蓄电池构成的蓄电池-超级电容复合能源系统, 表现出了卓越的储能性能^[5-8]。它充分将常规蓄电池的能量密度大和超级电容器的功率密度大、循环寿命长的优点相结合, 不仅能够增大储能系统的功率, 输出和吸收高倍率电流冲击, 而且系统在运行过程中不产生任何废气污染, 绿色环保, 使之成为解决上述问题的一种有效途径。

在分析了几种蓄电池-超级电容复合储能供电系统拓扑结构的基础上, 结合移动闪光焊轨机工作特性, 设计了一种基于两重化 DC/DC 拓扑结构的新型复合储能系统, 并首次将其应用于移动闪光焊轨机供电。建立其仿真模型测试及产品样机试验, 试验结果均表明该新型混合储能供电系统能够快速响应焊轨机负载工作状况的变化, 输出电压稳定, 所焊钢轨满足 TB/T 1632.2—2014《钢轨焊接第 2 部分: 闪光焊接》的技术要求, 验证了系统的可行性与有效性。

1 复合能源系统结构设计

1.1 几种复合能源拓扑结构分析

蓄电池和超级电容器构成的混合储能系统结

构一般分为串联和并联形式。串联复合电源是由蓄电池和超级电容器直接串联组成,通过控制器控制超级电容是否参与功率输出。这种形式的混合储能装置结构简单、易于控制,超级电容能量利用率高,虽然可以相对提高系统的功率输出能力,但系统抗冲击电流能力不强,也缺乏对蓄电池的保护,不利于延长蓄电池的使用寿命。而由蓄电池与超级电容器并联构成的复合能源系统,因其结构型式灵活,可有效降低蓄电池的输出功率,减少高倍率瞬时大功率对蓄电池的冲击等优点而更加常见^[9]。图1给出了蓄电池与超级电容并联构成复合电源的四种拓扑结构,分别讨论如下。

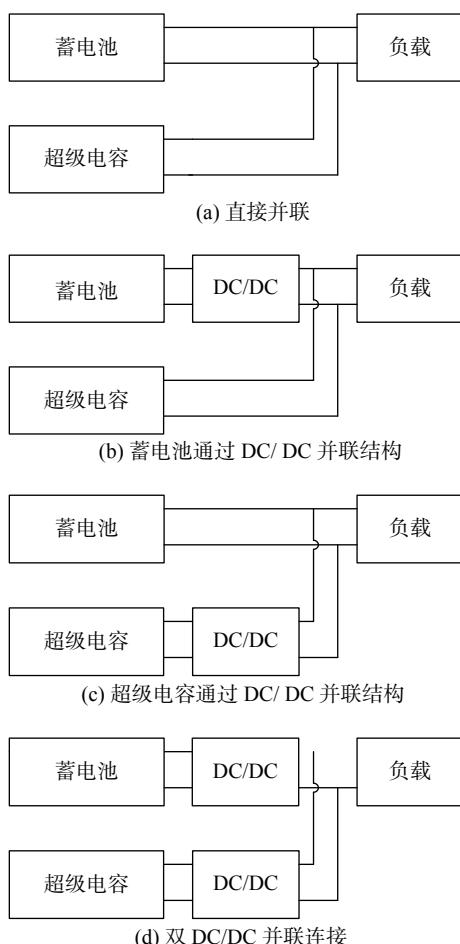


图1 并联结构复合电源结构

Fig. 1 Composite power supply structure with parallel structure. (a) direct parallel connection; (b) storage battery passes through the DC/DC parallel; (c) supercapacitors pass through DC/DC parallel structure; (d) double DC/DC parallel connection

1.1.1 直接并联结构

如图1a所示,这种蓄电池与超级电容直接并联构成复合能源,其优点是结构简单可靠,成本低廉,可有效减少负载电流脉动时对蓄电池冲击,提高

系统功率输出能力。但该复合电源结构在设计时要求蓄电池电压与超级电压保持一致,这就使得超级电容的设计参数要参考蓄电池的电压等级,缺乏灵活性,工况适应性差。同时由于蓄电池与超级电容的充放电特性差别较大,特性曲线重度低,当系统脉动功率增大时,超级电容也难以有效的辅助输出。

1.1.2 蓄电池通过DC/DC并联结构

如图1b所示,蓄电池通过DC/DC功率变换器与超级电容并联,并且通常情况下将功率变换器设计成具备可升降压功能的双向DC/DC。该电路结构的优点是由于DC/DC功率变换器的存在,蓄电池端电压与超级电容电压不用保持一致,提高了设计的灵活性。同时由于DC/DC直接与蓄电池连接,可以优化控制蓄电池的充放电电流,电路上大功率充放电需求可由超级电容器直接承担,降低了对蓄电池的负担,延长其使用寿命。但该结构与超级电容直接并联在母线端,由于其能量密度低,在脉动电流期间,其电压波动较大,对母线电压控制提出了更高的要求。

1.1.3 超级电容通过DC/DC并联结构

如图1c所示,超级电容通过双向DC/DC变换器与蓄电池并联,蓄电池直接接直流母线。该结构复合电源输出电压稳定,超级电容通过DC/DC变换器调节输出功率,为瞬时脉动大功率提供支持,降低蓄电池输出功率。并且母线上高倍率的充放电电流大部分可由超级电容来承担,降低了蓄电池负担。但该复合电源结构所付出的代价是要求DC/DC变换器具备较大容量及较快的响应速度来避免蓄电池承受脉动大功率的冲击,提高了系统设计难度,增加了成本。

1.1.4 双DC/DC并联连接

如图1d所示,蓄电池与超级电容分别连接DC/DC变换器后并联。相比上述三种结构,该复合电源型式中蓄电池和超级电容器电压都是可控的、设计灵活,并且通过合理的控制策略能较好的实现不同存储单元之间的能量分配,对输入输出功率进行灵活控制。但该复合电源结构较为复杂,对控制系统要求较高,增加了设计及维护成本。同时由于有2套DC/DC变换器,无形中也增加了系统损耗,降低了系统能源利用率。

1.2 闪光焊轨机复合能源模型建立

1.2.1 闪光焊轨机工作特性分析

传统的移动闪光焊轨机供电模式一般为柴油发电机组输出三相AC380 V,取其两相给焊轨机供

电。为了能设计出一种适合闪光焊轨机供电的蓄电池超级电容混合能源系统,首先需分析闪光焊轨机

工作的电气特性,图 2 给出了一种典型的柴油机供电的焊接过程波形曲线。

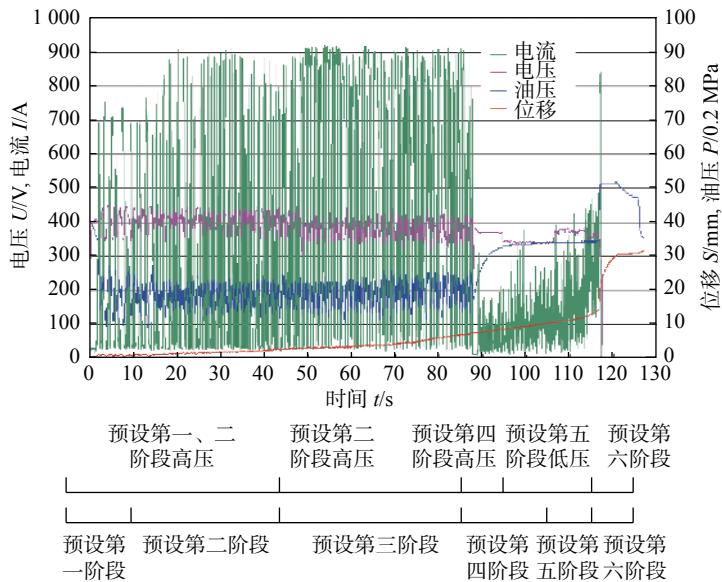


图 2 一种典型的焊接过程波形曲线

Fig. 2 A typical waveform curve of welding process

从图 2 可以看出,该种工艺类型的闪光焊轨机在 120 s 左右即可完成一次完整的焊接作业,并且在焊接过程中,焊轨机输入电流急剧脉动,经过实际测量,峰值电流最高可达 1 900 A,符合瞬时大倍率电流冲击的特性。其电压波形则是在 400 V 上下小幅震荡,并且随着焊接过程的不同阶段,焊机输入电压、电流变化也不尽相同。总体来看,经过计算整个焊接过程中电流、电压脉动所产生的瞬时功率大,而平均功率较小。这就要求移动闪光焊轨机供电电源能在较短时间内提供较大功率输出,输出电压稳定,并且系统动态特性好,以满足轨道焊接要求。

1.2.2 闪光焊轨机复合电源模型建立

结合前述对几种蓄电池-超级电容混合电源结构的分析及闪光焊轨机负载的特性,设计移动闪光焊轨机蓄电池-超级电容混合储能供电系统等效模型如图 3 所示。

该复合电源模型结构主要由蓄电池组、两重化的双向 DC/DC 变换器、超级电容器以及单相逆变器组成。为了简化模型结构,此处亦将蓄电池组等效为理想电压源 E_a 和其等效内阻 R_a 串联,将超级电容器组等效为理想电容 U_c 和其等效内阻 R_c 串联^[10-12]。 R_f 表示其并联等效电阻,通常表示超级电容的漏电情况,此处可被忽略不计。采用 2 重化的双向 DC/DC 变换器目的是为了提升系统过流能力、提高等效开关频率及系统可靠性,减小电流谐波。

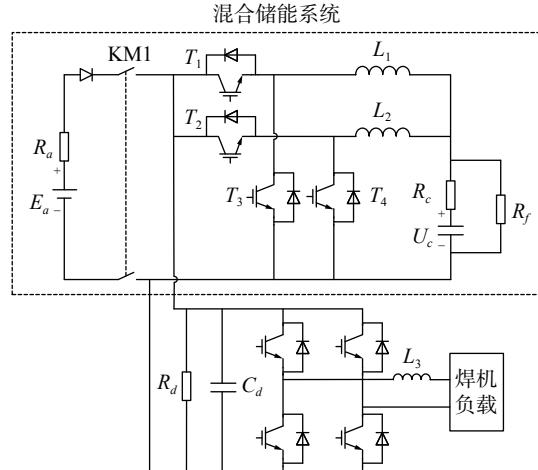


图 3 闪光焊轨机复合电源等效模型

Fig. 3 Equivalent model of composite power supply for flash rail welding machine

该混合储能模型基本的工作过程为:系统检测焊轨机的工作状态,当焊轨机准备工作时,直流断路器 KM1 断开,将蓄电池组从系统分离,能量从超级电容器组通过 DC/DC 变换器流向单相逆变器给焊机供电,使得系统的功率及高倍率电流冲击完全由超级电容承担。通过设计合适的超级电容电量,来满足焊接一次所需的能量要求。此时双向 DC/DC 变换器工作在 Boost 模式。

当焊机停止工作时,闭合 KM1,使能量从蓄电池组通过 DC/DC 变换器流向超级电容器给其充电。此时双向 DC/DC 变换器工作在 Buck 模式。通

过 DC/DC 变换器优化蓄电池的充放电电流, 来延长蓄电池使用寿命。

2 仿真建模分析

为了验证文中提出的闪光焊轨机蓄电池-超级电容复合储能供电系统的正确性和有效性, 利用仿真软件 Matlab 搭建系统仿真模型进行测试, 整体拓扑图如图 4a 所示, DC/DC 拓扑如图 4b 所示, DC/AC 拓扑如图 4c 所示, 其中 L_1, L_2 为 $220 \mu\text{H}$, C_1 为 30 mF , L_3 为 $80 \mu\text{H}$, C_2, C_3 为 $640 \mu\text{F}$, R_1 为 0.26Ω , 负载为

阻感性满功率负载, 电阻 0.07Ω , 电感 1.26 mF 。

系统对 DC/DC 变换器控制采用电压电流双环控制策略, 根据工作模式的不同主要采集的控制信号包括蓄电池端电压、超级电容端电压、高压侧母线电容端电压及负载端电压、电流等。电压外环通过采集负载电压, 与参考电压比较得到误差信号, 电流内环通过电流传感器采集负载电流作为反馈信号, 经过 PI 调节器来控制功率器件, 实现充放电电流控制及升降压模式的转换。

当焊轨机焊接时, DC/DC 变换器处于 Boost 工作状态, 低电压端由超级电容供电, 设置最低电压

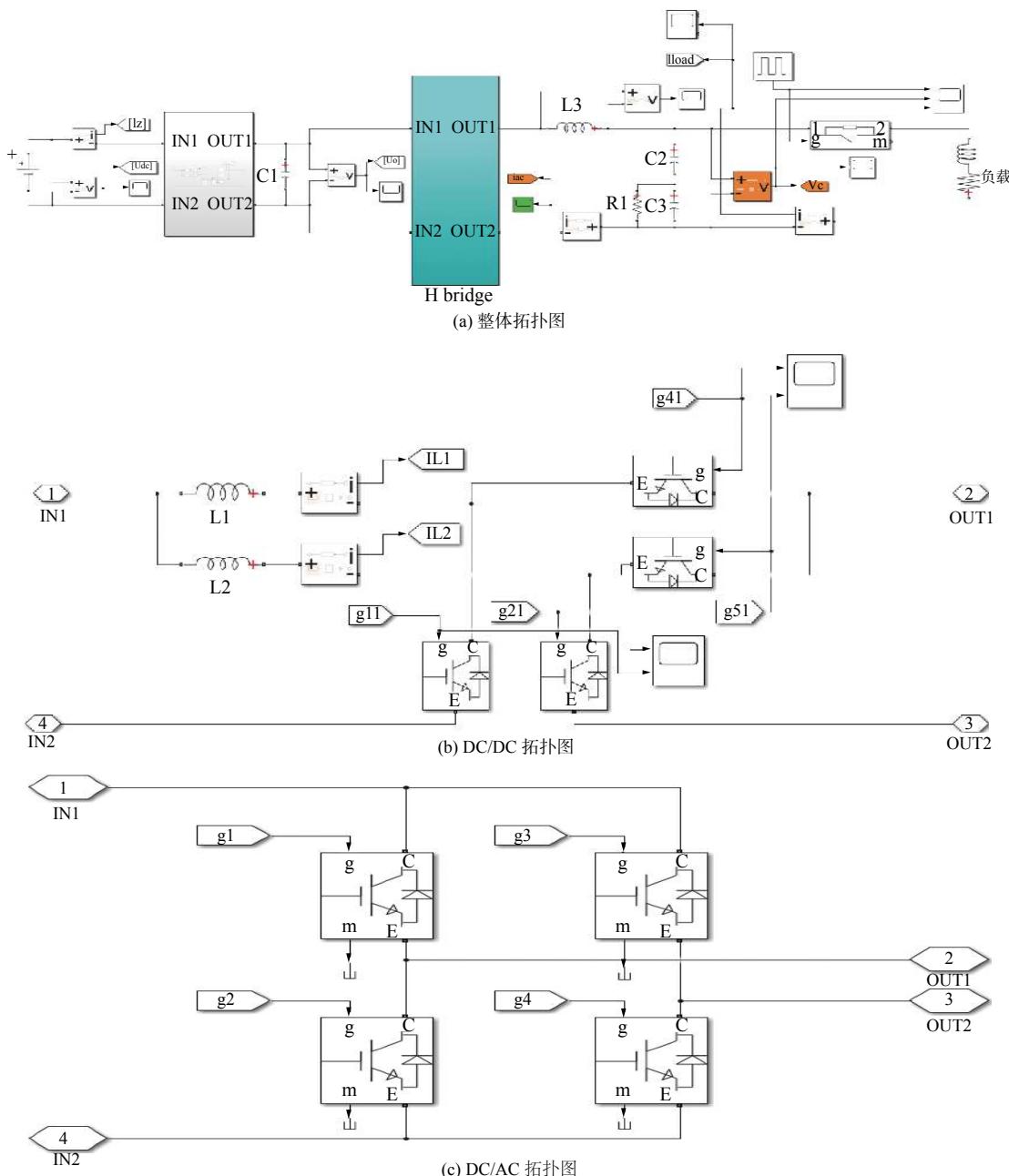


图 4 系统仿真模型拓扑图

Fig. 4 Topology graph of system simulation model (a) overall topological graph; (b) DC/DC topological graph; (c) DC/AC topological graph

240 V, 高电压端设置直流母线电压目标值为 650 V, 单相逆变器负载为阻感性满功率负载, 电阻设置 0.07Ω , 电感 1.26 mH , 仿真时间为 3 s. 为模拟焊接工况的负载脉动电流, 系统设置每 0.25 s 进行一次负载突变. 满负载时高压侧母线电容 C_d 端电压波形如图 5 所示, 系统稳定时其放大图如图 6 所示, 电感 L_1 电流波形如图 7 所示.

由图 5 可见, 系统工作在 Boost 模式, DC/DC 变换器输出电压能够迅速达到目标电压值, 响应速度

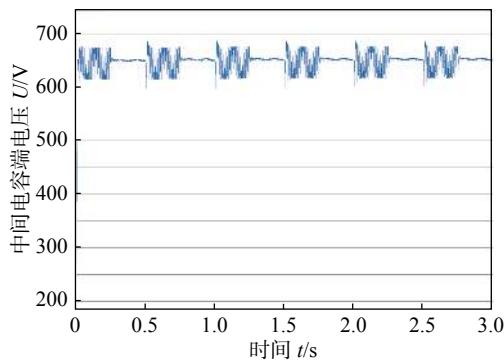


图 5 满功率负载突变母线电容电压波形

Fig. 5 Capacitance voltage waveform of full power load mutation

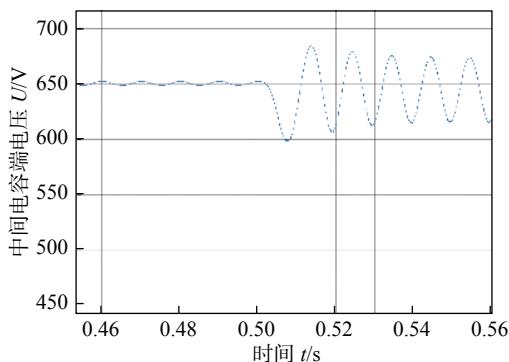


图 6 满功率负载突变电容电压波形放大

Fig. 6 Amplification of capacitance voltage waveform of full power load mutation

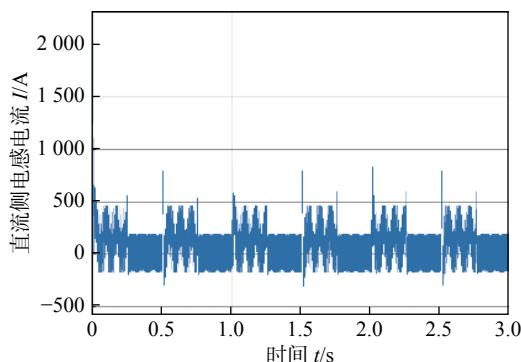


图 7 满功率负载突变电感电流波形

Fig. 7 Inductor current waveform of full power load mutation

较快, 响应时间 10 ms 左右. 而由图 6 可知, 当系统发生满功率负载突投时, 母线电压在不到 30 ms 时间内即可达到稳定. 稳定后的电容电压最低 600 V 左右, 满功率稳定时二倍频峰峰值为 50 V 左右. 图 7 也显示了负载突变时电感电流跟随的快速响应.

图 8 给出了系统满功率负载突变时, 单相逆变器输出的电压、电流波形, 即闪光焊轨机输入电压、电流波形. 图 9 为其放大波形. 紫色为电流波形, 红色为电压波形. 由图可见当检测到负载突变后, 系统迅速做出响应, 输出电压可在 1 个周期 20 ms 左右调节稳定, 稳定输出电压有效值 380 V. 输出电流的调节时间也小于 40 ms, 最大峰值达到 1500 A 左右.

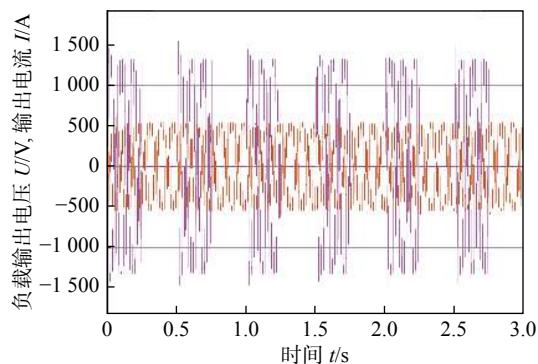


图 8 满功率负载突变负载电压电流波形

Fig. 8 Current and voltage waveform of full power load mutation

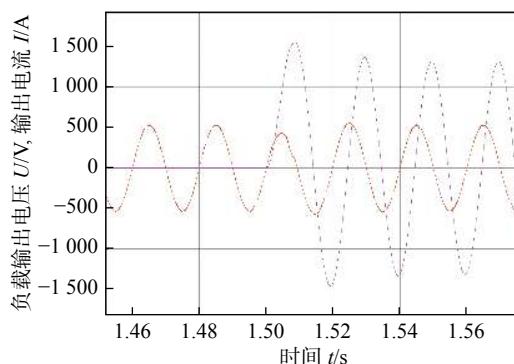


图 9 满功率负载突变电压电流波形放大

Fig. 9 Amplification of current and voltage waveform of full power load mutation

由此可见, 上述仿真结果表明文中所设计的蓄电池-超级电容混合供电系统能较好的满足图 3 所示移动闪光焊轨机供电电源的设计要求.

3 样机研制及试验

基于上述分析, 研制一种新型的移动闪光焊轨机供电系统. 该新型供电系统采用标准集装箱式的

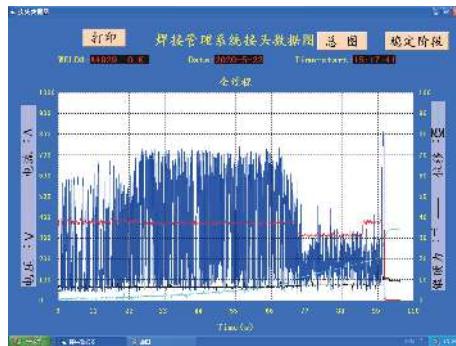


图 10 新型供电系统焊接波形曲线

Fig. 10 Welding waveform curve of new power supply system

结构设计,内部集成了蓄电池组、超级电容器组、双向 DC/DC 功率变换器、焊机逆变器、辅助逆变器及冷却系统等部件。

目前该产品样机与国内某公司的 UN5-150ZB 型闪光焊轨机进行匹配,已经完成了焊接试验。焊接所用的钢轨型号为 GB60 kg 的 U75 V,选取焊机系统记录的其中一种典型的焊接次级电压、电流波形如图 10 所示。采用外接示波器观测得到的供电系统工作波形如图 11、图 12 所示。其中通道 CH1~CH4 分别为主板采集电流信号、供电系统输出负载电流、负载电压以及直流母线电压波形。

由图 11、图 12 可见,新型供电系统在焊接过程中的输出动态响应与前述理论仿真基本保持一致,符合移动闪光焊轨机对供电电源的要求。

为了检验产品的可靠性,对该设备焊接后的钢轨进行了落锤试验(高度为 3.2 m,两锤不断,连续 15 根不断)。强制断开钢轨焊缝,测量了相关性能参

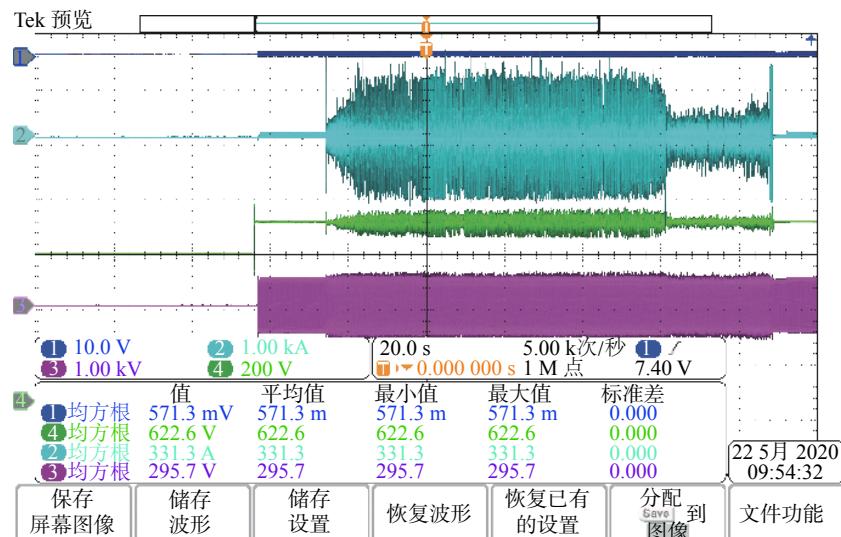


图 11 示波器采集焊接波形曲线

Fig. 11 Welding waveform curve collected by oscilloscope

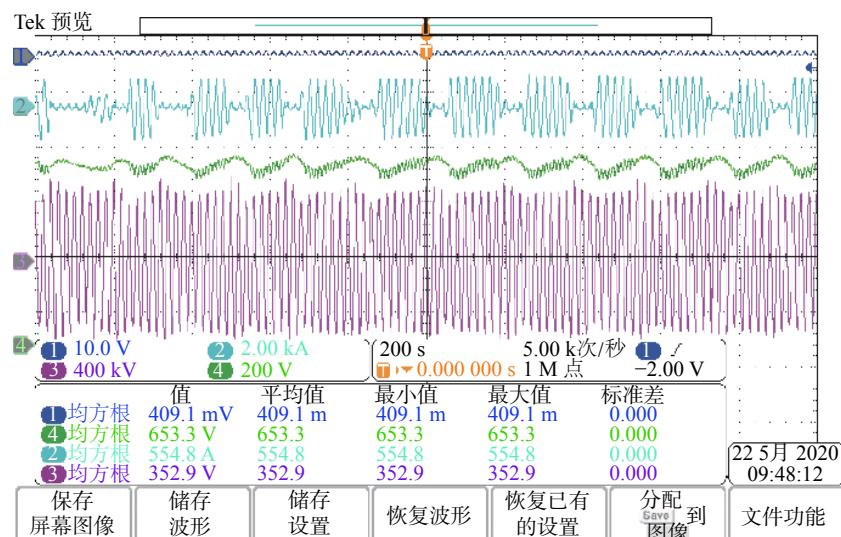


图 12 示波器采集放大波形曲线

Fig. 12 Amplified waveform curve collected by oscilloscope

数, 检测结果表明所焊钢轨满足 TB/T 1632.2—2014《钢轨焊接第 2 部分: 闪光焊接》的技术要求。

试验阶段还对产品在焊接工作中的噪声等级进行了测试, 结果表明系统运行过程产生的噪声基本维持在 75 dB 以下, 远远低于传统柴油发电机 120 dB 以上的噪声水平。样机的最终试验结果显示新型移动闪光焊轨机供电系统是研制成功的, 并且具备绿色环保的优势。

4 结论

(1) 电源采用超级电容通过 DC/DC 转换器与电池并联, 电池组不直接参与功率输出, 电池组为超级电容充电, 超级电容负责功率输出, 满足钢轨闪光焊要求。

(2) 电源采用多重化双向 DC/DC 转换器, 电池组快速为超级电容组充电, 更高的转换效率, 具有较快的响应速度保证焊接工艺参数准确, 提高钢轨闪光焊接的可靠性。

(3) 电源已成功应用于钢轨闪光焊, 焊接过程无污染排放、无噪音、功率输出稳定, 极大的改善操作人员工作环境等优点。

(4) 电源可提高能源利用效率, 促进可再生能源发展和节能减排, 具有良好的社会效益。为节能环保、保证焊接质量提供了一种新的解决方案。

参考文献

- [1] 杨来顺. 客运专线无缝线路的钢轨焊接 [J]. 铁道工程学报, 2005, 22(1): 47–50.
Yang Laishun. Rail welding of jointless of passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 22(1): 47–50.
- [2] 吕其兵, 张曦. 高速铁路轨道焊接质量控制现状与趋势 [J]. 电焊机, 2019, 49 (2): 1–5.
Lü Qibing, Zhang Xi. Status and trends of quality control for high-speed rail welding[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49 (2): 1–5.
- [3] 李建泉, 金敬德. 基于变流技术的焊轨车电气系统 [J]. 变流技术与电力牵引, 2008(4): 39–41.
Li Jianquan, Jin Jingde. Electrical system of rail welding machine based on converter technology[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2008(4): 39–41.

- [4] 张银龙, 张琨, 王雪华, 等. 中频逆变直流焊轨技术研究 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(3): 330–333.
Zhang Yinlong, Zhang Kun, Wang Xuehua, et al. Research on MF inverter DC rail welding technology[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(3): 330–333.
- [5] Mehdi Ansarey, Masoud Shariat Panahi, Hussein Ziarati, et al. Optimal energy management in a dual-storage fuel-cell hybrid vehicle using multi-dimensional dynamic programming[J]. Journal of Power Sources, 2014, 250: 359–371.
- [6] 杨培刚, 周育才, 刘志强, 等. 基于 ADVISOR 的纯电动汽车复合电源建模与仿真 [J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(3): 66–71.
Yang Peigang, Zhou Yucai, Liu Zhiqiang, et al. Modeling and simulation of pure electric vehicle with composite power source based on ADVISOR[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(3): 66–71.
- [7] 张卫, 杨珏, 张文明, 等. 纯电动汽车蓄电池-超级电容复合能源系统研究 [J]. 电测与仪表, 2019, 56(3): 82–90.
Zhang Wei, Yang Jue, Zhang Wenming, et al. Research on battery-supercapacitor hybrid energy system for pure electric vehicle[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3): 82–90.
- [8] Ping Dai, Sébastien Cauet, Patrick Coirault. Disturbance rejection of battery/ultracapacitor hybrid energy sources[J]. Control Engineering Practice, 2016, 54: 166–175.
- [9] 张进, 麻友良. 复合电源电动汽车动力系统优化设计研究 [J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 112–117.
Zhang Jin, Ma Youliang. Optimal design of electric vehicle's power system with composite power supply[J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 112–117.
- [10] 吴宏军, 陈诚, 黄敬云. 复合电源在内燃机车供电系统中的应用 [J]. 机车电传动, 2016(4): 39–42.
Wu Hongjun, Chen Cheng, Huang Jingyun. Application of ultracapacitor and battery hybrid power system for diesel locomotive power supply[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(4): 39–42.
- [11] 曹秉刚, 曹建波, 李军伟, 等. 超级电容在电动车中的应用研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1317–1322.
Cao Binggang, Cao Jianbo, Li Junwei, et al. Ultracapacitor with applications to electric vehicle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(11): 1317–1322.
- [12] 张伟先, 杨洁, 乔志军. 有轨电车超级电容储能电源系统的寿命评估 [J]. 电源技术, 2020, 44(2): 214–215.
Zhang Weixian, Yang Jie, Qiao Zhijun. Life assessment of supercapacitors energy storage power system for trams[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(2): 214–215.

第一作者:陶启明, 硕士; 主要研究方向为钢轨闪光焊工艺与焊接新能源设备研发; E-mail: 460258755@qq.com.

(编辑: 李帅)