

一种铁路机车检修电源研究

朱志伟

(珠海万力达电气自动化有限公司, 广东省企业供配电系统电压暂降工程技术研究中心, 广东 珠海 519085)

摘要:《中长期铁路网规划》、“中国制造 2025”等国家重大战略持续支持铁路装备发展, 铁路机车检修电源作为保障电力机车顺利完成组装调试、日常运维检修的重要装备具有重要研究意义。针对传统检修电源存在的不能模拟各种工况和易对输入侧产生不对称电能质量影响问题, 提出了一种新型机车检修电源拓扑方案及其对应的电压稳定控制、越线控制策略, 解决了模拟多种电压工况和能量反向注入问题。最后利用 PSIM9.0 搭建了检修电源方案及控制方法仿真模型, 通过仿真结果证明了该检修电源及控制策略的可行性。

关键词: 机车检修电源; 电压稳定; 越线控制; 反向注入

Research on a railway locomotive maintenance power supply

ZHU Zhiwei

(Zhuhai Wanlida Electrical Automation Co., Ltd., Guangdong Province Voltage Sag Engineering Technology Research Center of Enterprise Power Supply & Distribution System, Zhuhai 519085, China)

Abstract: Major national strategies such as “Mid-long term railway network plan” and the “Made in China 2025” plan continue to support the development of railway equipment. Locomotive maintenance power supply has important research significance as an important equipment to ensure the smooth completion of assembly and commissioning, daily operation and maintenance of electric locomotives. In view of the fact that the traditional maintenance power supply cannot simulate various working conditions and is easy to produce asymmetry and other power quality effects on the input side, a new locomotive maintenance power supply topology and its corresponding voltage stability control and cross-line control strategies are proposed, and can simulate a variety of voltage conditions and solve energy reverse injection problems. Finally, a simulation model is used to build the maintenance power supply program and control method described in this article, and the simulation results prove the feasibility of the maintenance power supply.

Key words: locomotive maintenance power supply; voltage stability; cross-line control; reverse injection

0 引言

根据国家《中长期铁路网规划》^[1], 到2025

年, 铁路网规模达到17.5万km左右, 其中高速铁路3.8万km左右, 网络覆盖进一步扩大, 路网

结构更加优化,骨干作用更加显著,更好发挥铁路对经济社会发展的保障作用。展望到2030年,基本实现内外互联互通、区际多路畅通、省会高铁连通、地市快速通达和县域基本覆盖。因此,在未来相当长一段时间内,铁路网规模、铁路机车数量以及机车运维设备规模必将持续爆发式增长。特别是“中国制造2025”^[2]的实施,高铁作为重点发展领域,各项技术和设备都将取得跨越式发展。而随着机车数量的不断增多,机车检修电源作为机车运维的重要供电保障,研究该检修电源的实用化方案具有重要的现实意义。

在实际应用中,每一台运行的铁路牵引机车必须进行周期性维护、故障排查和检修等操作^[3-5]。当机车返回机务段执行上述操作过程时,必须对机车进行供电。通常接触网25 kV为专线专用线路,其牵引电源常为110 kV或220 kV经牵引变压器转供电。然而,建设一条110 kV或220 kV电源投资异常高昂^[6],造价成为工程应用的重要限制因素,不利于铁路提质增效,也不符合实现“碳中和”的举措。同时在车辆厂内,车辆完成组装后的系统联调、整机测试都需要专用25 kV测试电源进行供电,车辆厂对牵引维修电源 also 具有很强的工程需求。

因此,研究一种新型牵引机车检修电源(Locomotive Maintenance Power Supply, LMPS)成为铁路系统提质增效、降低成本的一种重要手段。

然而,常规采用10 kV/25 kV变压器方案提供检修用高压电源的方案却存在下列问题:

1) 牵引机车为单相负荷^[7-9],造成公用电网10 kV侧存在明显电流不平衡问题,使10 kV/25 kV变压器不平衡度超标、损耗增大;更严重的是公用电网10 kV系统电能质量恶化,导致近区负荷工作可靠性降低,严重时甚至不能正常工作。特别是在车辆厂内,这一问题更为明显。

2) 常规三相负荷不平衡补偿装置^[10-11]多为低压400 V等级设备,在25 kV和10 kV等级范围内,其三相负荷不平衡补偿装置鲜有应用,同时造价高昂,工程中难以解决问题。

通过上述分析可知,根据铁路机车运维设备发展的重大需求以及既有检修电源存在的问题,迫切要求一种新型机车检修电源来解决实际存在的造价高昂和电能质量等问题。本文针对这些难题,提出了一种铁路机车检修电源方案,分析了该电源的拓扑结构与工作原理,提出了对应的控制方法,并通过建立对应的仿真模型证明了本文拓扑和策略的可行性。

1 拓扑结构与控制机理

根据实际工况条件可知,输入侧为三相10 kV,输出侧为单相25 kV,即完成由三相向单相的变换。因此,本文提出采用三相多重化变压器 T_1 、AC/AC型功率单元、单相多绕组变压器 T_2 和并网模块构成的新型机车检修电源方案。其拓扑结构如图1所示。

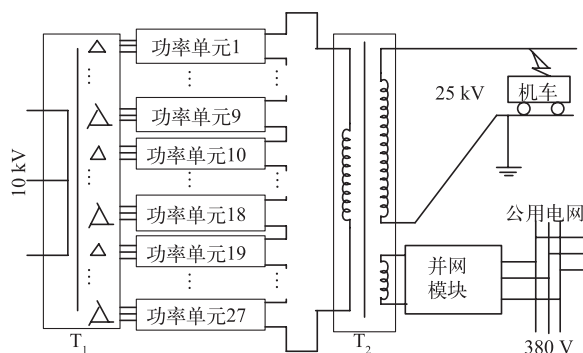


图1 新型机车检修电源拓扑结构

Fig. 1 Topology of LMPS

由图1可知,输入侧采用10 kV/690 V移相变压器,二次侧具有27个低压绕组,每9个为一组,9个绕组之间实现依次延展 20° ;每个功率单元由三相不可控整流桥、直流储能平波电容和单相逆变H桥构成,如图2所示。经过多重化移相后,尽管采用不可控整流方式,但是由于能够实现多脉波整流,使10 kV输入侧电流畸变率大大降低^[11-12]。同时,27个功率单元实现单相H桥级联^[13-14],级联后输出电压供给到单相多绕组变压器 T_2 的一次侧; T_2 的二次侧高压绕组输出25 kV电压,二次侧低压绕组与并网模块相连;且并网模块由全控AC/AC变换器构成,并与市电380 V并网运行。并网模块拓扑结构如图3所示。

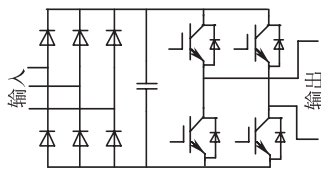


图2 功率单元拓扑结构

Fig. 2 Topology of power cell

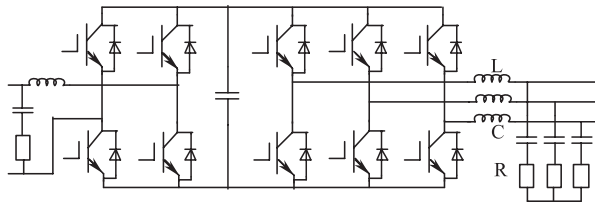


图3 并网模块拓扑结构

Fig. 3 Topology of grid-connected module

LMPS的并网模块工作在两种模式：①小电流并网模式，即并网模块向低压电网注入小电流；②大容量有功注入模式，并网模块跟踪25 kV侧的功率状态，当机车缓慢制动产生反向能量时，并网模块将能量释放到380 V公用电网侧，避免反向能量造成LMPS的功率单元直流侧过电压。

由图1~图3可知，LMPS利用移相变压器 T_1 将10 kV电压降低为27组690 V电压，为功率单元供电。功率单元将690 V电压经过不可控整流为直流，经过27个H桥级联输出12.5 kV电压。变压器 T_2 升高为25 kV电压，为检修车辆供电。同时LMPS利用并网模块转移机车维修过程中的少量制动能量，解决了反向能量注入问题。

2 控制策略

2.1 电压稳定控制

由于列车在接触网供电区间内运行时，受机车加速、爬坡和重载等取流影响^[15]，造成机车受电弓端电压在20~29 kV范围内变化。因此采用LMPS后可以模拟受电弓处供电电压的宽范围变化，充分验证机车在高低压宽范围电压变化下工作的可靠性和稳定性。如图4所示，LMPS具有三种指令值：第一种为额定25 kV输出控制，用于模拟机车在接触网额定25 kV电压下的运行；

第二种为20 kV输出控制，用于模拟机车在接触网末端极端低电压下的运行；第三种为29 kV输出控制，用于模拟机车在接触网首端高电压下的运行。通过自主设定LMPS的输出电压，可以使机车在维护过程中模拟多种工况，提高检修质量，及时发现隐患；同时，可以提高机车在出厂时在各种工况下的可靠性验证。

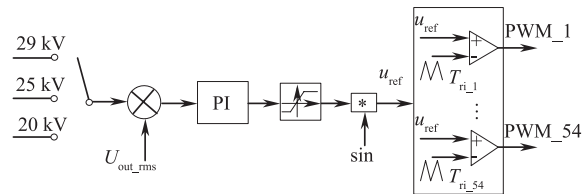


图4 输出电压稳定控制策略

Fig. 4 Strategy of voltage stability control

2.2 越线控制

LPMS的能量流具有两种：一种为正向能量流，即从输入侧流向输出侧，此时能量从10 kV侧流向25 kV侧为检修机车供电，并网模块几乎并不输送能量给低压侧公用电网；另一种为反向能量流，如图5所示，检修机车刹车制动产生的反向能量，通过并网模块转移到低压公用电网，而10 kV侧取得的能量仅用于维持功率单元的损耗和少部分转移到公用电网。

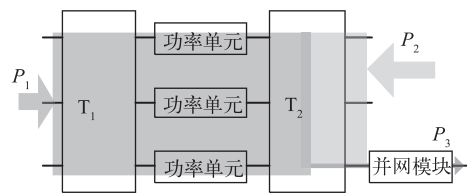


图5 LMPS反向能量流控制

Fig. 5 Reverse power flow control of LMPS

根据图5及其分析过程可知，在反向能量控制中，并网模块转移到公用电网的能量 P_3 必须大于25 kV侧反馈回LMPS的能量 P_2 。这是因为：当 $P_3 - P_2 > 0$ 时， P_3 必有少部分能量从 P_1 中取得，功率单元能量从不可控整流向并网模块转移；当 $P_3 - P_2 < 0$ 时， P_2 必有少部分能量向 P_1 侧转移，由于功率单元采用不可控整流，能量将聚集在功率单元直流侧造成直流过电压保护动作；因此，必须对向 P_1 侧转移能量的过程进行控制。

当能量从输出侧向不可控整流侧转移时,易造成直流过电压。其能量的量化过程如图6所示。机车缓慢制动产生的反向能量向LMPS内部转移,并网模块以检测到的反向能量为指令 P_{ref} ,控制并网模块向公用电网注入有功 $P_{\text{grid_unit}}$ 。由于 P_{ref} 与制动产生的反向能量相等,而实际注入能量的过程中, $P_{\text{grid_unit}}$ 会在 P_{ref} 上下波动,其超调过程和稳态误差时间较大时会造成直流电压保护动作。因此,提出了一种越线控制方法,机车缓慢制动过程中实际产生的反向能量为 P_{ref} ,而LMPS向公用电网转移的能量 $P_{\text{ref}}^* > P_{\text{ref}}$,即使在同等控制增益下,最终向公用电网注入的能量 $P_{\text{grid_unit}}^*$ 也会大于 $P_{\text{grid_unit}}$ 。在动态响应过程中,如果实际注入公用电网能量的最小值 $P_{\text{grid_min}}^*$ 仍大于制动产生的能量 P_{ref} ,则功率单元直流侧处于一直向并网模块转移能量的过程。因此,这一控制方法称为超越指令值曲线控制,简称越线控制。

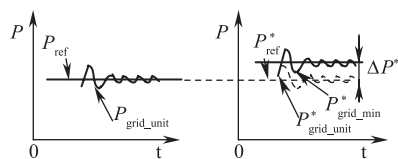


图6 越线控制

Fig. 6 Exceeding reference curve control of LMPS

3 仿真分析

为充分验证本文提出的控制方法的正确性,利用电力系统仿真软件PSIM 9.0搭建了如图1所示的等效仿真模型;为简化控制,仿真级数为5级,制动产生的反向能量采用反向电流源模拟。其他仿真参数如下表所示。

表 仿真电路参数
Tab. Simulation parameter table

器件	名称	型号
变压器	T ₁	10/3 kV, 5 抽头
滤波电感	L	4 mH
滤波电容	C	19 μF
滤波电阻	R	8 Ω
变压器	T ₂	10 kV/25/1 kV

图7展示了三态电压供电及其转换控制过程。0.2 s之前,LMPS工作在25 kV供电状态;0.2~0.4 s转为19 kV供电;0.4~0.6 s转为29 kV供电;0.6 s之后,LMPS恢复到25 kV供电状态。特别在0.2 s、0.4 s和0.6 s时刻发生电压转换,转换控制过程中电压过渡顺畅。

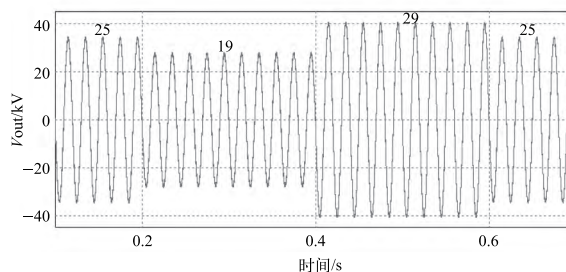


图7 三态电压供电及转换控制

Fig. 7 Three state voltage power supply & conversion control

图8展示了检修过程中LMPS的能量控制过程。0.16 s机车开始产生反向能量 P_2 约500 kW, P_3 为并网模块向低压电网注入的能量(指令为反向能量的105%), P_1 为LMPS从10 kV的能量。通过前文分析可知 $P_1 \approx P_3 - P_2$,而通过仿真可知, P_1 一直处于大于0状态,即并网模块向低压电网注入的能量始终大于检修过程中机车产生的反向能量,因此反向能量不会对LMPS及10 kV侧产生影响。 P_s 表示低压电源供给负载的有功, P_L 为低压负载所需的有功能量约700 kW;当反向能量产生时,并网模块迅速将能量转移到低压侧,低压电源供给的能量迅速从700 kW减小到约200 kW。

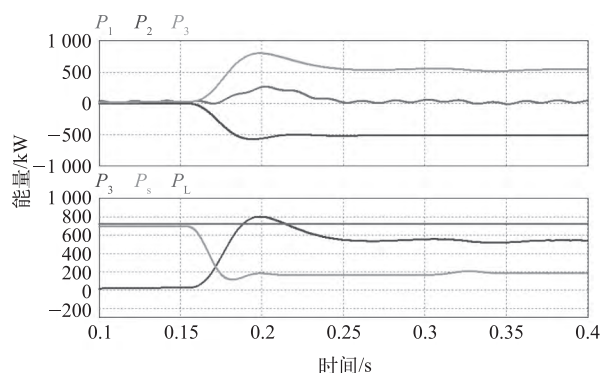


图8 反向能量流控制

Fig. 8 Reverse power flow control of LMPS

4 结束语

本文针对机车检修电源存在的问题提出了一种LMPS方案,该方案具有接入方便、灵活的特点,不会对既有输入侧电源造成不对称等电能质量问题,还能模拟机车运行中的各种工况。通过三态供电策略实现不同工况电压的输出,利用越线控制解决了机车反向能量注入问题。本文通过理论分析、数学演算以及仿真结果,证明了所提出的LMPS方案及控制策略具有可实施性。

参考文献

- [1] 2017年中国铁路建设展望[J]. 铁道学报, 2017, 39(3): 128.
- [2] 周济. 智能制造—“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015(17): 2273-2284.
- [3] 韦皓. 中国高速动车组运用检修状况与发展[J]. 铁道机车车辆, 2017, 37(5): 64-67.
- [4] 林兴鹏. 浅谈高速动车组的检修[J]. 中国科技信息, 2011(6): 219-220.
- [5] 冯树. 电力机车检修业务技术发展研究[J]. 中国设备工程, 2020(8): 140-141.
- [6] 孙彬, 周佳蕾, 黄敏. 35 kV与110 kV电压等级在农网中应用的比较[J]. 科技创新导报, 2017, 14(32): 24, 26.
- [7] 武中, 王志刚, 宋述勇, 等. 电气化铁道牵引变电所对电力系统影响及治理的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊1): 77-82.
- [8] 赵伟, 罗安, 曹一家, 等. 三相-两相牵引变电所用无功动态补偿与谐波治理混合系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 107-114.
- [9] 夏焰坤, 解绍锋, 吴浩, 等. 新型同相供电系统潮流控制器直流侧电压研究[J]. 电气应用, 2013, 32(1): 22-25, 37.
- [10] 单铁铭, 杨仁刚. 不平衡电流无功补偿方法研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 26-29.
- [11] 谢连富, 单铁铭. 不平衡电流无功补偿方法的研究[J]. 继电器, 2006, 34(9): 76-79.
- [12] 徐占军, 谢小展, 徐国强, 等. 高功率密度10 kV防爆高压变频器研制[J]. 电气传动, 2020, 50(4): 109-112.
- [13] 薛皓, 何晋伟, 郭培健. 基于级联H桥变换器的电池储能系统容错控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3418-3428.
- [14] 杨达亮, 张轩, 陈爽, 等. 电网电压畸变下的单相级联H桥变流器无锁相环控制[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 751-757.
- [15] YAO Peng, ZHU Zhiwei. Industrial design and application of a railway electric special power supply[J]. Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 317-328.

作者简介

朱志伟(1975—), 男, 工程师, 目前主要从事电力电子控制技术、智能电网与节能技术的研究开发与管理工作。

(收稿日期: 2021-05-07)

基于熵权理论和PSO-DE算法的含DG配电网重构 P1

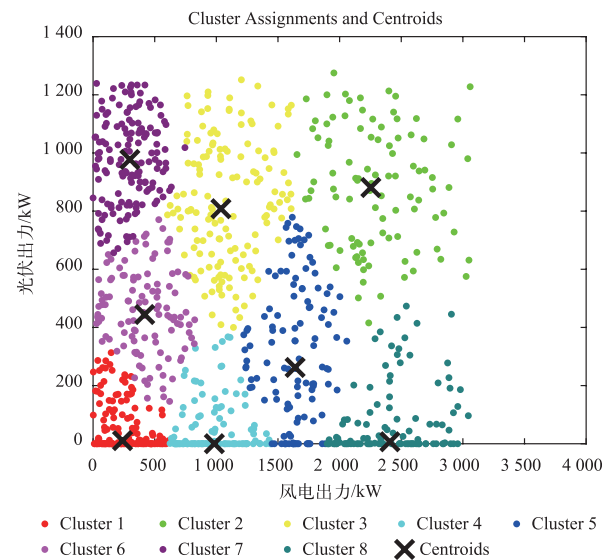


图 4 聚类结果与聚类中心

一种铁路机车检修电源研究 P9

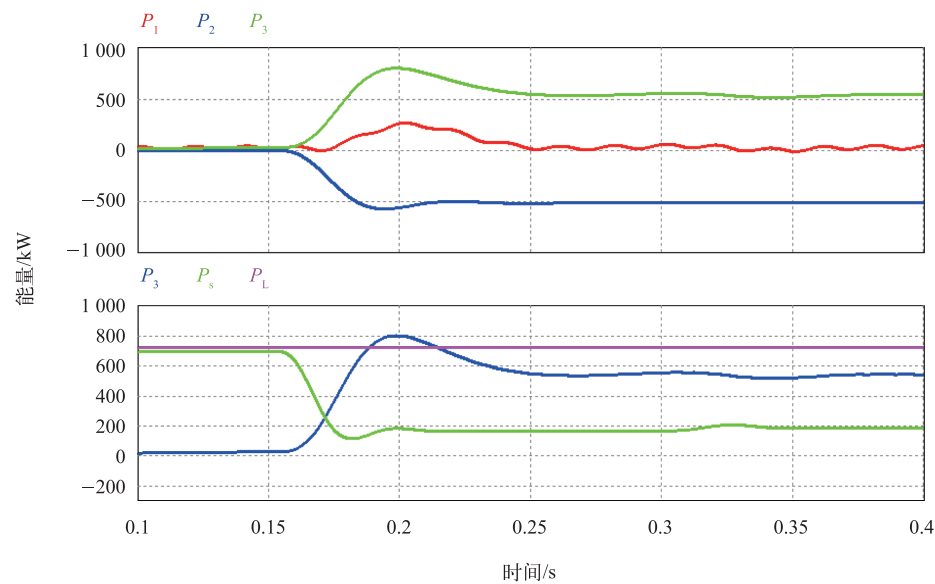


图 8 反向能量流控制