

电力与传动控制

电气化铁路牵引变电所输出功率灵活调控分析

郝佐霖¹, 许根才¹, 吴丽然², 胡亮¹

(1. 神华新朔铁路有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300; 2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 电气化铁路接触网采用单相单边供电方式, 向每个供电区间供电的变压器绕组供电容量固定, 且难以相互支援。文章提出一种采用平衡供电技术调节牵引变电所输出功率的方法, 其通过大功率交直交变流器将相邻供电区间连通, 使供电臂冲击性负荷峰值降低 20%~40%, 实现了牵引变电所输出功率的灵活调节, 保障了供电能力与供电安全。

关键词: 功率调控; 牵引网; 末端电压; 电压损失; 平衡供电技术; 牵引变电所

中图分类号: U223.5

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2020)06-0050-04

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2020.06.009

Analysis of Flexible Output Power Adjustment for Traction Substation in Electrified Railway

HAO Zuolin¹, XU Gencai¹, WU Liran², HU Liang¹

(1. Shenhua Xinshuo Railway Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The catenary of electrified railway adopts single-phase single-side power supply mode, the power supply capacity of transformer winding supplying power to each power supply section is fixed, and it is difficult to support each other between power supply sections. This paper proposed a method to adjust output power of traction substation by balanced power supply technology. It connects adjacent power supply sections by high-power AC-DC-AC converter and reduces 20% to 40% of the peak value of impact load on each power supply arm. The proposed method realizes flexible output power adjustment in the traction substation, and ensures power supply capacity and security.

Keywords: power adjustment; traction network; terminal voltage; voltage loss; balanced power supply technology; traction substation

0 引言

近些年, 我国电气化铁路得到快速发展, 尤其是高速铁路、重载铁路发展迅速, 促进了国民经济发展^[1]。电气化铁路中的牵引负荷作为大功率单相负荷, 具有不对称供电、波动性大等特点, 所引起的谐波、无功、负序给电气化铁路及电力网带来不利的影响^[2-3]。这些问题的产生都与牵引网的供电能力或供电容量有关, 即与供电制式有关。我国电气化铁路接触网采用单相单边供电方式, 通过牵引变压器使电网三相电降压, 变为适合

电力机车或动车组负荷的单相电, 且通常在变电所馈线出口处及两牵引变电所之间的分区所(供电臂末端)设置电分相装置^[4-5]。

随着铁路运载量逐年增加, 牵引网供电能力与性能越来越受到大家的关注^[6]。日本学者于 1993 年提出铁路功率调节器(railway power conditioner, RPC), 其通过在牵引变压器两绕组间增设交直交变流器来抑制负序电流, 从而提高了电能质量^[7-8]; 但 RPC 未解决大负荷下的供电能力问题, 即对供电能力提升效果不佳。文献[9-12]对 RPC 的基本功能原理、拓扑结构、控制方法等作了相关阐述, 但多以治理负序为主要目标, 未考虑到 RPC 对供电能力的影响。

收稿日期: 2020-05-03

作者简介: 郝佐霖(1984—), 男, 工程师, 主要从事铁路牵引供电及科技信息工作。

针对上述问题,本文首先介绍了以RPC为主的牵引变电所平衡供电原理,然后针对变电所两臂负荷不均 衡及变压器容量不能被高效利用的问题,提出一种采用 平衡供电技术调节输出能力的方法。其实时检测两个供 电臂的负荷水平,当某一供电臂负载较大时,通过RPC 从轻载供电臂吸收能量,向重载供电臂释放能量,从而 实现相邻供电臂负荷的动态削峰填谷。该方法可被等效 视为是从牵引变压器两输出绕组共同向某一供电臂输出 电能,从而达到提升供电能力的目的,其可为我国电气 化铁路牵引供电的高效、安全运行提供参考。

1 变电所平衡供电

1.1 供电系统结构

电气化铁路从公用电网接受电能,通过牵引变电所的 变压器将电能从三相 110 kV (或 220 kV, 330 kV) 变换成单相 27.5 kV 或 2×27.5 kV (AT 供电),并向 铁路上、下行两个方向的牵引网供电^[13-14]。基于变电所 平衡供电技术,通过在变电所增设平衡供电装置(即 RPC)来实现牵引能量的灵活调度,电气化铁路牵引供 电系统结构如图 1 所示。其中, I_{Ta} , I_{Tb} 为牵引变压器向 两供电臂的输出电流; I_{La} , I_{Lb} 分别为两供电臂的负载电 流; I_{ca} , I_{cb} 为平衡供电装置的两端输入电流; RPC 主要 由单相变压器 (T_a , T_b) 和交直交变流器构成。

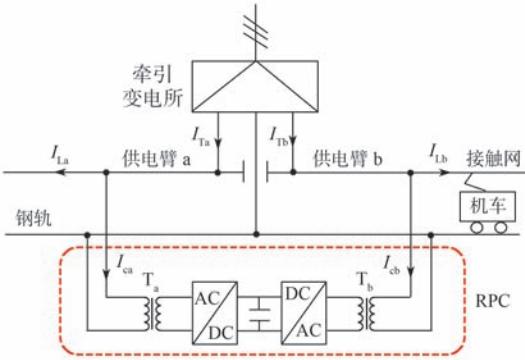


图 1 变电所平衡供电系统
Fig. 1 Balanced power supply system in substation

平衡供电装置中的交直交变流器可采用多种拓扑 形式,图 2 为典型的两电平变流器结构,此外还可以 采用三电平变流器、模块化多电平变流器等。平衡供 电装置实时采集两臂负荷,实现两供电臂能量的双向

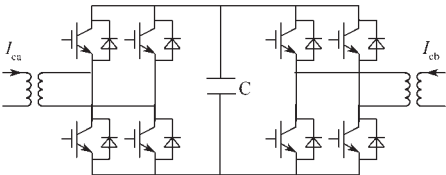


图 2 两电平平衡供电装置示意
Fig. 2 Diagram of two-level balanced power supply device

流动,既可以抑制系统负序和无功,也可以均衡两臂 负荷,实现牵引变压器容量利用率的提升,即等效提 升供电能力。

1.2 工作原理

变电所平衡供电装置两台变压器分别连接至两个供 电臂,通过采集供电臂电压和负荷电流,计算得到交直 交变流器的补偿电流,再经过电压、电流双闭环控制, 实现对两臂有功功率、无功功率的灵活控制(图 3)。 其中,电压和电流控制器一般选用传统的 PI 控制器、 PR 控制器等。

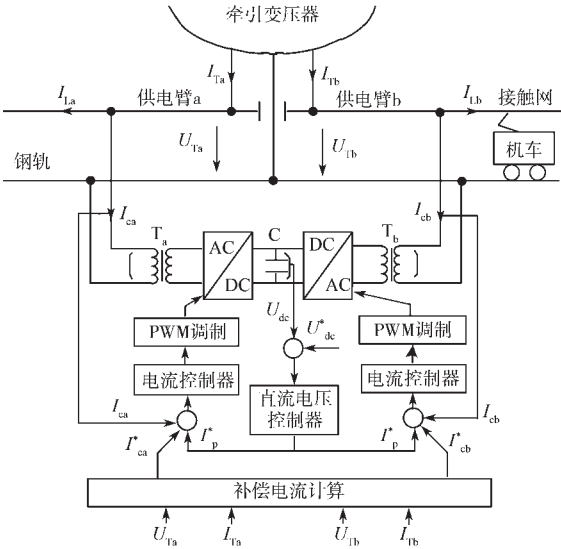


图 3 控制系统框图
Fig. 3 Block diagram of the control system

平衡供电用于抑制负序电流,其工作原理与牵引变 压器的连接形式有关。以 V/v 接线变压器为例,若仅 供电臂 a 带负载电流 I_{La} ,则此时高压侧 B 相空载(即 $I_B=0$),负序较严重,如图 4 (a) 所示。采用平衡供电 装置后,将从空载或轻载供电臂向重载供电臂转移有 功电流 ΔI ,输出一定无功电流 I_q ,即可实现牵引变 压器输出电流大小相等 ($I_{Ta}=I_{Tb}$) 以及电网侧三相负 荷对称,如图 4 (b) 所示。

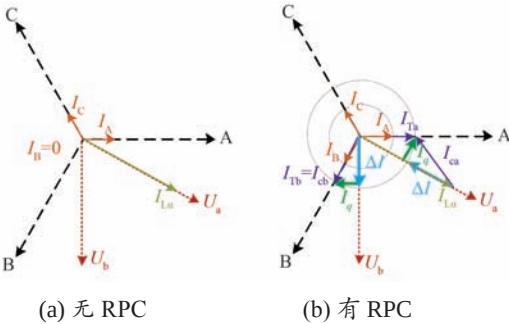


图 4 平衡供电系统采用 V/v 牵引变压器时的 工作原理矢量图
Fig. 4 Working principle vector diagram of the balanced power supply system with V/v traction transformer

2 输出功率调控策略

相邻供电臂独立供电,且受车辆数量、载重量及线路坡道等因素影响,每个供电臂的负荷分布不相同,分别为该供电臂所有负载之和,如式(1)和图5所示。如图6所示,在实际运行中经常在同一时间出现为一个供电臂空载、另一个供电臂带载(工况1),或一个供电臂轻载、另一供电臂重载(工况2)。通常,牵引变压器被按照最大负荷设计容量,且两绕组之间不能相互支援,造成牵引变压器单个绕组容量配置偏大而整体容量经常不能被充分利用。

$$\left. \begin{aligned} I_{La} &= \sum_{i=1}^m I_{Lai} \\ I_{Lb} &= \sum_{i=1}^n I_{Lbi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

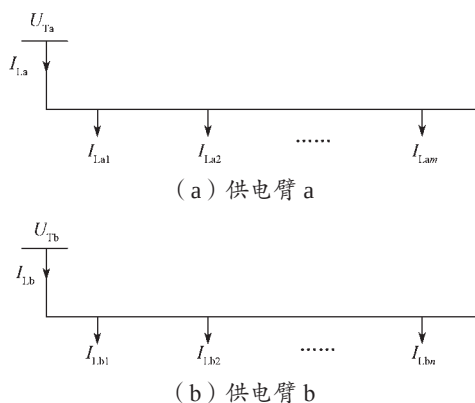


图5 相邻供电臂负荷分布

Fig. 5 Load distribution of adjacent power supply arms

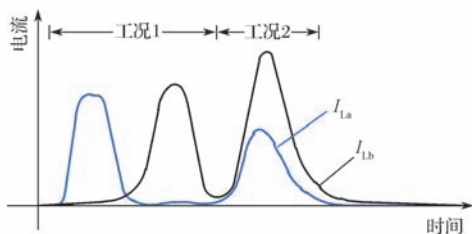


图6 相邻供电臂典型负荷

Fig. 6 Typical load of adjacent power supply arms

若采用变电所平衡供电装置实现牵引变压器输出功率的灵活调控,则需根据两臂负荷计算得到两臂功率,由此决定平衡供电装置两侧输出电流。定义影响因子 λ ,具体如式(2)所示。

$$\lambda = \begin{cases} 1, & P_a \geq P_{lim} \text{ 或 } P_b \geq P_{lim} \\ 0, & P_a < P_{lim} \text{ 且 } P_b < P_{lim} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_a 、 P_b ——供电臂a和供电臂b的功率; P_{lim} ——功率限制。

功率限制 P_{lim} 的选取较灵活,一般根据两供电臂负荷大小确定,原则是大于两臂轻载负荷且小于重载负荷,如选择为重载功率的20%~40%。

当影响因子 λ 为1,即某一供电臂功率大于限值时,平衡供电装置按照一定能力转移负荷,即由轻载臂吸收能量,向重载臂馈出能量,实现有功功率转移;否则,平衡供电装置空载运行,输入和输出功率均为0。

如图7所示,根据牵引变电所两个供电臂的母线电压(U_{Ta} 、 U_{Tb})、负荷电流(I_{Ta} 、 I_{Tb})和功率因数($\cos\varphi_a$ 、 $\cos\varphi_b$),可计算出两供电臂的实时功率,如式(3)所示。

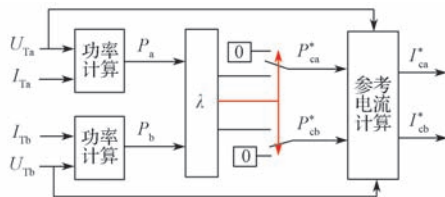


图7 平衡供电装置输出参考电流
Fig. 7 Output reference current of the balanced power supply device

$$\left. \begin{aligned} P_a &= U_{Ta} I_{Ta} \cos\varphi_a \\ P_b &= U_{Tb} I_{Tb} \cos\varphi_b \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(2)计算影响因子,当 $\lambda=0$ 时,认为两臂负荷都很小,平衡供电装置空载运行;当 $\lambda=1$ 时,平衡供电装置调节输出功率,实现由轻载臂向重载臂供电的功能,此时功率参考值如式(4)所示。

$$\left. \begin{aligned} P_{ca}^* &= \frac{P_b - P_a}{2} \\ P_{cb}^* &= \frac{P_a - P_b}{2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: P_{ca}^* ——平衡供电装置在供电臂a侧的输入功率参考值; P_{cb}^* ——平衡供电装置在供电臂b侧的输入功率参考值。

3 算例分析

为了验证本文方案,以某高速铁路为例进行分析,其两供电臂牵引电流如图8所示。可以看出,在同一时刻两臂电流差异性很大,经常表现为一臂空载、一臂带载,或一臂轻载、一臂重载。

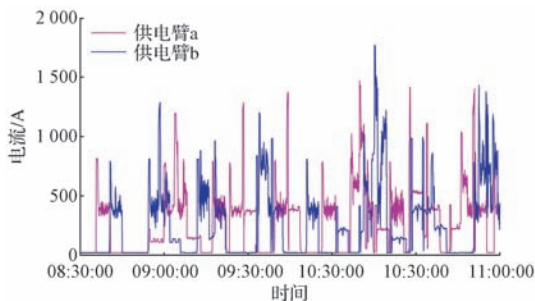


图8 两供电臂负荷电流

Fig. 8 Load currents of adjacent power supply arms

设定功率限制 P_{lim} 为12.4 MW,等效电流限值为450 A,采用变电所平衡供电装置实现两臂功率平衡后,

两臂负荷情况如图 9 所示。可以看出，采用变电所平衡供电装置后，两供电臂冲击负荷峰值降低 20%~40%，尤其是在原负荷电流较大工况下，效果更明显，且两臂负荷基本相同。

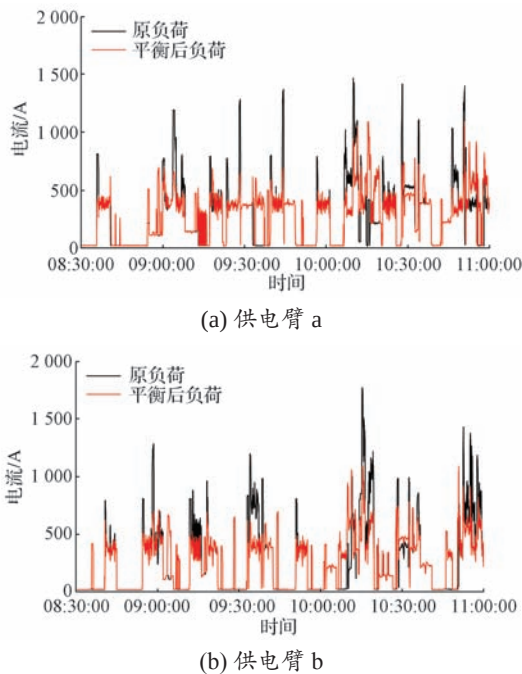


图 9 采用平衡供电装置前后供电臂电流
Fig. 9 Currents of power supply arms with and without the balanced power supply device

4 结语

针对电气化铁路牵引供电容量利用率低的问题，本文分析了变电所平衡供电技术的实现方式、功能原理，提出一种采用平衡供电技术调节牵引变电所输出功率的方法。通过采用此平衡供电技术，可以均衡两臂负荷，实现输出功率灵活调控，在负载不变的条件下可以降低

变压器最大容量需求，对提高牵引供电能力具有重要意义。后续将研究平衡供电装置供电能力提升和供电品质提升的协调控制，实现多目标的最优控制，充分发挥该装置灵活调控功率的能力。

参考文献：

[1] 夏晶晶. 高速铁路对城市经济发展影响研究 [J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(11): 7-13.

[2] 周丹丹. 铁道牵引供电系统电能质量控制的研究及仿真 [D]. 上海: 同济大学, 2008.

[3] 吴传平, 罗安, 孙娟, 等. 一种电气化铁路电能质量综合补偿系统 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 68-76.

[4] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.

[5] 冯文杰. 一种应用于供电臂末端的铁路功率调节装置及其控制 [J]. 控制与信息技术, 2019(3): 32-36.

[6] 邓云川, 刘志刚, 黄可, 等. 直接带回流线供电方式的牵引网综合载流能力计算研究 [J]. 铁道学报, 2018, 40(12): 13-21.

[7] 兔束哲夫. 电压不平衡补偿装置 [J]. 铁道技术, 2009, 3(58): 34-35.

[8] MOCHINAGA Y, HISAMIZU Y, TAKEDA M, et al. Static power conditioner using GTO converters for AC electric railway[C] // Power Conversion Conference. Yokohama, 1993: 641-646.

[9] 皮俊波, 姜齐荣, 魏应冬. 一种基于链式结构 UPQC 的电气化铁路同相供电方案研究 [J]. 电力设备, 2008, 9(10): 4-9.

[10] 马茜, 郭昕, 罗培, 等. 基于超级电容储能的新型铁路功率调节器协调控制策略设计 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 765-776.

[11] 马伏军, 罗安, 吴传平, 等. V/V 牵引供电系统中铁路功率调节器的控制方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 63-70.

[12] ZHANG D H, ZHANG Z X, WANG W A, et al. Negative Sequence Current Optimizing Control Based on Railway Static Power Conditioner in V/v Traction Power Supply System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 200-212.

[13] 谭秀炳, 刘向阳. 交流电气化铁道牵引供电系统 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2002.

[14] 张小瑜, 吴俊勇. 电气化铁路接入电力系统的电压等级问题 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 12-17.

(上接第 13 页)

[6] HU X, WU L, HU C, et al. Fuzzy guaranteed cost tracking control for a flexible air-breathing hypersonic vehicle[J]. IET Control Theory and Applications, 2012, 6(9): 1238-1249.

[7] AHN C K. Receding horizon disturbance attenuation for Takagi-Sugeno fuzzy switched dynamic neural networks[J]. Information Sciences, 2014, 280: 53-63.

[8] 肖建, 赵涛. T-S 模糊控制综述与展望 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(3): 462-474.

[9] WANG X, TANG T. Optimal operation of high-speed train based on fuzzy model predictive control[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(3): 1-14.

[10] YASUNOBU S, MIYAMOTO S, IHARA H. Fuzzy Control for Automatic Train Operation[J]. China J Railway Soc, 2003, 25(2): 98-102.

[11] DONG H R, NING B, CAI B G, et al. Automatic Train Control System Development and Simulation for High-speed Railways[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2010, 10(2): 6-18.

[12] 杜凯冰, 张征方, 文字良. 重载货运列车自动驾驶控制技术研究 [J]. 控制与信息技术, 2020(2): 34-38.

[13] LI S, LI K, RAJAMANI R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 556-566.

[14] 张向南, 赵津, 王广玮. 智能车油门与制动协调切换控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2010(10): 112-115.

[15] LIU D, XIONG J. Adaptive Cruise Control System: Comparing LQ and MP Controllers[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015(1), 713-715:833-836.

[16] PRECUP R E, TOMESCU M L, PREITL, et al. Stability analysis and design of a class of MIMO fuzzy control systems[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems Applications in Engineering & Technology, 2013, 25(1): 145-155.

[17] ZHAO Y, GAO H J and CHEN T. Fuzzy constrained predictive control of non-linear systems with packet dropouts [J]. IET Control Theory & Applications, 2010, 4(9): 1665-1677.