

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.004

铁路牵引站并网协调技术研究

刘通¹, 杨银国¹, 钱峰¹, 许峰², 郭安琪²

(1. 广东电网公司电力调度控制中心, 广州 510600; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 近年来, 我国电气化铁路快速发展, 铁路牵引站数量不断增加。为了加强铁路牵引站的供电可靠性, 减少牵引站接入对电力系统产生的不良影响, 文章结合电气化铁路的负荷特性, 分析其影响及解决措施。同时, 梳理目前铁路牵引站存在的隐患及原因, 研究电气化铁路供电的安全性和稳定性, 最后针对牵引站的并网协调运行, 对一、二次设备提出优化的建议, 可为牵引站的接入和配置提供规划指导。

关键词: 铁路牵引站; 负荷特性; 安全稳定性; 并网协调

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)04-0019-04

Research on Grid Connected Coordination Technology of Railway Traction Station

LIU Tong¹, YANG Yinguo¹, QIAN Feng¹, XU Feng², GUO Anqi²

(1. Power Dispatching Control Center of Guangdong Electric Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In recent years, electrified railway has been developed rapidly in China and the number of railway traction station has been increasing constantly. In order to strengthen the reliability of railway traction station and reduce the adverse effects made by power system access of traction station, this article combined the load characteristics of electrified railway, analyzed its impact and solutions. Furthermore, we study current hidden problems and their causes of the railway traction station, then researched the safety and stability of the electrified railway power supply. Finally, some suggestions on optimization of the primary equipment and secondary equipment are proposed for coordinated operation of the traction station, which can provide planning guidance for access and configuration of traction station.

Key words: railway traction station; load characteristic; safety stability; grid connected coordination

自2002年哈大铁路首次采用220 kV电压等级以来, 我国铁路列车向着电气化、高速化方向持续发展, 铁路牵引站功率逐渐增大。“十三五”期间, 加强城市间的交通网络仍是我国轨道交通发展的重点。然而, 电气化铁路牵引站作为重要的电力负荷类型, 其特殊的负荷特性降低了电能

质量, 对电力系统可靠性产生了不良影响。随着铁路对电力供应的依赖日益上升, 由于局部电网自身结构薄弱、核心区域对用户电能质量的高要求等系列问题, 电网的供电电气化铁路的安全性和可靠性难度加大^[1]。

1 牵引站的负荷特性及影响

1.1 牵引站的负荷特性

列车负荷与牵引重量、运行速度、线路坡度及铁路运输组织关系等因素有关, 使得铁路牵引站负荷具有以下特性:

1) 冲击性大。牵引变电所为两侧单相供电, 其

收稿日期: 2017-10-02

基金项目: 中国能建广东院科技项目: 铁路牵引站并网协调配合技术研究项目(XZ09241)

作者简介: 刘通(1985), 男, 满族, 辽宁岫岩人, 工程师, 硕士, 主要从事电网新设备并网及安全监督管理工作(e-mail) 462129569@qq.com。

负荷的大小与供电区间运行的列车数量、铁路线路坡度以及列车运行的速度等因素有关。这些因素造成列车数量及每一列车的负荷随时变化,使牵引变电所的负荷呈现波动性^[2]。

2) 两供电臂负荷不均衡。牵引变电所的负荷随着两供电臂内列车数量以及列车负荷而变化。如在节假日、铁路故障后恢复行车时会出现列车紧密追踪情况下,牵引变电所会出现负荷高正值。

3) 负荷率低。牵引变电所的负荷是由铁路运量、列车速度、线路条件等因素决定的。列车运行时的受流状态随时都在发生变化,其平均负荷较低。但牵引变电所的供电能力必须适应短时出现的高峰负荷的需要。所以,牵引变电所的负荷率很低,一般不超过20%,个别达到30%。

4) 负序电流大。由于机车为单相负荷,无论牵引变压器采取何种结线方式,都将向系统注入较大负序电流,造成系统的三相电压不平衡^[3]。

典型牵引所负荷曲线(24 h)如图1所示。

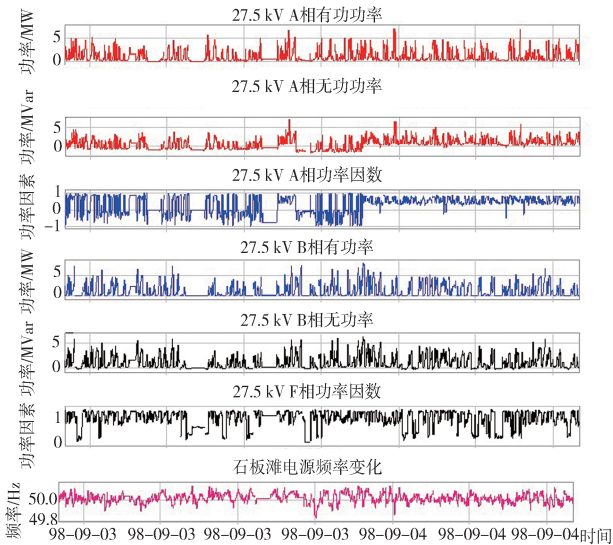


图1 典型牵引所负荷曲线

Fig. 1 Typical load curve of traction station

此外,牵引负荷是感性负荷,对于传统型电力机车,平均功率因数较低,只有0.80~0.85。同时,牵引负荷是一个谐波源,对于传统型电力机车,3次、5次、7次谐波含量较高,对于新型交直交型机车和动车组,也存在一定的高次谐波,在满足一定的负荷条件下,会在系统中产生高次谐振现象^[4]。传统型电力机车的谐波电流含有率($I_n/I_1 \times 100\%$)情况如表1所示。

1.2 牵引站对电能质量的影响

根据电力系统短路容量、牵引网供电方式、牵引变压器及机车类型的不同,牵引供电系统会对电网的电能质量产生不同程度的影响。

表1 传统型电力机车的谐波电流含有率

Tab. 1 Harmonic current rate of traditional electric locomotives

型号	3次	5次	7次	9次	11次
SS ₄	18	8	5	2.39	1.97
SS _{6B}	18.1	6.85	2.59	1.44	1.1
SS ₉	17.6	6.6	2.3	1.4	1.13

牵引负荷所产生的负序电流无法避免,只能通过采取措施减少负序电流。且负序电流与电力系统容量有关,电网越强则负序电流影响越小。

传统电力机车平均功率因数较低,仅有0.80~0.85。新型交直交型机车和动车组采用四象限脉冲整流器的交直交传动技术,功率因数较高,满功率运行时接近1.0。

传统电力机车由于采用相控整流,低次谐波含量较高。新型交直交型机车和动车组采用四象限变流器,虽然消除了低次谐波的影响,但也产生了不可忽略的高次谐波,使得牵引供电系统中的谐波次数升高^[5]。我国电气化铁路存在各种机车混跑的情况,导致牵引供电系统中谐波频带分布广泛,大大增加了系统谐振的可能性。

1.3 电能质量问题的解决措施

为解决牵引站并网引起的电能质量问题,在牵引站应选择短路容量大的接入点,且应合理选择接入电压等级;同时,牵引站可采取轮换相序接入、平衡供电臂负荷、优化变压器结线型式等措施抑制负序电流;采取加装补充装置、发展交直交型机车等措施提高功率因数;采取加装滤波器、加装 SVC、SVG,发展交直交机车等措施抑制谐波^[6-7]。

2 牵引站存在的问题及影响

目前铁路牵引站在设计、调试和运行等环节存在诸多问题,如保护和测量设备安装和调试错误,致使线路存在误动作风险;部分二次设备配置不满足相关电力规程要求,当单一电源设备发生故障时,会导致牵引站至调度机构自动化信息中断;牵引站未配置专用的故障录波器和保信子站,致使发

表 2 铁路牵引站存在的隐患问题

Tab. 2 Hidden problems of railway traction station

隐患类型	隐患描述	隐患级别	存在风险	标准要求
继电保护配置	无光差保护	重大	无法实现全线故障的快速切除	配置全线速动纵联保护
	有光差保护但未投入	重大		投入全线速动纵联保护
设备命名	设备标识有编号无名称	一般	存在走错间隔的风险	采用名称、编号双重标识
	需核实线路侧有没有 PT0 地刀	一般	铁路方不掌握现场情况的安全隐患	图实相符
自动化系统配置	一路远动通道中断	一般	单通道故障则自动化信息中断	应配置不同路由的自动化双通道
	调度自动化无实时数据采集链路	重大	调度员无法实时监视牵引站的运行情况	变电站自动化信息应传送相关调度机构

生故障时牵引站侧无法录波, 不利于保护管理和事故分析等。在继电保护配置、设备命名、自动化系统配置方面, 存在的主要问题及风险分析如表 2 所示。

若牵引站供电线路不配置光差保护, 在线路末端发生故障时, 无法实现快速切除, 从而引发直流换相失败甚至双极闭锁, 进而导致局部系统稳定破坏等问题。此外, 还会加剧低压脱扣现象, 进而损失大量系统负荷。如果被迫采取了将距离和零序(和流)保护时间缩短的临时措施, 又会导致一系列新的风险, 如牵引变故障时线路保护失去选择性跳闸等。

现场一次接线与调度命名不符、设备有编号而无名称等问题, 可能造成误调度、误操作, 造成人身、电网、设备事故, 直接影响铁路正常运行, 影响电网及牵引站的安全运行, 并导致安全事故。

牵引站未按要求配置双通道, 将导致单通道故障则自动化信息中断的风险。此外, 自动化系统配置隐患问题还将严重影响调度员对牵引站的安全监视。

3 牵引站供电线路安全稳定分析

铁路牵引站供电线路故障对电网安全稳定运行的影响主要取决于故障隔离时间, 而故障隔离时间的长短, 主要取决于供电线路所配置的继电保护类型。本文以 2020 年南方电网 10 个 220 kV 牵引站的供电线路单回线路末端三相短路故障为例, 通过计算分析, 得出供电线路不同保护配置情况对电网安全稳定运行的影响^[8-10]。计算结果如表 3 所示。

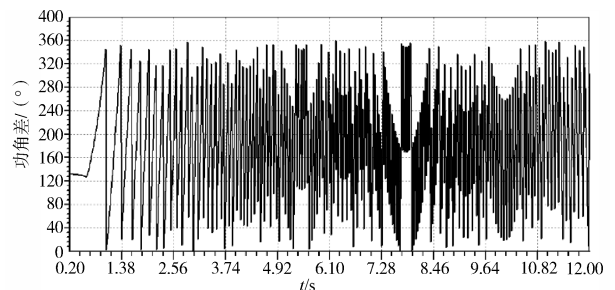
经过稳定计算可以看出, 配置光差保护的情况下供电线路单回末端三相短路故障切除后系统稳

定, 配置距离保护的情况下供电线路单回末端三相短路故障切除后存在系统功角失稳的情况。两个牵引站单回线路末端故障曲线图如图 2 和图 3 所示。

表 3 稳定计算结果

Tab. 3 Stability calculation results

故障牵引站编号	配置光差保护的稳定情况	配置单侧距离保护的稳定情况
1	故障后稳定	故障后稳定
2	故障后稳定	故障后稳定
3	故障后稳定	故障后稳定
4	故障后稳定	故障后稳定
5	故障后稳定	故障后稳定
6	故障后稳定	功角失稳
7	故障后稳定	故障后稳定
8	故障后稳定	故障后稳定
9	故障后稳定	功角失稳
10	故障后稳定	功角失稳

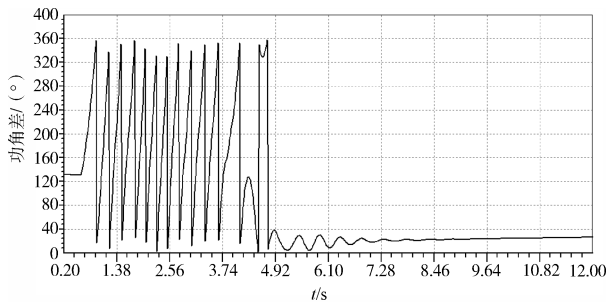


注-监视曲线最大发电机功角差(°)。

图 2 牵引站 1 单回线路末端故障曲线图

Fig. 2 Single circuit terminal fault graph of traction station 1

此外, 交直流混合运行的大电网直流落点多, 220 kV 牵引变电站出线三相故障极有可能导致直流换相失败。如表 4 所示为 2020 年南方电网牵引站供电线路末端三相短路故障引起直流换相失败的计算结果。



注: -监视曲线最大发电机功角差, (°)。

图3 牵引站2单回线路末端故障曲线图

Fig. 3 Single circuit terminal fault graph of traction station 2

表4 2020年换相失败计算结果

Tab. 4 Commutation failure results in 2020

天广直流	高肇直流	兴安直流	普侨直流	牛从直流	滇西北
否	否	否	否	否	否
否	是	否	否	否	否
否	是	否	否	否	否
是	否	否	否	是	否

由此可见,若牵引站供电线路不配置全线速动的光差保护,存在线路末端短路故障切除时间过长,造成局部电网功角失稳的问题。同时,多回直流输电线路落点若线路末端短路故障切除时间过长,会加大近区落点的直流换相失败风险。因此为保障电网安全稳定运行,需确存在局部电网功角失稳的站点,装设全线速动保护。

根据上述计算,220 kV 牵引站供电线路故障应满足快速切除的要求(0.12 s 隔离故障),否则会造成局部电网失稳、直流输电换相失败和大量负荷低压脱扣的风险。然而,在220 kV 牵引站供电线路无纵联保护情况下,距离Ⅱ段等对全线有灵敏度段按装置最小时限整定(0.01 s),以满足220 kV 线路故障快切要求,将导致距离Ⅰ段保护时限深入牵引变低压侧,降低线路供电的可靠性,加剧牵引变压器的损坏。

4 促进牵引站并网协调的建议

1) 一次系统配置

站内配置方面,严格按照国家规定,合理配置无功补偿及滤波装置。外部电源接入方面,建议牵引站接入尽量采用两路独立电源供电;且接入点短路容量需满足电能质量的要求。

2) 继电保护配置

220 kV 牵引供电线路按国家标准配置双重化的全线速动保护(主要包括光纤电流差动保护、纵联距离保护),特别是在经计算配置距离保护存在局部电网功角失稳问题的站点,必须确保配置光纤电流差动保护。110 kV 电铁供电线路一般均为单侧电源线路,且多数为线变串单元接线,可在电源侧配置单侧线路保护。牵引站220 kV 母线应配置母差保护。220 kV 及以上牵引变电站尽量考虑配置故障录波器,或通过其他途径或通道将牵引站综合自动化装置中的故障录波信息传送到电网调度,以便事故分析。若考虑铁路牵引站为用户站,可考虑不配置故障录波装置。

3) 安全自动装置

牵引变电所进线均配置自投装置。

4) 自动化装置配置

在牵引变电站设置远动装置,实现当地电力调度部门对相关遥测遥信量的直采直送功能。并配置相应的二次安全防护设备。

5) 运行管理建议

加强电网公司与铁路总公司的交流,制定建设程序和标准。加强电网公司对铁路电气设备的辅助维护。

5 结论

牵引负荷具有冲击性大、两供电臂负荷不均衡、负荷率低、负序电流大的特点,牵引站应采取轮换相序接入、平衡供电臂负荷、发展交直交型机车、加装滤波器、SVC、SVG 等措施改善牵引负荷特性,减少牵引站对电力系统产生的不良影响。

目前,电气化铁路的运营存在许多重大隐患,应严格实施铁路设计规程和运行准则,避免隐患问题造成严重后果。此外,铁路牵引站的安全稳定计算结果表明,为保障电网安全稳定运行,需确存在局部电网功角失稳的站点,装设全线速动保护。

参考文献:

- [1] 庞爱莉. 电气化铁路虹桥牵引站的供电方案分析[J]. 电力与能源, 2011, 32(4): 306-308.
PANG A L. Analysis of Hongqiao traction station power supply scheme [J]. Power and Energy, 2011, 32(4): 306-308.
- [2] 陈明华. 高速铁路牵引站外部电源接入设计相关问题的研究[J]. 企业科技与发展, 2012(5): 14-16.

(下转第33页 Continued on Page 33)

太阳能热发电厂参考^[8]。

5)由以上计算方法可见,太阳能热发电厂的厂用电率需要以代表年太阳辐照值为输入量逐时计算,计算量很大,应编制相应计算机软件以简化计算过程。

参考文献:

- [1] 杨圣春,项棵林,杨帆.我国太阳能热发电产业现状与展望[J].中外能源,2017,22(6):19-22.
YANG S C, XIANG K L, YANG F. Current situation and prospect of solar thermal power generation industry in China [J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(6): 19-22.
- [2] 杨静.光热发电技术标准的发展动态研究[J].机械制造,2016,54(12):70-72.
YANG J. Development trends of technical standards for solar thermal power generation [J]. Machinery, 2016, 54(12): 70-72.
- [3] 电力规划设计总院.火力发电厂厂用电设计技术规程:DL/T 5153—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
Electrical Planning and Design Institute. Technical code for the design of auxiliary power system of fossil-fired power plant: DL/T 5153—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [4] 吴仕宏,陈泽,吴佳文.太阳能光热集热系统的研究与分析[J].中国农机化学报,2016,37(1):223-226.
WU S H, CHEN Z, WU J W. Research and analysis of solar

- thermal energy heat collection system [J]. China Agricultural Chemical Journal, 2016, 37(1): 223-226.
- [5] 王金平,王军,冯炜,等.槽式太阳能跟踪控制系统的研制及应用[J].农业工程学报,2015,31(2):45-51.
WANG J P, WANG J, FENG W, et al. Development and application of sun-tracking control system for parabolic trough solar collector [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 45-51.
- [6] 汪奇,俞红啸,张慧芬.熔盐和导热油蓄热储能技术在光热发电中的应用研究[J].工业炉,2016,38(3):34-38.
WANG Q, YU H X, ZHANG H F. Application research of molten salt and heat conduction oil regenerative energy storage technology in solar-thermal power generation [J]. Industrial Furnace, 2016, 38(3): 34-38.
- [7] 林幼晖.浅析海外电力总承包项目的厂用电量计算方法[J].南方能源建设,2015,2(3):131-135.
LIN Y H. Analysis of calculation method of auxiliary power consumption for oversea power plant project [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 131-135.
- [8] 徐二树,胡忠良,翟融融,等.塔式太阳能热电站系统仿真与焓分析[J].中国电机工程学报,2014,34(11):1879-1806.
XU E S, HU Z L, ZHAI R R, et al. Simulation and exergy analysis of solar thermal tower plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(11): 1879-1806.

(责任编辑 张春文)

(上接第22页 Continued from Page 22)

- CHEN M H. Research on problems of the exterior power connection design of high-speed railway traction substation [J]. Enterprise Science and Technology & Development, 2012(5): 14-16.
- [3] 张华,熊继锋,王虎,等.浙赣铁路电气化牵引站负序电流及谐波对江西电网的影响[J].江西能源,2005(2):2-5+8.
ZHANG H, XIONG J F, WANG H, et al. Influence of Zhejiang-Jiangxi electric railroad traction station's negative sequence current and harmonic wave on Jiangxi power system [J]. Jiangxi Energy, 2005(2): 2-5+8.
- [4] 黄石柱,李建华,赵娟,等.电气化铁路牵引变电所概率谐波电流的仿真计算[J].电力系统自动化,2002,26(5):26-31.
HUANG S Z, LI J H, ZHAO J, et al. Simulation for probabilistic harmonic currents of electrical railway traction substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5): 26-31.
- [5] 肖湘宁,徐永海.电力系统谐波及其综合治理[J].中国电力,1998(4):59-61.
XIAO X N, XU Y H. Problems and comprehensive control of power system harmonics [J]. Electric Power, 1998(4): 59-61.
- [6] 韩柳,谈顺涛.电气化铁路对电网的影响及对策[J].江苏电机工程,2005,24(3):8-11.

- HAN L, TAN S T. Power system operation affected by electrification railway and its improvement [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24(3): 8-11.
- [7] 贾善杰,赵义术,官兵,等.胶济线电气化铁路对山东电网电能质量的影响[J].电网技术,2006(增刊1):17-22.
JIA S J, ZHAO Y S, GONG B, et al. Influence of Jiaoji electric railway to power quality of Shandong grid [J]. Power System Technology, 2006(Supp. 1): 17-22.
- [8] 陈薇.牵引变电所的外特性及其在继电保护中的应用[J].继电器,2000,28(2):28-32.
CHEN W. The theory of external performance of traction substation and its appliance in relay protection [J]. Relay, 2000, 28(2): 28-32.
- [9] 薛艳霞,任社宜.电气化铁路牵引站供电线路保护定值整定问题探讨[J].电力技术,2010,19(3):67-72.
XUE Y X, REN S Y. Discussion of protection setting adjustment for power supply line of electrified railway traction station [J]. Electric Power Technology, 2010, 19(3): 67-72.
- [10] 陈星.浅谈电气化铁路牵引站对继电保护的影响[J].华东交通大学学报,2008,25(1):53-56.
CHEN X. Relay Protection Affected by Traction Substation [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2008, 25(1): 53-56.

(责任编辑 黄肇和)