

组合式同相供电设备工作原理及保护研究

郭培健^{1,4}, 嵇世卿², 刘娟^{1,4}, 何晋伟³, 白洋^{1,4}, 郭岩⁵

(1. 电气传动国家工程研究中心, 天津 300180; 2. 深圳市宝安任达电器实业有限公司, 广东 深圳 518108; 3. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 4. 天津天传电控设备检测有限公司, 天津 300180; 5. 空军装备部驻沈阳地区第一军事代表室, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 由于牵引供电系统的结构和负荷的特殊性, 三相供电系统会发生严重不平衡, 制约了高速、重载铁路的发展。详细介绍了一种单-三相组合式同相供电系统的结构, 该系统不仅能够从根本上改善电能质量, 还消除了牵引变电所出口处的电分相环节。首先, 重点分析了其基于两“背靠背”单相变流器的同相供电设备的平衡变换原理; 其次, 分析了交直交变流器、高压匹配变压器、牵引匹配变压器等设备的保护要求, 研究了同相供电设备的继电保护方案, 并简要讨论了整定计算原则。最后采用 Matlab/Simulink 对组合式同相供电系统建立仿真模型。所提出的单-三相组合式供电系统已在沙峪变电所投入试运行, 验证了该系统的可行性。

关键词: 单-三相组合式同相供电系统; 同相供电设备; 继电保护; 仿真分析

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24299

Study on Working Principle and Protection for Combined Co-phase Power Supply Equipment

GUO Peijian^{1,4}, JI Shiqing², LIU Juan^{1,4}, HE Jinwei³, BAI Yang^{1,4}, GUO Yan⁵

(1. National Engineering Research Center for Electrical Transmission, Tianjin 300180, China; 2. Shenzhen Baoan Renda Electrical Appliance Industrial Co., Ltd., Shenzhen 518108, Guangdong, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. Tianjin Tianchuan Electric Control Equipment Test Co., Ltd., Tianjin 300180, China; 5. First Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Shenyang, Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract: Due to the special characteristics of the structure and load of the traction power supply system, serious imbalances can occur in the three-phase power supply system, which restricts the development of high-speed, heavy-haul railways. The structure of a single-three-phase combined co-phase power supply system was introduced in detail. The system can not only radically improve power quality, but also eliminates the electrical splitting link at the exit of the traction substation. Firstly, the balance transformation principle of co-phase power supply equipment based on two “back-to-back” single-phase converters was analyzed. Secondly, the protection requirements of AC-DC-AC converter, high voltage matching transformer and traction matching transformer were analyzed, the relay protection scheme of co-phase power supply equipment was studied, and the setting calculation principle was briefly discussed. Finally, Matlab/Simulink was used to establish the simulation model of the combined co-phase power supply system. The proposed single-three-phase combined power supply system has been put into trial operation at the Sha Bath substation to verify the feasibility of the system.

Key words: single-three-phase combined co-phase power supply system; co-phase supply equipment; relay protection scheme; simulation analysis

目前, 许多国家的远距离电气化铁路使用 27.5 kV 单相交流电源。由于这种牵引供电系统

结构和负荷的特殊性, 电力机车在运行中会产生大量的无功功率、谐波、过相和电网电压不平衡

基金项目: 深圳市技术研究开发计划项目(重2020N034); 2021年产业技术基础公共服务平台项目(2021-H028-1-1);

重点装备制造行业碳达峰、碳中和公共服务平台项目(JC2021ZK001)

作者简介: 郭培健(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, Email: guopeijian@tried.com.cn

等问题。同相供电技术是目前最为有效的解决方式之一,其不仅提高了电能质量,还消除了牵引变电所出口处的电分相环节,对重载型和高速型的牵引都具有重大意义。

组合式同相供电系统是李群湛等专家提出的一种新型的供电技术,其中,同相供电设备是组合式同相供电系统实现无功补偿、滤除谐波、平衡变换的核心部分,因此对该设备配置的继电保护至关重要。文献[1]分析了基于潮流变换器的同相供电系统的工作原理,文献[2-4]研究了采用两“背靠背”单相变流器结构的潮流变换器的保护原则与整定计算。结合沙峪变电站的单-三相组合同相供电系统的继电保护要求,本文介绍和分析了同相供电设备保护的理论基础和设置计算原理。

1 单-三相组合同相供电系统简介

1.1 单-三相组合同相供电系统结构

图1示意了电力牵引自耦变压器(auto-transformer, AT)供电方式下,单-三相组合同相供电系统方案。

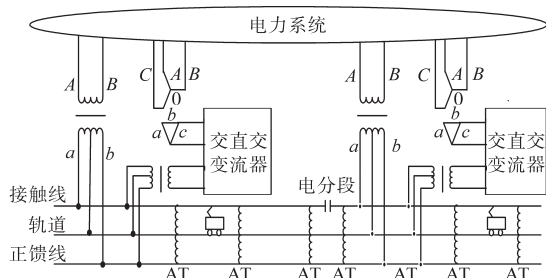


图1 单-三相组合同相供电方案

Fig.1 Single-three-phase combined co-phase power supply scheme

组合式同相供电变电站包括一个单相牵引变压器(traction transformer, TT)和一系列的同相补偿装置(co-phase compensation device, CPD)。CPD包括高压匹配变压器(high voltage matching transformer, HMT)、同相补偿交直交变流器(AD-DC-AC converter, ADA)和牵引匹配变压器(traction matching transformer, TMT)。HMT是基于Ynd11接线方式的三相降压变压器;ADA是由IGBT组成的四象限DC-AC变换器;TMT是单相多绕组升压变压器,其一次绕组产生的电压与牵引变压器TT的相位和频率相同,二次绕组的电压幅值和相位与牵引变压器TT相同,并与牵引总线相连。

1.2 单-三相组合同相供电方案工作原理

牵引负载的计算电容等于单相牵引变压器(TT)的计算电容与同相补偿装置(CPD)的计算

电容之和,而CPD的计算电容是由引起三相电压不平衡度超标部分的牵引负荷的容量来确定,TT的计算容量一般大于CPD的计算容量。

当牵引负荷功率小于或等于同相补偿装置容量的2倍时,牵引变压器和同相补偿装置各提供牵引负荷功率的50%。此时,可以完全补偿负序电流,产生的不平衡三相电压为零。

当牵引负荷功率大于同相补偿装置容量的2倍时,同相补偿装置提供其最大容量功率,其余部分由牵引变压器提供。这时,有未补偿的负序电流,但这样产生的三相电压不平衡符合国家标准的要求。

1.3 同相供电设备结构

同相供电设备是同相供电系统的核心模块,其主电路图如图2所示。该设备实现了谐波滤波、功率因数校正和平衡转换等功能。其中交直交变流器与有源滤波器结构类似,但二者在功能上各有侧重。交直交变流器主要功能是使系统三相对称平衡,同时对谐波和无功功率进行补偿。

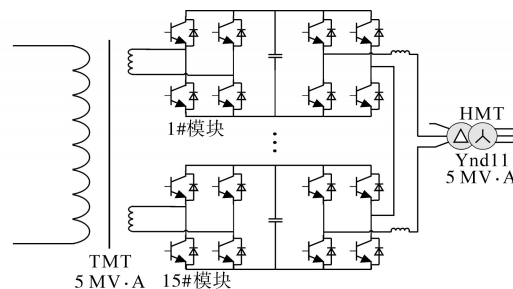


图2 同相供电设备主电路图

Fig.2 Main circuit diagram of the co-phase power supply equipment

实际运行中,考虑电力电子器件的耐压程度,选择15个交直交变流器ADA模块串联,每个模块由两个“背靠背”单相变流器构成。多个模块变流器的一侧与TMT的660 V绕组相连,构成多重并联的逆变器。交流电抗器L配合同相补偿变流器ADA在变流的过程中起到提升输出电流质量的作用。

1.4 系统平衡变换原理

在单-三相组合同相供电系统中,高压匹配变压器的两个端口的连接角差 $\pm 90^\circ$,该供电系统可等效为图3所示电路。直流侧的电压因系统特性影响,会存在固有的100 Hz的波动,因此加入LC低通滤波器,能使系统直流电压更加平稳,进而提高系统的动态性能。

在设备运行过程中,单相变压器与同相补偿装置各提供50%的负载功率,实现了负载功率的合理调配。

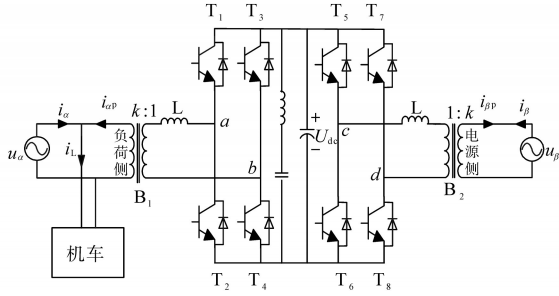


图3 同相供电系统等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of the co-phase power supply system

图4为单-三相组合式同相供电平衡变换原理图。图中,主变压器的变比为 K_1 ,Ynd11变压器的变比为 K_2 ,先将高压侧的电压降为500~2 000 V等级的电压输入到变流器,再将输出电压升压到27.5 kV给负荷供电。 A, B, C 相电流分别为 I_A, I_B, I_C ,规定流出为正,把负载当成一个纯阻性负载。若三相电流 I_A, I_B, I_C 之间相角相差大小相等,且与各自相电压的相位夹角为0,则此时系统中无负序电流。

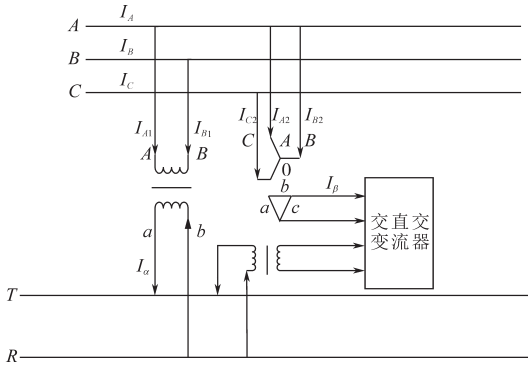


图4 单-三相组合式同相供电平衡变换原理图

Fig.4 Single-three-phase combined balance transformation of co-phase power supply schematic

运用叠加原理,画出向量图,如图5所示。

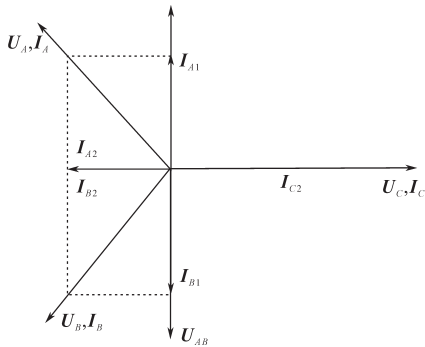


图5 无负序电流系统向量合成图

Fig.5 Vector synthesis diagram of a non-negative sequence current system

图5所示的无负序电流系统向量合成图要完全补偿负序,必须要满足以下条件: I_{A1}, I_{A2} 向量合成的 I_A 与 U_A 同相位, I_{B1}, I_{B2} 合成的 I_B 与 U_B 同相位,

且合成后的 I_A, I_B, I_C 大小相等。

通过上述分析可得:

$$\frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \frac{I_{B1}}{I_{B2}} = \frac{\frac{1}{K_1} I_\alpha}{\frac{\sqrt{3}}{3K_2} I_\beta} = \tan 60^\circ = \sqrt{3} \quad (1)$$

即

$$I_\alpha / I_\beta = K_1 / K_2 \quad (2)$$

式中: I_α, I_β 分别为静止坐标系下的 α, β 轴电流。因此,只要使得 I_α 和 I_β 的比值与变压器变比的比值相等,就可以完全补偿系统的负序电流。

2 同相供电设备保护方案

本节在牵引变电所原有的保护控制基础上,对同相补偿装置配置以下保护:变压器保护、交直交变流器保护、同相补偿装置有功功率差动保护。

2.1 高压匹配变压器保护配置

HMT是一种基于Ynd11接线模式的三相变压器,一般设有以下保护:差动速断保护、变比制动和谐波制动的差动保护、过流保护、本体保护(包括重瓦斯、超温、压力释放跳闸、轻瓦斯、油温过高、低油位报警等信号)。其中,变压器高压侧的断路器设有熔断器后备保护,包括启动时的过流保护和失压保护、两段过负荷保护(一段告警、二段跳闸)、PT断线告警等;低压侧断路器设后备保护包括低压启动的过流保护、过负荷保护、PT断线告警等。

2.1.1 过电流保护

如果变压器油箱出现外部或内部故障,或者高压匹配变压器和AC-DC-AC变换器之间的连接线出现故障,过电流保护可对其起到保护作用,同时,该保护可为变压器差动保护以及交直交变流器的故障提供后备保护,一般配置在变流器的两端。由于变压器的低压额定电流非常大,过电流保护可能无法满足快速动作的灵敏度要求,因此经常使用低电压启动的过电流保护。

低电压启动时过电流保护的動作电流常按照下式进行整定:

$$I_{\text{set}} = \frac{K_{\text{rel}} I_N}{K_{\text{re}}} \quad (3)$$

式中: I_N 为变压器的额定电流; K_{rel} 为可靠性系数,通常为1.2~1.3; K_{re} 为返回系数,一般取0.95。

当母线故障或者失电,使同相供电设备退出运行时,低压保护动作。常根据母线运行的最低

电压对低电压启动的电压值进行整定。当出现励磁涌流时,过电流保护可能会发生错误动作,因此加入了二次谐波闭锁功能。

变压器高、低压侧的过电流保护原理基本相同,每一相都可独立进行整定。 A 相过电流保护原理框图如图6所示, B 相与 C 相原理与之类似。

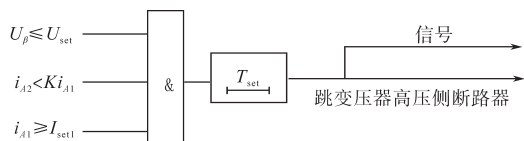


图6 高压侧 A 相过电流保护原理框图

Fig.6 Block diagram of high-voltage side
 A -phase overcurrent protection

图6中, U_β 为低压侧 β 相电压; U_{set} 为低压启动的电压整定值; i_{A1}, i_{A2} 分别为所测 A 相电流的基波值和二次谐波值; I_{set1} 为高压侧 A 相的过电流保护整定值; T_{set} 为动作时限;系数 K 为二次谐波的闭锁阈值,一般取15%~20%。

2.1.2 非电量保护

非电量保护主要包括重瓦斯、超温、泄压跳闸、轻瓦斯、高油温和低油位报警等信号。其中,轻瓦斯对信号动作,可使工作人员迅速对故障进行处理;重瓦斯则对变压器两侧断路器动作,使之跳闸。

2.2 牵引匹配变压器保护配置

对牵引匹配变压器的保护设置与高压匹配变压器类似,一般配置过电流保护与本体保护即可。

2.3 交直交变流器保护配置

交直交变流器与有源滤波器的结构相似,因此对于该模块的保护,可以参考有源滤波器进行讨论。为了提高整个装置的可靠程度,外部保护和内部保护共同构成了总的保护系统。外部保护包括交流过电流保护、交流过电压和欠电压保护、直流过电压和欠电压保护、短路保护等;内部保护包括过温保护、模块断电(模块通信故障)保护等。交直交变流器综合保护策略如图7所示。

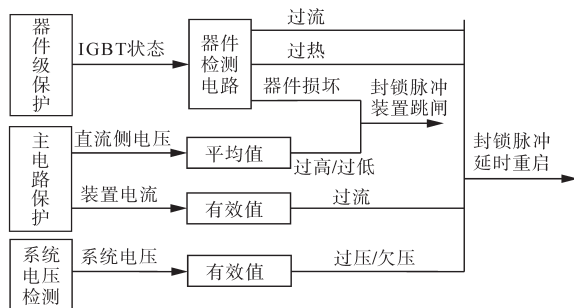


图7 交直交变流器综合保护策略

Fig.7 Comprehensive protection strategy for AC-DC-AC converters

2.3.1 过压保护

过压保护主要是对IGBT设置浪涌电压保护。一般采取以下措施:对IGBT设置足够裕量,对驱动电路合理调整,增设缓冲保护电路。

2.3.2 过流保护

过流保护一般分为短路电流保护和过载电流保护。前者短路电流值可达到额定电流的8~10倍;后者为1.2~1.5倍。因此两者的保护电路响应时间不同,但保护动作基本相似,即封锁IGBT的触发脉冲,使变流器的输出电流为零。

2.3.3 过温保护

通常情况下,温度传感器对IGBT的外壳温度进行检测。当收集的信号超过温度阈值时,变换器的脉冲被阻断,以实现过热保护。

2.4 同相补偿装置纵差保护

同相补偿装置纵差保护即对同相补偿装置设置系统级的功率差动保护。

由于同相供电设备基波输入的有功功率值与其输出的有功功率值相等,因此可对其配置有功功率差动保护,其原理框图如图8所示。其中, P_{CD} 为差动有功功率; $P_{\alpha 1}, P_{\beta 1}$ 分别为同相补偿装置的 α 口和 β 口的基波有功功率; P_{set} 为有功功率差动保护的设定阈值; T_p 为动作时间限度。

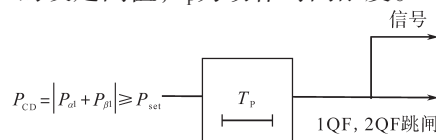


图8 有功功率差动保护原理框图

Fig.8 Active power differential protection principle block diagram

3 仿真结果

3.1 正常工况

同相供电时,正常工况下的仿真模型见图2,合上所有的断路器,仿真结果如图9所示,系统能

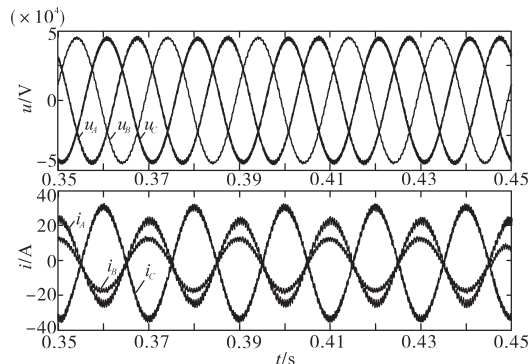


图9 传统同相供电系统电压、电流波形

Fig.9 Voltage and current waveforms of a conventional co-phase power supply system

够实现稳定运行,但系统电流中存在着较大的负序电流分量。

采用单-三相组合式供电时,正常工况下的仿真模型见图4,仿真结果如图10所示。主变压器一次侧各相的电压电流处于相同相位,实现了谐波滤除和无功补偿功能,达到了三相平衡,使该系统中的单相和非线性负荷等同于电力系统中的纯电阻三相平衡负荷。

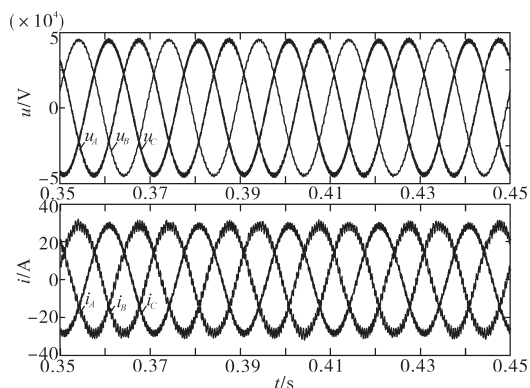


图10 实现同相供电的三相电压、电流

Fig.10 Realization of three-phase voltage and current of the co-phase supply

3.2 空载运行

同相供电设备空载运行时,负载电流接近于零,变流器两端电流如图11所示。仿真中加入了变流器脉冲封锁保护,因此空载运行状态下,两变流器的补偿电流均近似为零,此时同相补偿装置暂时失去补偿效果。

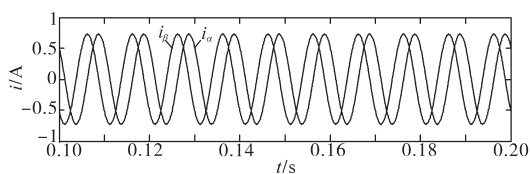


图11 变流器两端电流

Fig.11 Currents at both ends of the converter

3.3 交直交变流器内部故障

仿真中暂不考虑交直交变流器内部保护功能,0.1 s时,变流器内部故障,过渡电阻取0.01 Ω ,仿真结果如图12、图13所示。有功功率差动保护和过电流保护均可以作为交直交变流器内部故障时的后备保护,但有功功率差动保护灵敏度更高。

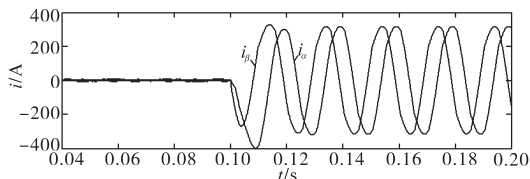


图12 交直交变流器输出电流

Fig.12 AC-DC-AC converter output current

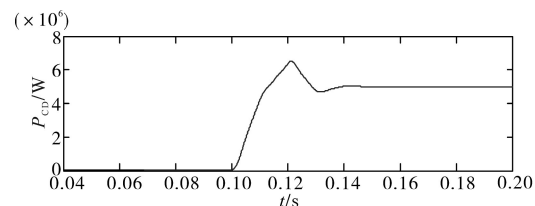


图13 差动有功功率

Fig.13 Differential active power

交直交变流器内部短路故障后,其 α 侧与 β 侧的输出电流和输出功率均变化明显,在故障发生瞬间,两侧的有功功率差值会出现一个峰值,继而下降,这是由于短路后交直交变流器无法及时正常进行功率交换所造成的。

4 结论

本文详细介绍了单-三相组合式同相供电试运行系统,利用单相变压器与Ynd11接线方式的三相变压器的配合,与同相电源连接,实现同相供电。同相供电技术可以全面解决当前牵引供电系统中存在的负序、谐波、无功、过分相等诸多问题,是未来高速重载铁路供电的一个重要研究方向。通过理论分析和仿真测试,本文研究了同相电源装置的工作和保护原理。综上所述,可得以下结论:

1)交直交变流器是同相供电设备中最主要的同相补偿装置,其本质是两“背靠背”单相变流器。用该设备实现的同相供电系统具有明显的优势,它不仅可以从根本上改善电能质量,解决当前供电系统中的负序、谐波和无功等问题,而且供电的可靠性、灵活性和经济性均得到提高。

2)同相供电电源的保护配置,包括为高压匹配变压器、牵引匹配变压器和交直交变流器设置特殊保护。同时,将同相供电电源作为一个整体来考虑。配置了有功功率差动保护,分别作为两变压器、变压器与交直交变流器之间连接电缆的主保护,并作为交直交变流器的后备保护。为了提供全面、完善的同相供电设备保护,还配置了过电流保护、低电压保护、非电量保护等保护功能。

3)利用Matlab/Simulink对组合式同相供电系统建立了仿真模型,对系统正常负荷运行、空载、交直交变流器故障等工况进行了模拟和分析。仿真结果验证了该同相供电方案的可行性及其保护方案的正确性。

参考文献

- [1] 贺建闽,李群湛.用于同相供电系统的对称补偿技术[J].铁道学报,1998,20(6):48-52.
He Jianmin, Li Qunzhan. Symmetrical compensation technology used in feeding system without phase exchange[J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(6): 48-52.
- [2] 张秀峰,高仕斌,钱清泉,等.基于阻抗匹配平衡变压器和AT供电方式的新型同相牵引供电系统[J].铁道学报,2006,28(4):33-37.
Zhang Xiufeng, Gao Shibin, Qian Qingquan, *et al.* A novel co-phase traction power supply system based on impedance matching balance transformer and AT power supply mode[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(4): 33-37.
- [3] 楚振宇,魏宏伟,周娟.电气化铁路同相供电技术工程应用方案研究[J].电气化铁道,2017,28(6):1-3.
Chu Zhenyu, Wei Hongwei, Zhou Juan. Study on engineering application scheme for co-phase power supply technology on electrified railway[J]. Electrified Railway, 2017, 28(6): 1-3.
- [4] 黄华学.组合式同相供电继电保护方案研究[J].电气化铁道,2014(5):17-20.
Huang Huaxue. Study on scheme for combined type co-phase power supply relay protection[J]. Electrified Railway, 2014(5): 17-20.
- [5] 邓文丽,戴朝华,陈维荣.轨道交通能源互联网背景下光伏在交/直流牵引供电系统中的应用及关键问题分析[J].中国电机工程学报,2019,39(19):5692-5702.
Deng Wenli, Dai Zhaohua, Chen Weirong. Application of PV generation in AC/DC traction power supply system and the key problem analysis under the background of rail transit energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5692-5702.
- [6] 张志文,石建可,谢斌,等.基于Y/△平衡变压器的新型电铁电能质量综合补偿系统[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(12):83-90.
Zhang Zhiwen, Shi Jianke, Xie Bin, *et al.* Novel integrated compensation system for electrified railway power quality based on Y/△ balanced transformer[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(12): 83-90.
- [7] 高仕斌.高速铁路牵引供电系统新型保护原理研究[D].成都:西南交通大学,2004.
Gao Shibin. Study on novel protective schemes of traction power supply systems for high speed railways[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.
- [8] 马小亮.调速用交-直-交电压型变频器的几个应用问题[J].电气传动,2020,50(1):3-13.
Ma Xiaoliang. Discussion on several problems of industrial speed regulation applications of AC-DC-AC voltage source converter[J]. Electric Drive, 2020, 50(1): 3-13.
- [9] 张睿.贯通式同相供电系统电能变换设备保护方案研究[D].成都:西南交通大学,2012.
Zhang Rui. Protection scheme for electrical conversion equipment of continuous cophase power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [10] 方振.单三组合式同相供电保护方案设计[D].成都:西南交通大学,2015.
Fang Zhen. Design on the relay protection scheme of combined co-phase power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [11] 周丽莹,夏昌浩.三相桥式变流器负序电流补偿策略[J].电气传动,2022,52(9):39-45.
Zhou Liying, Xia Changhao. Negative sequence current compensation strategy for three-phase bridge converter[J]. Electric Drive, 2022, 52(9): 39-45.
- [12] 陈小川.铁路供电系统继电保护与自动化[M].北京:中国铁道出版社,2010.
Chen Xiaochuan. Relay protection and automation of railway power supply system [M]. Beijing: China Railway Press, 2010.
- [13] 王辉,李群湛,解绍锋,等.基于一种新型牵引补偿变压器的牵引变电群贯通供电系统负序补偿[J].电工技术学报,2021,36(10):2140-2152.
Wang Hui, Li Qunzhan, Xie Shaofeng, *et al.* Compensation of interconnected power supply system of traction substation group based on a new type of traction compensation transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(10): 2140-2152.
- [14] Wu S, Wu M L, Wang Y. A novel co-phase power-supply system based on modular multilevel converter for high-speed railway AT traction power-supply system[J]. Energies, 2021, 14(1): 253.
- [15] Tricoli P, Hillmansen S, Roberts C, *et al.* Modelling and performance analysis of advanced combined co-phase traction power supply system in electrified railway[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(4): 906-916.
- [16] Li Q. New generation traction power supply system and its key technologies for electrified railways[J]. Journal of Modern Transportation, 2015, 23(1): 1-11.

收稿日期:2022-04-08

修改稿日期:2022-06-01