

一种在供电制式切换过程中稳定多流制电力机车 直流环节电压的方法

吴越

(温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司, 浙江 温州 325500)

摘要:交流列车过分相问题通常可以采用柔性地面过分相方法解决,但是,对于多流制电力机车,在中性区完成供电制式的切换,情况要复杂很多,目前却少有研究。基于车载切换结合车身分能的方式,提出一种旨在供电制式切换过程中稳定多流制电力机车直流环节电压的方法,并选择具有代表性的某一型号多流制电力机车为研究对象。首先,介绍了该型号多流制电力机车的拓扑结构;然后,针对该车型设计了供电制式切换方法;最后,通过硬件在环实验平台,对所提出的供电制式切换方法进行了实时仿真,验证了所提方法的良好直流环节稳压效果。

关键词:多流制电力机车;直流环节电压;牵引供电制式切换;牵引传动系统

中图分类号:TM922 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25489

A Method to Stabilize the DC-link Voltage of Multisystem Electric Locomotive in the Process of Power Supply System Switching

WU Yue

(Wenzhou Railway and Rail Transit Investment Group Co., Ltd. Operation Branch,
Wenzhou 325000, Zhejiang, China)

Abstract: The problem of AC train passing neutral section can be solved by ground's flexible passing neutral section method. However, for multisystem electric locomotives, the switching of power supply system in neutral zone is much more complicated, but there is little research at present. Based on the approach of vehicle switching combined with vehicle kinetic energy, a method to stabilize the DC-link voltage of multisystem electric locomotive in the process of power supply system switching was proposed, and selected the typical multisystem electric locomotive of certain model as the research object. Firstly, the traction drive system topology of the multisystem electric locomotive was introduced. Then, a power supply system switching method was designed for it. Finally, real-time simulation of the proposed power supply switching method was conducted on a hardware-in-the-loop experimental platform, and the good DC-link voltage stabilization effect of the proposed method was verified.

Key words: multisystem electric locomotive; DC-link voltage; traction supply system switching; traction drive system

对于交流电力机车,由于交流牵引供电网相序轮换,其运行路径上会设置电分相区^[1]。交流电力机车通过电分相区时,通常可以采用柔性地面过分相的方法^[2-3],实现不断电运行,并维持机车中间直流环节电压的恒定。对于多流制电力机车,其运行路径上两种不同牵引供电网之间同样会设置中性区,以便进行供电制式的切换。但是,由于多流制电力机车需要适配多种牵引供电

制式,在不同牵引供电制式之间切换时,为了实现机车辅助系统不间断供电以及维持机车中间直流环节电压的恒定,相较于仅需考虑牵引供电网不同相序问题的交流电力机车而言,情况复杂很多,但目前对此问题还少有研究。

多流制电力机车切换供电制式的方法主要分为两类:一种是地面切换方式,另一种是车载切换方式^[4]。地面切换方式,中性区中的电力网

路会持续从两端牵引供电网获取电能并给多流制电力机车供电。但是,多流制电力机车切换供电制式存在多种情况,这包括直流-交流切换、不同频交流-交流切换、不同幅交流-交流切换、直流-直流切换等等,中性区电力设备不仅需要同时兼容交流与直流牵引供电网电压,而且还牵涉到多流制电力机车本身的工作模式与拓扑结构的切换^[5]。因此,地面切换方式的实现非常复杂,且稳定性差,目前很少采用,仅日本黑矶车站使用^[6]。车载切换方式,中性区电力网路无电力供应,多流制电力机车依靠车载储能设备或者车体本身动能维持机车辅助系统供电并维持机车中间直流环节电压的恒定。相较于地面切换方式,车载切换方式实现难度低、成本低、稳定性好,德国汉堡的“S-Bahn”线和日本筑波线均采用该方式。国内卑水线采用一种特殊的被称为交直流转换场的多流制电力机车切换供电制式的方法^[7],该方法需要在转换车站内更换牵引机车,不仅占地面积大,而且转换效率低。

多流制电力机车牵引逆变器与机车辅助系统均连接在机车中间直流环节上,机车中间直流环节电压的稳定性,不仅牵涉到牵引电机与机车辅助系统的运行性能,而且也关系到二者的设计难度与制造成本^[8-9]。本文基于车载切换结合车体动能的方式,提出一种旨在供电制式切换过程中稳定多流制电力机车直流环节电压的方法,并选择具有代表性的某一型号多流制电力机车为研究对象。该型号多流制电力机车网侧变流器,在交流牵引供电网下以四象限变流器结构运行,在直流牵引供电网下以 Buck 或 Boost 斩波器结构运行^[10]。因此,无论在交流还是直流牵引供电网下,该型号多流制电力机车均能维持机车直流环节电压恒定。

1 多流制电力机车拓扑结构

图1所示为某一型号多流制电力机车牵引传动系统拓扑结构图。该型号多流制电力机车可以适配 AC 25 kV, AC 15 kV, DC 3 kV 和 DC 1.5 kV 4种主流牵引供电制式。在交流牵引供电网中,该型号多流制电力机车网侧变流器以两路并联的四象限整流器结构运行;在直流牵引供电网中,该型号多流制电力机车网侧变流器可以重构为两路并联的 Boost 或者 Buck 斩波器结构。因此,无论在交流还是直流牵引供电网中,该型号

多流制电力机车均能维持机车直流环节电压恒定。同时,此拓扑结构也为多流制电力机车直流环节电压在机车全线运行过程中维持恒定提供了前提条件,解决在供电制式切换过程中稳定多流制电力机车直流环节电压的问题。

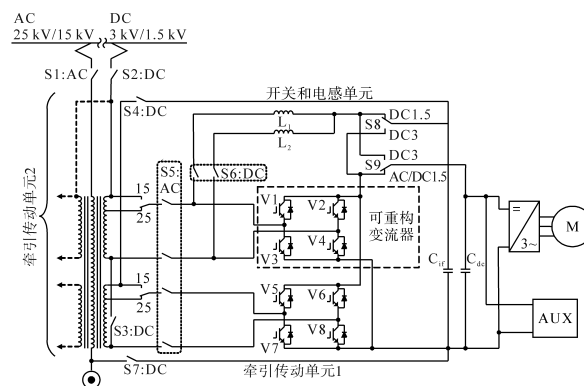


图1 某一型号多流制电力机车牵引传动系统拓扑结构图

Fig.1 Topological structure diagram of traction drive system for a certain model of multisystem electric locomotive

2 供电制式切换方法

多流制电力机车在通过中性区时,其供电制式切换方法的目标主要有3点:1)保证多流制电力机车拓扑结构和工作模式的正确切换;2)切换过程无过压、无过流^[11];3)维持机车辅助系统不间断供电以及维持机车中间直流环节电压的恒定。为了实现以上目标,本文在多流制电力机车常规交流与常规直流工作模式的基础上,引入另外3个工作模式,分别是回馈制动工作模式、并网工作模式、离网工作模式,如图2所示。其中,M1代表常规交流工作模式,D1代表离网工作模式,M2代表回馈制动工作模式,D2代表并网工作模式,M3代表常规直流工作模式。机车轨道上安装有位置感应设备, G_1 和 G_3 是预警切换信号,机车通过此处后,开始进行离网或者并网工作模式; G_2 和 G_4 是强制切换信号,可以在突发故障情况下,保证多流制电力机车的工作模式与拓扑结构能够进行正确切换。

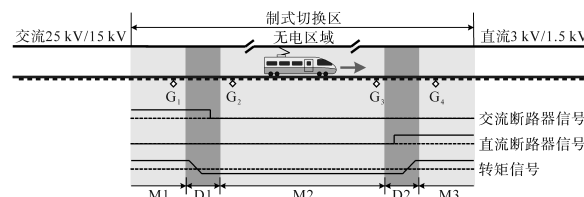


图2 多流制电力机车切换供电制式示意图

Fig.2 Schematic diagram of switching traction power supply system for multisystem electric locomotives

2.1 交流供电网到直流供电网的切换

本文以从交流供电网切换到直流供电网为例,对多流制电力机车切换供电制式的方法进行分析。从交流供电网切换到直流供电网整个过程依次经历 M1—D1—M2—D2—M3 5 种工作模式。

2.1.1 常规交流工作模式 M1

多流制电力机车网侧变流器以两路并联的四象限整流器结构运行(断路器S1和S5闭合,S9切到AC档),维持机车中间直流电压恒定,并给牵引电机与机车辅助系统提供电能;牵引电机工作在准恒速模式下,并保证在进入中性区前,有足够的速度与动能穿越中性区。该工作模式下,多流制电力机车牵引传动系统能量流动如图3所示,功率平衡方程如下:

$$P_{\text{line}} = P_{\text{aux}} + P_{\text{m}} \quad (1)$$

式中: P_{line} 为多流制电力机车网侧变流器供能功率; P_{aux} 为机车辅助系统耗能功率; P_{m} 为机车牵引系统耗能功率。

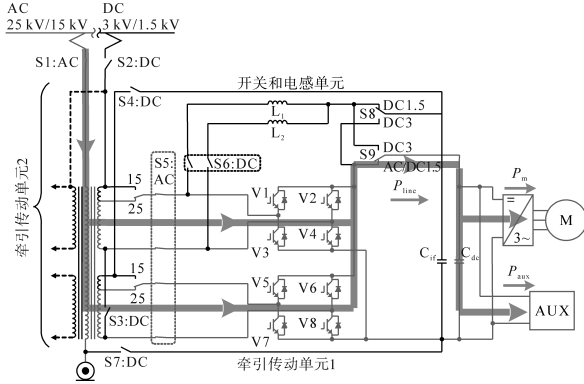


图3 常规交流工作模式下功率平衡示意图

Fig.3 Schematic diagram of power balance in conventional AC working mode

2.1.2 离网工作模式 D1

多流制电力机车通过G1点后,开始进入离网工作模式。该工作模式下,牵引电机由之前的准恒速工作模式,切换为功率控制模式,且牵引功率逐渐降低,直至牵引电机回馈制动功率与机车辅助系统耗能功率相等。此过程中,四象限整流器的供能功率与电流也逐渐降低至接近为0,此时可以断开交流主断路器(S1)并停止四象限整流器驱动信号,实现机车无冲击地脱离交流牵引供电网,并平滑地进入到工作模式M2。此过程中,牵引电机的电磁转矩指令可以由以下公式确定:

$$\begin{cases} P_m^* = S_p(-P_{\text{aux}} - P_{m1}) + P_{m1} \\ T_e^* = \frac{P_m^*}{\omega} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_m^* 为牵引电机目标牵引功率; S_p 为0到1的斜坡函数; T_e^* 为牵引电机目标电磁转矩; ω 为牵引电机当前角速度; P_{m1} 为离网工作模式起始时刻的牵引电机牵引功率。

目标牵引功率 P_m^* 在离网工作模式下线性下降,起始时刻 $P_m^* = P_{m1}$,末尾时刻 $P_m^* = -P_{\text{aux}}$ 。

功率平衡示意图与工作模式M1一致,见图3,随着 P_m 功率逐渐降低, P_{line} 逐渐降低至接近于0。

2.1.3 回馈制动工作模式 M2

多流制电力机车无牵引电网供电,网侧变流器已停止工作,并可在此过程中切换为两路并联的直流斩波器结构(断路器S5断开,S3,S4和S6闭合,S8,S9切到对应档位DC1.5或DC3);牵引电机由之前的功率控制工作模式,切换为回馈制动工作模式,为机车辅助系统提供电能,并维持机车直流环节电压恒定。该工作模式下,多流制电力机车牵引传动系统有功率平衡方程如下:

$$P_m = -P_{\text{aux}} \quad (3)$$

回馈制动工作模式下功率平衡示意图如图4所示。此工作模式中,牵引电机的电磁转矩指令可以采用机车直流环节电压PI环控制,如图5所示,且 T_e^* 初值保持与模式D1末尾时刻接近。

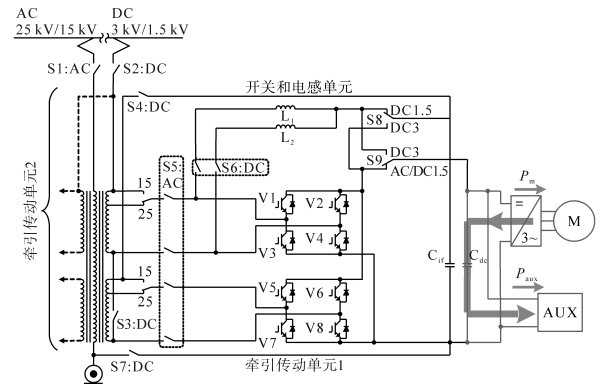


图4 回馈制动工作模式下功率平衡示意图

Fig.4 Schematic diagram of power balance under feedback braking working mode

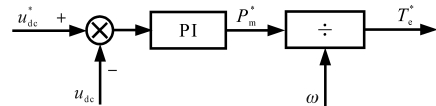


图5 回馈制动工作模式下直流环节电压PI环
Fig.5 DC-link voltage PI loop under feedback braking working mode

2.1.4 并网工作模式 D2

多流制电力机车通过 G3 点后,开始进入并网工作模式。该工作模式下,机车接入直流牵引供电网,闭合直流主断路器(S2与S7)并启动直流斩波器驱动信号(Boost或Buck斩波);牵引电机由之前的回馈制动工作模式切换为转矩控制模式,且牵引转矩逐渐提升,直至目标转矩。在此过程中,网侧直流斩波器供能功率与电流逐渐增大,且牵引电机的电磁转矩指令可以由以下公式确定:

$$\begin{aligned} T_e^* &= T_{e1} + S_T(T_{eaim}^* - T_{e1}) \\ &= -\frac{P_{aux}}{\omega} + S_T(T_{eaim}^* + \frac{P_{aux}}{\omega}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: T_{e1} 为起始转矩; T_{eaim}^* 为目标转矩; S_T 为0到1的斜坡函数。

可知,起始时刻 $T_e^* = T_{e1}$,末尾时刻 $T_e^* = T_{eaim}^*$ 。

功率平衡示意图如图6所示,随着牵引电机转矩逐渐增大, P_m 功率逐渐增大, P_{line} 逐渐增大,当转矩达到目标值后,平滑地进入工作模式M3。

2.1.5 常规直流工作模式 M3

多流制电力机车网侧变流器以两路并联的直流斩波器结构运行,维持机车中间直流电压恒定,并给牵引电机与机车辅助系统提供电能;牵引电机由之前的转矩控制模式,切换为按照所需

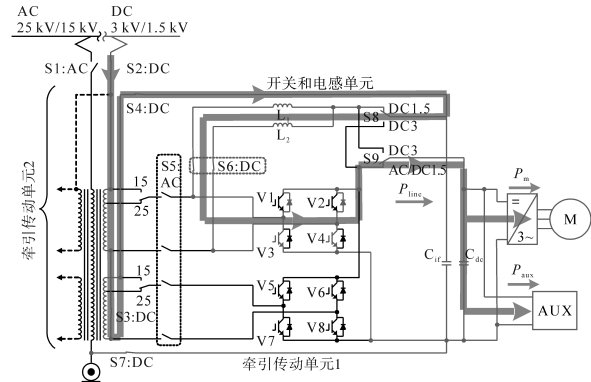


图6 常规直流工作模式下功率平衡示意图

Fig.6 Schematic diagram of power balance in conventional DC working mode

牵引特性运行。该工作模式下,多流制电力机车牵引传动系统功率平衡方程与式(1)一致,功率平衡示意图见图6。

2.2 供电制式切换方法的机车工作状态机

多流制电力机车切换供电制式不仅包括交流到直流这一种情况,还包括交流到交流、直流到交流、直流到直流。为了涵括所有供电制式切换情况,本文采用状态机的形式,描述多流制电力机车切换供电制式的方法如图7所示。图中包含多流制电力机车在供电制式切换过程中所涉及的所有5种工作模式,以及各工作模式之间的切换条件。

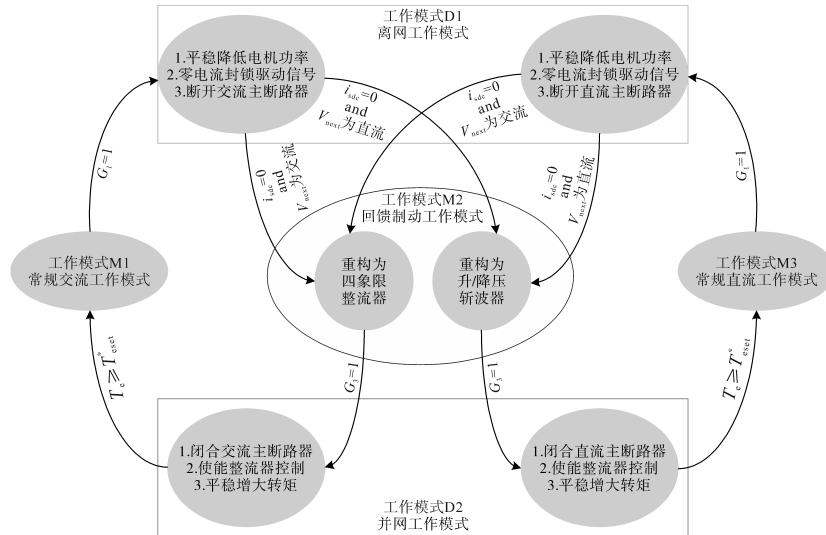


图7 多流制电力机车切换供电制式方法的状态机

Fig.7 State machine for switching traction power supply system of multisystem electric locomotives

3 仿真实验验证

为了验证所提多流制电力机车切换供电制式的方法的效果与可行性,本研究基于远宽能源StarSim硬件在环仿真平台,建立了所研究型号多

流制电力机车牵引传动系统模型,并模拟了牵引供电制式的整个切换过程。硬件电气部分通过StarSim HIL软件上传加载后,在FPGA实时硬件平台上以 μs 级的步长运行;控制与检测部分通过StarSim RCP软件编译后上传加载,在CPU工业级

实时控制平台上以百 μs 的步长运行。仿真系统参数列写在表1中。

表1 仿真系统参数

Tab.1 Parameters of simulation system

	参数	数值
牵引供电系统	交流牵引供电网电压	25 kV/50 Hz
	直流牵引供电网电压	1.5 kV & 3 kV
牵引传动系统	直流环节电压	2 800 V
	直流环节电容	8 mF
	辅助系统负载	160 kW
牵引电机	额定功率	1.6 MW
	额定电压	2 050 V
	额定转速	1 600 r/min

图8所示为多流制电力机车从交流25 kV到直流1.5 V,再到直流3 kV的供电制式切换仿真实验结果。其中, u_s 为网侧输入电压(交流电压折算至变压器牵引侧), i_s 为网侧输入电流(交流电流折算至变压器牵引侧), u_{dc} 为机车中间直流环节电压, T_e 为牵引电机转矩, i_{ma} 为牵引电机单相电流, n_m 为牵引电机转速。

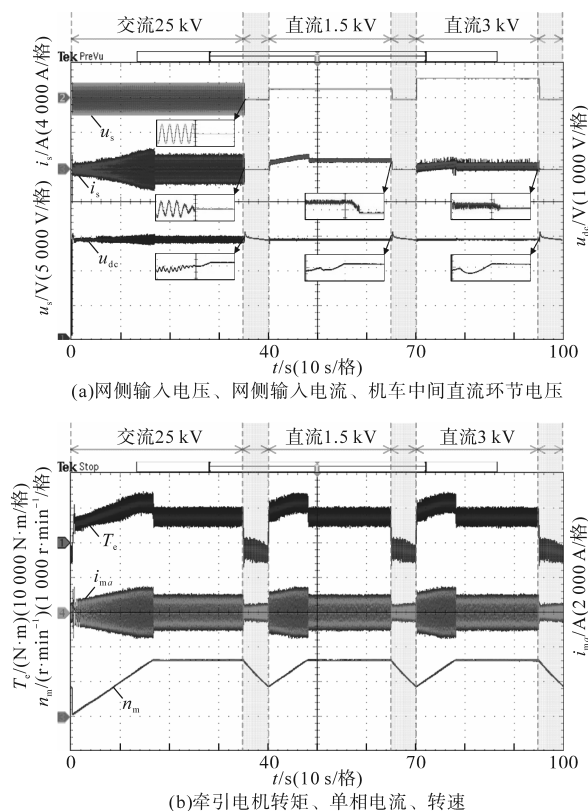


图8 多流制电力机车切换供电制式仿真实验结果

Fig.8 Simulation experimental results of switching power supply system for multisystem electric locomotives

0 s—35 s时间段,多流制电力机车在交流25 kV下以常规交流工作模式运行;40 s—65 s时间段,多流制电力机车在直流1.5 kV下以常规直流工

作模式运行;70 s—95 s时间段,多流制电力机车在直流3 kV下以常规直流工作模式运行;其余时间段,机车运行在中性区,并在依次经历离网工作模式、回馈制动工作模式、并网工作模式后,完成供电制式的切换。从实验结果可以看出,采用本文所提多流制电力机车切换供电制式的方法,多流制电力机车中间直流环节电压在供电制式的整个切换过程中都能维持在2 800 V左右(电压波动范围2 600~3 000 V),仅在机车工作模式切换时存在细微波动,并很快恢复;同时,离网工作模式中网侧变流器的零电流封锁也很好地解决了截流过电压问题。

4 结论

本文基于车载切换结合车身动能的方式,提出一种旨在供电制式切换过程中稳定多流制电力机车直流环节电压的方法,并选择具有代表性的某一型号多流制电力机车为研究对象。硬件在环仿真实验结果表明,所提方法在供电制式的整个切换过程中都能维持机车中间直流环节电压的恒定;同时,离网工作模式中网侧变流器的零电流封锁也解决了截流过电压问题。

参考文献

- [1] WANG Shuo, ZHANG Liyan, YU Guanghui, et al. Hybrid phase-controlled circuit breaker with switch system used in the railway auto-passing neutral section with an electric load[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(4): 545–552.
- [2] 袁佳敏,倪周,肖非然,等. 具备电压补偿功能的不停电过分相系统及控制方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 1084–1095.
YUAN Jiaxin, NI Zhou, XIAO Feiran, et al. Study on the control method and the uninterrupted phase-separation passing system with voltage compensation function[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1084–1095.
- [3] 王伟凡,李子欣,赵聪,等. 一种非全容量不断电过分相装置控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1461–1470.
WANG Weifan, LI Zixin, ZHAO Cong, et al. Research on partial capacity phase-separation passing equipment control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1461–1470.
- [4] 王志荣. 双流制列车过中性段供电切换方案[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(6): 125–129.
WANG Zhirong. Power supply switching scheme of dual-current vehicle on neutral section[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(6): 125–129.

(下转第53页)

5 结论

本文设计了一种储能型低电压治理装置,依托有功-电压下垂结合恒定功率因数的控制方法,有效解决了台区末端低电压问题;针对台区电网末端三相电压不平衡问题,基于负序和零序虚拟阻抗的三相不平衡电压补偿方法,对负序和零序电压直接控制。仿真和实验结果证明了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 邓惠华,李国良,周晓明,等. 基于协调控制SVG的低压配网三相负荷不平衡治理技术[J]. 电工技术学报,2017,32(S1): 75-83.
DENG Huihua, LI Guoliang, ZHOU Xiaoming, et al. The control technology of three-phase unbalance load in low voltage distribution networks based on coordinated controlled SVGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 75-83.
 - [2] 庞庆,彭琪,余祥,等. 三相四线制APF谐波检测和控制策略的研究[J]. 电力电子技术,2018,52(6):96-100.
PANG Qing, PENG Qi, YU Xiang, et al. Study of the harmonic detection and the control strategy for the apf of three-phase four-line[J]. Power Electronics, 2018, 52(6):96-100.
 - [3] 李佳,王群京,张茂松,等. LCL型三相四线制APF的准比例谐振控制研究[J]. 电力电子技术,2021,55(5):4-7,77.
LI Jia, WANG Qunjing, ZHANG Maosong, et al. Research on quasi-proportional resonant control of LCL three-phase four-wire APF[J]. Power Electronics, 2021, 55(5):4-7, 77.
 - [4] 王恒利,付立军,肖飞,等. 三相逆变器不平衡负载条件下双环控制策略[J]. 电网技术,2013,37(2):398-404.
WANG Hengli, FU Lijun, XIAO Fei, et al. A double-loop control strategy for three-phase inverter with unbalanced load[J]. Power System Technology, 2013, 37(2):398-404.
 - [5] 黄新梅,王珺璨,张庆岩,等. 三相四线制三电平并网变流器中点电压研究[J]. 电力电子技术,2021,55(4):128-132.
HUANG Xinmei, WANG Juncan, ZHANG Qingyan, et al. Neutral point voltage analysis for three-phase four-wire three-level grid-connected converter[J]. Power Electronics, 2021, 55(4): 128-132.
 - [6] 张纯江,聂文卿,庆宏阳,等. 基于加权控制的三相四线储能逆变器输出电压不平衡抑制[J]. 电工电能新技术,2022,41(6):10-20.
ZHANG Chunjiang, NIE Wenqing, QING Hongyang, et al. Unbalance suppression for output voltage of three-phase four-wire energy-storage inverter based on weighted control[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(6):10-20.
- 收稿日期:2023-02-21
修改稿日期:2023-04-24
- ~~~~~
- (上接第47页)
- 2016,29(6):125-129.
 - [5] 杨春燕. 电力机车与城轨车辆双制式牵引供电系统的研究[D]. 大连:大连交通大学,2009.
YANG Chunyan. The research of dual-mode traction power supply system for electric locomotive and urban rail vehicle[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2009.
 - [6] 王志荣. 双流制列车通过中性段的供电切换方案研究[J]. 城市轨道交通研究,2016,19(6):128-132.
WANG Zhirong. Power supply switching scheme for dual-current vehicle passing the pantograph neutral section[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6):128-132.
 - [7] 晋钰,杨振龙. 交直流转换场牵引供电系统技术研究[J]. 电气化铁道,2012,23(3):20-22.
JIN Yu, YANG Zhenlong. The technique research on traction power supply system of DC-AC transformation ground[J]. Electric Railway, 2012, 23(3):20-22.
 - [8] 张立伟,黄先进,游小杰,等. 欧洲主力交流传动机车主牵引系统介绍[J]. 电工技术学报,2007,22(7):186-190.
ZHANG Liwei, HUANG Xianjin, YOU Xiaojie, et al. Introduction of electrical traction system for european main AC locomotives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(7):186-190.
 - [9] 钟俊颜. 浅谈多流制电力机车主电路拓扑结构[J]. 技术与市场,2013,20(7):3-4.
ZHONG Junyan. Introduction to multiple current system of electrical locomotive main circuit topology structure[J]. Technology and Market, 2013, 20(7):3-4.
 - [10] STEIMEL A. Under Europe's incompatible catenary voltages a review of multi-system traction technology[C]//2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, 2012:1-8.
 - [11] ZHAO W, TIAN X, JIANG Q, et al. Analysis of problems during locomotive passing neutral section and novel neutral section passing scheme[C]//2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, 2018:1-6.
- 收稿日期:2023-11-14
修改稿日期:2023-12-26