

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002892

地面自动过分相测量回路故障诊断及容错控制*

何亚屏^{1,2} 方攸同¹ 吴丽然² 马吉恩¹ 胡家喜²

(1. 浙江大学电气工程学院 杭州 310000; 2. 株洲中车时代电气股份有限公司 株洲 412001)

摘要:电气化接触网采用单相工频、分相供电方式,供电臂、中性区等电信号的获取是确保列车自动过分相的基础。针对传感器绝缘老化等问题导致的电信号测量回路故障,提出地面自动过分相测量回路故障诊断及容错控制方法。该法基于供电臂、中性区等不同测量回路的机理分析,给出了基于回路信息相互校核的自动过分相测量回路故障诊断方法,并依据不同测量回路的故障特征,构造了相应的容错控制方案。最后,利用仿真和实际工程示范项目运行结果表明所提方法的有效性与可行性。

关键词:自动过分相;故障诊断;容错

中图分类号: U223.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.3010

Fault diagnosis and fault-tolerant control strategy of ground automatic passing neutral section system

He Yaping^{1,2} Fang Youtong¹ Wu Liran² Ma Jien¹ Hu Jiayi²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., LTD, Zhuzhou 412001, China)

Abstract:The catenary is powered by single-phase industrial-frequency power dividing into multiple sections, the acquisition of power feeder voltage, neutral-section voltage and other electrical signals are the foundation to ensure the train automatic-passing the neutral-section. Aiming at the fault of electrical signal measuring circuit caused by sensor insulation aging, the fault diagnosis and fault-tolerant control method of ground automatic passing neutral-section's measuring circuit is proposed. Based on the mechanism analysis of different measuring circuits, such as power feeders and neutral-section, this method gives a fault diagnosis method based on the mutual check of circuit information, and constructs the corresponding fault-tolerant control scheme according to the fault characteristics of different measuring circuits. Finally, the results of simulation and practical project show the effectiveness and reliability of the proposed method.

Keywords:automatic passing neutral section; fault diagnosis; fault-tolerant control

0 引言

电气化铁路接触网采用单相工频交流供电方式,利用电分相装置依次将不同相负荷接入电网,使电力系统三相负荷大致对称,以降低负序电流的影响^[1-2]。目前,新型的自动过分相装置需根据电压、电流传感器的反馈信息,控制晶闸管阀组等执行部件的分合,实现机车自动过分相^[3-6]。然而,因传感器老化等问题带来的电压、

电流等电信息测量回路故障,常引起供电设备工作异常,严重时可能导致列车停运等事故^[7-10]。因此,实现地面自动过分相测量回路故障的有效诊断和容错控制,对确保列车安全准点运行具有重要意义。

国内外学者做了较多的故障诊断研究工作^[11-15],基于模型的牵引供电系统故障诊断方法实现了接触网、正馈线、母线等牵引供电系统各组成部分的有效诊断^[16],但该法运行时间过长,至少需要8 s才能确认故障原因。同时,针对供电臂故障特征,基于模糊 Petri 网的供电臂

收稿日期: 2020-01-05 Received Date: 2020-01-05

* 基金项目:国家自然科学基金(51577166, 51637009, 51827810)资助项目

故障区间判别规则,可提高系统不确定或信息缺失条件下的故障诊断可信度^[17],然而该法需要大量的数据构建网络模型,不便于实际应用。依据作者常年的工作经验与掌握的知识,并未发现有效的地面自动过分相测量回路故障诊断与容错控制方法。

为此,本文在分析地面自动过分相机理的基础上,针对列车运行的不同位置,通过触发晶闸管阀组的方式,分别构建供电臂测量回路和中性区测量回路,并运用回路信息相互校核的途径,实现地面自动过分相测量回路的故障诊断,并针对不同的回路故障设计相应的容错控制

方案,最后通过仿真和实验相结合的方式对所提方法进行验证。

1 地面自动过分相系统

典型的地面自动过分相系统结构如图 1 所示^[18],该系统由晶闸管阀组(V1、V2)、主回路进出线开关(QF1~QF3)、列车位置传感器(CG1~CG3)等构成。电子开关地面自动过分相系统通过开关分别接入相应变电所或分区所(亭)的供电臂及电分相的无电区。

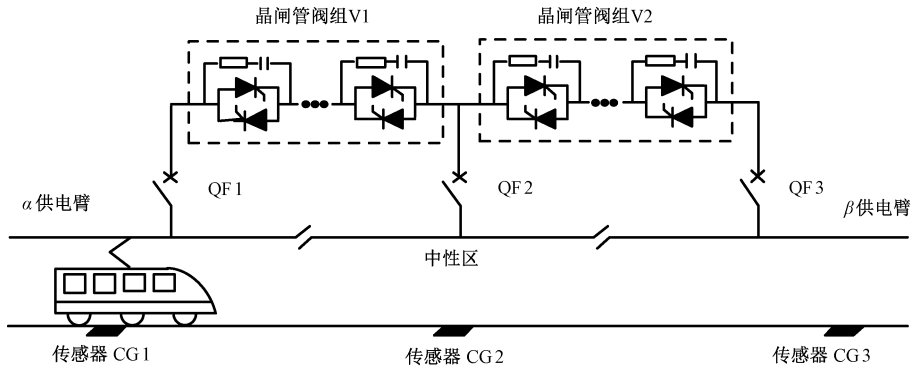


图 1 电子开关地面自动过分相系统

Fig. 1 Power electric switch ground automatic neutral section passing system

如图 1 所示,当位置传感器 CG1 检测到机车时,触发晶闸管阀组 V1 导通,供电臂给中性区充电;当位置传感器 CG2 检测到机车时,关断晶闸管阀组 V1,经过必要连锁时间后触发晶闸管阀组 V2 导通;当位置传感器 CG3 检测到机车时,表明机车即将驶出分相区,关断晶闸管阀组 V2,等待后续机车通过。

地面自动过分相系统需要根据地面传感器输出信号判定列车位置,同时需要通过互感器、传感器等实现电气量测量,以控制晶闸管阀组触发导通及判定其导通与关断状态。通常,互感器多为铁路既有或地面自动过分相系统新增,电压、电流信号检测过程有电压/电流互感器—板级传感器—板级信号调理—AD 采样—核心芯片信号处理,需要测量的电压信号包括 a 相供电臂电压 U_a 、b 相供电臂电压 U_b 、中性区电压 U_n ;需要测量的电流信号包括 a 相供电臂电流 I_a 、b 相供电臂电流 I_b 、中性区电流 I_n 。

由于高温、污秽等恶劣自然环境,以及电压波动、高频谐波等恶劣环境下,容易造成传感器绝缘老化、损坏、击穿,以及匝间短路、绕组断线等测量回路故障,造成电压测量失效。同理,电流互感器也容易发生放电、绝缘击穿、匝间或层间短路,以及绕组断线等测量回路故障,引起电流测量失效。

2 测量回路故障诊断

根据地面自动过分相工作原理,通过互感器以及含电压/电流互感器—板级传感器—板级信号调理—AD 采样—核心芯片信号处理等环节在内的控制系统,采用不同信号测量回路,即两供电臂电压测量回路与中性区电压进行相互校核,确认电压测量回路是否故障。同理,电流测量回路亦可通过相互校核,以确认是否故障。

在实际运行中,供电臂电压存在多种异常的可能性,难以全部列举与诊断是被。因此,本文仅以互感器/传感器损坏、断线等引起测量失效的情况为例进行分析。以电压测量回路的故障诊断为例说明。

1) 当无列车驶入中性区,即两个晶闸管阀组均未导通时,若出现 a 相(或 b 相)供电臂电压异常,如失压、欠压,在一定时间内(如 10~15 ms)强迫触发晶闸管阀组 V1(或 V2),且阀组内部反并联晶闸管元件同时触发,如若正常建立中性区电压信号,且该信号处于正常范围或晶闸管阀组电流大于其维持电流,则表明 a(或 b)供电臂失压是由其测量回路故障引发,否则可判定供电臂出现故障,具体诊断流程如图 2 所示。

对于图 2 电压的计算与参数确定,采用二阶广义积分(SOGI)滤波器实现供电臂电压滤波^[19-20],该滤波器的

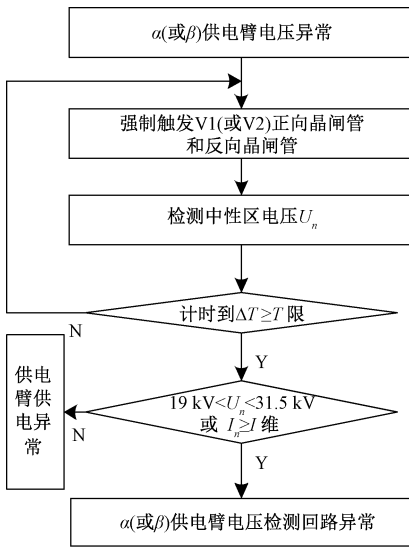


图2 供电臂电压异常在线诊断流程

Fig. 2 On-line diagnosis process of feeding voltage fault

2) 当有列车驶入,即触发导通 a 相(或 b 相)晶闸管阀组时,若出现中性区电压异常,如失压、欠压,可依据晶闸管阀组元件的伏安特性进行诊断,具体诊断流程如图 3 所示。

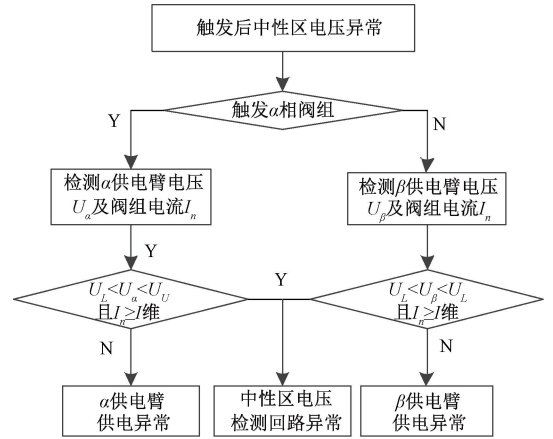


图3 中性区电压异常在线诊断流程

Fig. 3 On-line diagnosis process of neutral section voltage fault

SOGI 传递函数为:

$$G_f(s) = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (1)$$

式中: ω 为谐振角频率; k 为谐振深度系数。

假设供电臂(以 a 相为例)电压如下:

$$u_\alpha = U_\alpha \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

式中: U_α 为电压幅值为; θ 为电压初相角。

本文采用电压信号相乘、滤波器滤波的方法获得供电臂电压幅值,其中滤波器采用 100 Hz 的陷波滤波器,用于滤除电压信号相乘后的二倍频波动,以便获得稳定的电压幅值信号,如式(3)所示。

$$\hat{U}_\alpha = \sqrt{U_\alpha^2} = \sqrt{f_f[U_\alpha^2 - U_\alpha^2 \cos(2\omega t + 2\theta)]} = \sqrt{f_f(2u_\alpha^2)} \quad (3)$$

其中, $f_f(x)$ 为陷波滤波器,其传递函数如下:

$$G_{ff}(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \omega_0 s/Q + \omega_0^2} \quad (4)$$

式中: ω_0 为特征角频率,此处设为 $2 \times \pi \times 100$ rad/s; Q 为品质因数,品质因数决定着陷波滤波器的带宽和增益。假设最大牵引网基波频率波动量为 ± 0.5 Hz,则阻带带宽为 2 Hz,再考虑截止频率(99 Hz、101 Hz)处幅值增益 -20 dB,则可取 $Q=5$ ^[21]。

通过上述方法,可以计算供电臂电压幅值,若判定该幅值有明显跌落,如跌落式额定的 50%,则设定电压异常下限限制为:

$$U_L = 50\% U_\alpha = 50\% \times 27.5\sqrt{2} = 19.4 \text{ V} \quad (5)$$

牵引网电压上限限制可以按照我国相关铁路设计规范,如可按照最高接触网电压峰值:

$$U_U = 31.5 \times \sqrt{2} = 44.5 \text{ kV} \quad (6)$$

诊断时,检测 a 相(或 b 相)晶闸管阀组对应的供电臂电压,若该供电臂电压有效值处于正常范围内,且该晶闸管阀组电流大于其维持电流,则表明中性区电压是由其测量回路故障引发,否则可判定 a 相(或 b 相)供电臂出现故障。

$$U_T \leq U_{DSM} \quad (7)$$

$$I_T < I_H \quad (8)$$

式中: U_T 、 I_T 分别为晶闸管的电压、电流; U_{DSM} 为断态不重复峰值电压; I_H 为维持电流。

3 测量回路容错方案

3.1 供电臂电压测量回路

故障容错对电气系统极为重要,当供电臂电压测量回路故障后,难以获得晶闸管阀组导通的同步信号,若无合理容错方案整个系统将失效。

为此,本文根据地面传感器检测列车位置,在列车即将进入分相区时,首先同时触发对应的所有反并联晶闸管元件 10~15 ms,然后通过信号滤波处理、过零鉴相、上升与下降沿判别的方式,识别出正向过零点或负向过零点,最后通过计数的方式实现电压锁相。该过程的响应时间与信号处理速度有关,一般故障出现后在 20 ms 以内可以实现故障诊断与容错。供电臂电压测量故障容错原理如图 4 所示,电压信号采集与过零鉴相如图 5 所示。其中, U_{L1} 、 U_{L2} 为过零检测的上下限值, $U_1 \sim U_n$ 为采样点。

若 $U_{k-1} > U_{L1}$ 、 $U_{k+1} < U_{L2}$,则 U_k 为负向过零点,识别出

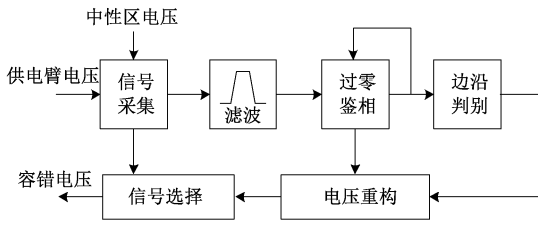


图 4 供电臂电压测量故障容错原理

Fig. 4 Principle of feeding voltage fault tolerance

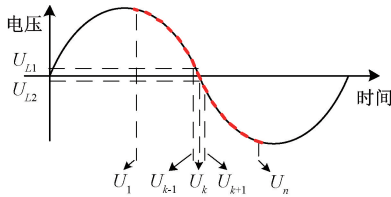


图 5 电压采集与过零鉴相

Fig. 5 Voltage signal acquisition and zero crossing phase detection

电压相位为 180° ，在通过累加计数得到电压实时相位角。

$$\theta = \text{mod} \left[180^\circ + 360^\circ \times \frac{50(i - k)}{f_k}, 360^\circ \right] \quad (9)$$

若 $U_{k+1} > U_{L1}$ 、 $U_{k-1} < U_{L2}$ ，则 U_k 为正向过零点，识别出电压相位为 0° ，在通过累加计数得到电压实时相位角。

$$\theta = \text{mod} \left[360^\circ \times \frac{50(i - k)}{f_k}, 360^\circ \right] \quad (10)$$

通过上述方法可实现供电臂电压测量回路失效时的电压相位估计，可确保晶闸管阀组继续导通，增加了系统可靠性。

3.2 中性区电压测量回路

当中性区电压测量回路故障后，无法实现中性区电压计量，也无法通过中性区电压信号判别晶闸管阀组是否完全导通。

针对中性区电压计量失效问题，借助供电臂电压以及负荷电流实现中性区基波电压估计，用以实现过压、欠压等系统保护。负荷电流主要在地面自动过分相晶闸管阀组和线路产生分压。

地面自动过分相可采用 GLJ-185 型架空钢芯铝绞线并网连接，等效长度 L_{CS} ，则接触网等效阻抗为：

$$Z_{CS} = L_{CS} \times \left(0.163 + 0.05 + j0.145 \lg \frac{D_g}{9.03} \right) \quad (11)$$

则总电压损失为：

$$\Delta \dot{U} = \dot{I}_L Z_{CS} + n \Delta U_{SCR} \quad (12)$$

式中： D_g 为等值深度； ΔU_{SCR} 为晶闸管原件导通电压； n 为晶闸管原件串联数量。

最后，可以得到中性区电压估计值：

$$\dot{U}_n = \dot{U}_i - \Delta \dot{U} \quad (13)$$

式中： U_i 为供电臂电压， i 为 a 或 b，表示 a 相或 b 相供电臂。

利用中性区 RC 过压吸收支路实现晶闸管阀组导通的判别，其阻抗值约为 $k\Omega$ 级^[22]，中性区供电后该支路电流明显大于阀组维持电流。若发出 a 相或 b 相阀组触发导通命令后，检测中性区电流，若供电臂电压正向且中性区电压 $I_n \geq I_{n\text{维}}$ ，则晶闸管阀组已触发导通。若供电臂电压正向且中性区电压 $I_n < I_{n\text{维}}$ ，则晶闸管阀组已关断。

通过上述方法可实现中性区电压测量回路失效时的容错控制，即根据供电臂电压、负荷电流、回路阻抗估计中性区电压用以系统保护等。

4 仿真与试验

4.1 系统仿真

为验证本文所提方法，利用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型，首先验证电压传感器失效后的响应过程。设定在 a 相晶闸管阀组导通时对应供电臂电压测量信号丢失，对应的中性区电压如图 6 所示。

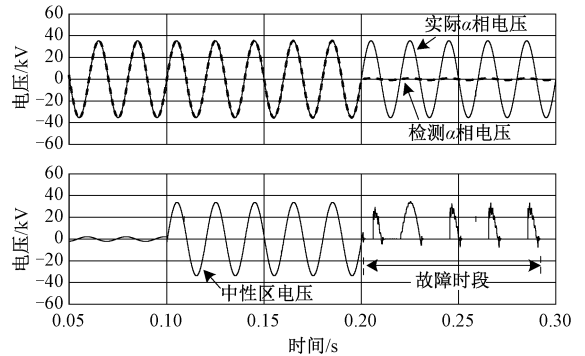


图 6 无故障容错的电压波形

Fig. 6 Voltage waveforms without fault-tolerant control

如图 6 所示，实际供电臂电压处于正常范围，但在 0.2 s 时刻供电臂电压信号丢失，晶闸管不能正常导通，中性区电压出现异常。此时晶闸管通断与控制、触发环节的软硬件都有密切关系。增加容错后的仿真结果如图 7、8 所示。

由图 7 和 8 可以看出，在 0.2 s 出现供电臂电压检测信号跌落，而供电臂电压无异常。在 5 ms 内实现电压信号幅值跌落识别，此后同时强制触发晶闸管阀组的正向和反向晶闸管，持续约 15 ms，在强制触发期间实现中性区电压过零鉴相与相位估计，中性区电压仅存在极端的暂态失电过程，最大程度保证了供电的连续性。

测量回路无异常时的地面自动过分相全过程如图 9 所示。

列车在 0.1 s 时进入中性区，晶闸管阀组 V1 导通，

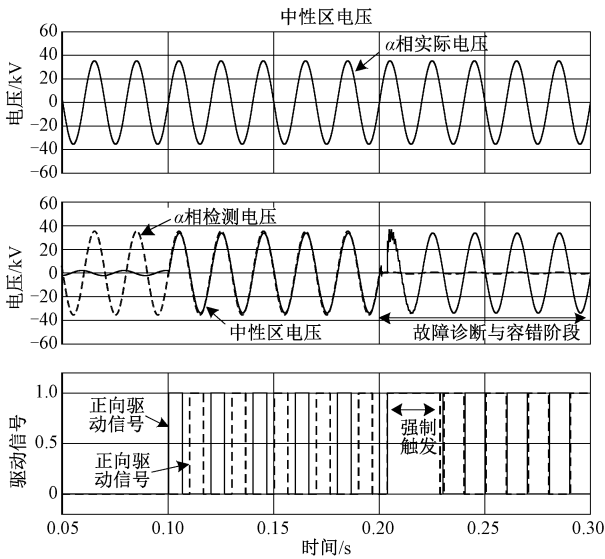


图7 含故障容错的电压波形

Fig. 7 Voltage waveforms without fault-tolerant control

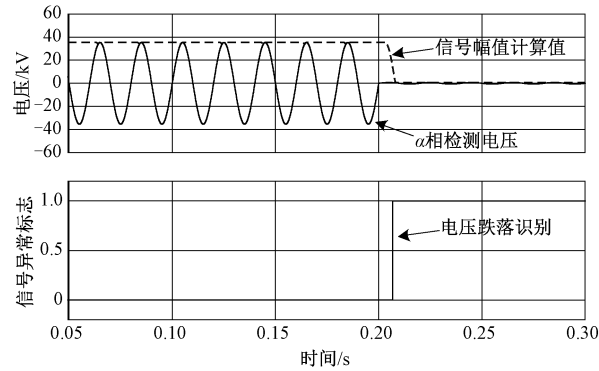


图8 电压信号跌落识别

Fig. 8 Identification of voltage signal drop

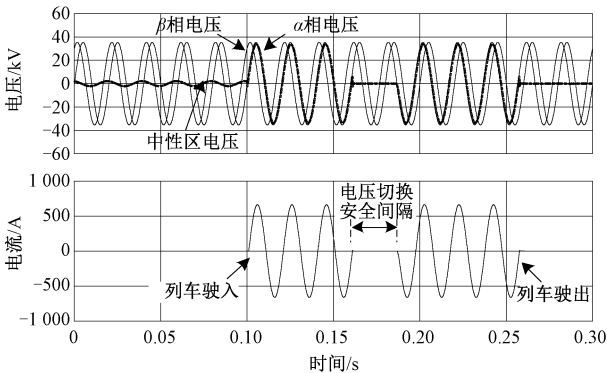


图9 地面自动过分相过程

Fig. 9 Ground automatic neutral section passing process

中性区与供电臂 a 连同。在 0.16 s 时刻,晶闸管阀组 V1 关断,检测到 V1 可靠关断后,晶闸管阀组 V2 在 0.187 s 导通,中性区与供电臂 b 连同,实现中性区供电电源的切换。在 0.257 s 列车驶出中性区,晶闸管阀组 V2 关断。

4.2 系统实验

为进一步验证方法的有效性,搭建了如图 10 所示的低压试验平台,通过大功率可调电源模拟两供电臂电源,以电阻负载模拟列车,主要试验参数如表 1 所示。



图 10 样机试验平台

Fig. 10 Equipment platform of test prototype

表 1 主要试验参数

Table 1 Main test parameters

参数	数值
a 相供电臂电压	220 V
b 相供电臂电压	220 V
a 相滞后角度	60°
负载电阻	25 Ω

根据本文所提方法,试验结果如图 11 和 12 所示。

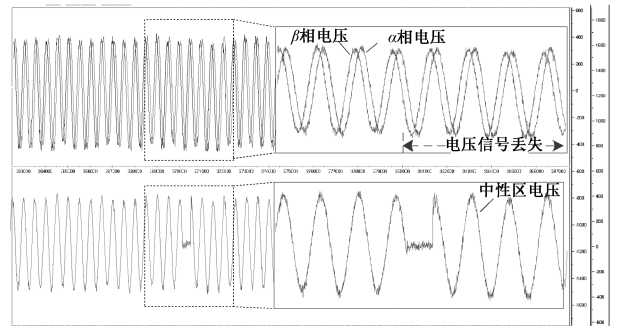


图 11 供电臂电压信号丢失时故障容错波形

Fig. 11 Fault tolerant waveforms with the loss of a-phase feeder voltage

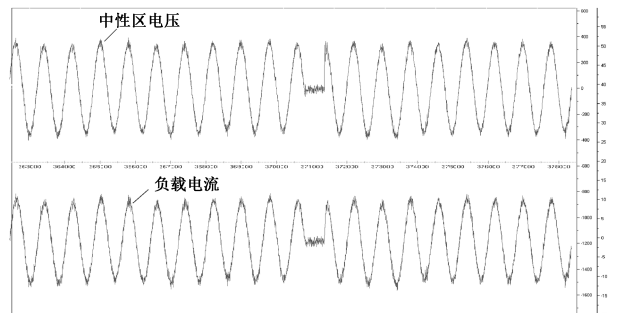


图 12 中性区电压和负载电流波形

Fig. 12 Waveforms of neutral-section voltage and load current

从图 11、12 可以看出,当晶闸管阀组 V1 导通时,由 a 相供电臂向中性区供电,两者电压相同。当 α 相电压信号丢失后,经过短暂时间(约 15 ms)晶闸管阀组 V1 再次导通,中性区恢复供电。其中,故障容错引起的中性区电压中断时间与信号离散方法、通讯延迟等因素有关。

依托某科研项目,电子开关地面自动过分相系统实现工程示范,现场设备如图 13 所示,中性区电压切换波形如图 14 所示,列车驶出中性区过分相波形如图 15 所示。



图 13 示范工程设备

Fig. 13 Equipment of demonstration project

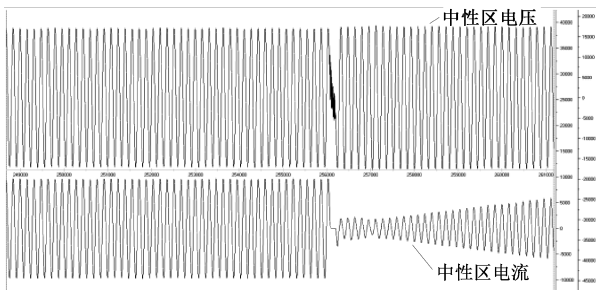


图 14 中性区电压切换过程

Fig. 14 Neutral section voltage switching process

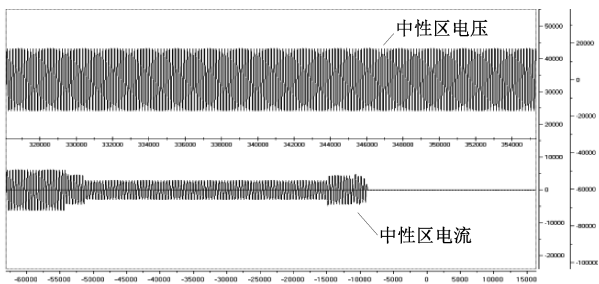


图 15 列车驶出中性区过分相

Fig. 15 Locomotive passing through neutral section process

由图 14 可以看出,系统由 a 相阀组导通切换至 b 相阀组导通时的波形,该暂态过程时间很短,且无过电压,实现了中性区电压的平稳切换,支持列车牵引力的快速恢复,提升了列车过分相时的供电连续性。

由图 15 可知,列车驶出分相区前后全过程均无过电压、电流等暂态现象,表现了良好的动态性能。

5 结论

地面自动过分相电信息的测量是实现分相动作的依据,本文针对电信息测量回路故障,提出了基于回路信息相互校验的自动过分相测量回路故障诊断方法,通过短暂强制触发晶闸管,相互校验各测量回路信号,根据其工作原理实现故障诊断以及容错控制。仿真和实验结果表明,文本所提方法实现简单、影响速度快,有助于提升地面自动过分相系统的可靠性。

参考文献

[1] HU H T, PAN P Y, SONG Y T, et al. A novel controlled frequency band impedance measurement approach for single-phase railway traction power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 244-253.

[2] 姜晓锋,何正友,胡海涛,等. 高速铁路过分相电磁暂态过程分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(12):30-36. JIANG X F, HE ZH Y, HU H T, et al. Analysis on electromagnetic transient process of electric multiple unit passing neutral section devices[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(12):30-36.

[3] GARRAMIOLA F, OLMO J D, POZA J, et al. Integral sensor fault detection and isolation for railway traction drive[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1543-1563.

[4] HAYASHIYA H, AJIKI K. Closing surge and surge propagation at Shinkansen changeover section [J]. Ieej Transactions on Industry Applications, 2013, 66(126): 322-329.

[5] 刘冰,冉旺,李雄,等. 电子开关实现带电自动过分相的研究[J]. 电力电子, 2011(3):26-29. LIU B, RAN W, LI X, et al. Research on power electronic switch used in the auto-passing neutral section with electric load [J]. Power Electronics, 2011(3): 26-29.

[6] 黄辉,范瑜,邱瑞昌. 基于锁相环控制的晶闸管通用触发装置原理与误差分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(2):21-24. HANG H, FAN Y, QIU R CH. Principle & error-analysis of a universal triggering device using PLL control [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2006, 20(2):21-24.

[7] 张宏伟,王新环,荆鹏辉. 绕组分段永磁直线电机切换位置传感器故障诊断及容错控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11):1745-1752. ZHANG H W, WANG X H, JING P H. Fault diagnosis and fault-tolerant control of switching position sensor for segment winding permanent magnet linear synchronous

- motor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(11): 1745-1752.
- [8] 万志刚. HXD1B 型机车高压电压互感器网压环境测试与分析[J]. *轨道交通装备与技术*, 2013, (1): 18-20.
- WANG ZH G. Test and analysis of high voltage environment of voltage transformer for HXD1B locomotive[J]. *Railway Locomotive & Rolling Stock Workers*, 2013, (1):18-20.
- [9] GOU B, GE X L, LIU Y C, et al. Load-current-based current sensor fault diagnosis and tolerant control scheme for traction inverters [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(20): 1717-1719.
- [10] 王永强. SS4 改型电力机车高压电压互感器内部放电原因分析及改进建议[J]. *铁道技术监督*, 2019, 47(3):37-39,45.
- WANG Y Q. Analysis of internal discharge of high voltage transformer of SS4 modified electric locomotive and suggestions for improvement [J]. *Railway Quality Control*, 2019, 47(3):37-39,45.
- [11] WANG X, WANG Z, XU Z, et al. Comprehensive diagnosis and tolerance strategies for electrical faults and sensor faults in dual three-phase PMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 34(7): 6669-6684.
- [12] GAO Z, CECATI C, DING S X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques-Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(6): 3757-3767.
- [13] 余运俊,裴石磊,万晓凤,等. NPC 三电平光伏逆变器开路故障诊断[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(5):41-49.
- YU Y J, FEI SH L, WAN X F, et al. Open-circuit fault diagnosis of NPC three-level photovoltaic inverter [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2018, 32(5):41-49.
- [14] 徐殿国,刘晓峰,于泳. 变频器故障诊断及容错控制研究综述[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(21):1-12.
- XU D G, LIU X F, YU Y. A survey on fault diagnosis and tolerant control of inverters [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(21):1-12.
- [15] 蒋雪峰,李强,王绍帅,等. 基于双绕组永磁容错电机驱动系统的强鲁棒性开路故障诊断策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(15): 4550-4557.
- JIANG X F, LI Q, WANG SH SH, et al. A strong robustness open-circuit fault diagnosis strategy based on the dual-winding fault-tolerant permanent magnet motor drive system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(15): 4550-4557.
- [16] 高松,刘志刚,戴晨曦,等. 牵引供电系统故障的基于模型诊断方法研究[J]. *铁道学报*, 2015, (9):38-45.
- GAO S, LIU ZH G, DAI CH X, et al. Application research of model-based diagnosis in fault diagnosis for traction power supply system [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015(9):38-45.
- [17] 吴双,何正友,钱澄浩,等. 模糊 Petri 网在高速铁路牵引供电系统故障诊断中的应用[J]. *电网技术*, 2011, 35(9):79-85.
- WU SH, HE ZH Y, QIAN CH H, et al. Application of fuzzy petri net in fault diagnosis of traction power supply system for high-speed railway [J]. *Power System Technology*, 2011, 35(9):79-85.
- [18] 胡前,吴丽然,邱文俊. 基于电子开关的地面自动过分相装置技术研究[J]. *电气化铁道*, 2019, 30(3): 21-24.
- HU Q, WU L R, QIU W J. Research on the technology of auto-passing neutral section device based on electronic switch[J]. *Electric Railway*, 2019, 30(3):21-24.
- [19] 苏光靖,李红梅,李争. 基于二阶广义积分器的永磁同步电机新型磁链观测方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(1):81-88.
- SU G J, LI H M, LI ZH. Novel flux observation method for permanent magnet synchronous motor based on second-order generalized integrator [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2018, 32(1):81-88.
- [20] XIAO F, DONG L, LI L, et al. A frequency-fixed SOGI-based PLL for single-phase grid-connected converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 32(3): 1713-1719.
- [21] XU G, ZHOU Y, CHEN Y. Model-based fault location with frequency domain for power traction system, *Energies*, 2013, 6(7): 3097-3114.
- [22] 郑亚平,吴丽然. 地面自动过分相系统过电压抑制建模仿真研究[J]. *机车电传动*, 2019(3):17-21.
- ZHENG Y P, WU L R. Modeling and simulation of overvoltage suppression in ground automatic neutral section passing system [J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2019(3):17-21.

作者简介



何亚屏,博士,高级工程师,主要从事工业交流系统设计、故障诊断及保护策略等研究。

E-mail: heyp@csrzc.com

He Yaping, Ph. D. and senior engineer.

His main research interests include industrial converter system design, fault diagnosis and protection strategy research.