

Optimization Research on Single-Phase Ground Fault Detection Method for Auxiliary System of Electric Locomotives

Xue Bai Xuande Liu Qi Yuan

CRRC Datong Electric Locomotive Co., Ltd., Rail Transit Locomotive System Intergration of Shanxi Key Laboratory, Datong, Shanxi, 037038, China

Abstract

For the problem that the existing detection methods for the auxiliary system of AC drive electric locomotives are unable to accurately identify the faulty branch when a single-phase grounding fault occurs, resulting in a long troubleshooting time, this paper proposes an improved grounding fault detection and location method. This method adds a high-resistance and low-resistance switching circuit at the neutral point of the auxiliary converter output side, and installs zero-sequence current transformers in each load branch. By analyzing the zero-sequence current distribution characteristics during single-phase grounding, and using the zero-sequence current characteristics provided by the low-resistance circuit, the faulty branch can be quickly and accurately located. The electrical principle of this detection system is elaborated in the paper, and the selection principles of key resistors and current transformers are given. The analysis shows that this method can effectively solve the problem of low efficiency of traditional manual troubleshooting, significantly shorten the handling time of locomotive mainline faults, reduce the risk of train operation safety, and provide technical reference for the intelligent operation and maintenance of the locomotive auxiliary system.

Keywords

auxiliary system; single-phase grounding; zero sequence current; parameter selection

电力机车辅助系统单相接地故障检测方法优化研究

白雪 刘炫德 袁琪

中车大同电力机车有限公司轨道交通机车系统集成山西省重点实验室, 中国·山西 大同 037038

摘要

针对交流传动电力机车辅助系统在发生单相接地故障时, 现有检测手段难以准确识别故障支路、导致排查时间过长的问題, 本文提出了一种改进的接地故障检测与定位方法。该方法在辅助变流器输出侧中性点增设高电阻与低电阻切换电路, 并在各负载支路装设零序电流互感器。通过分析单相接地时的零序电流分布特性, 利用低阻回路提供的零序电流特征, 实现对故障支路的快速、精准定位。文中阐述了该检测系统的电气原理, 并给出了关键电阻及互感器参数的选取原则。分析表明, 该方法能够有效解决传统人工排查效率低下的问题, 显著缩短机车正线故障处理时间, 降低行车安全风险, 为机车辅助系统的智能化运维提供了技术参考。

关键词

辅助系统; 单相接地; 零序电流; 参数选取

1 引言

近年来, 随着交流传动电力机车的大规模上线运行, 其辅助系统的可靠性日益受到关注。由于机车运行环境恶劣以及线缆绝缘老化等因素, 辅助电路发生单相接地故障的概率逐渐增加。理论上, 辅助系统通常采用中性点不接地或经高阻接地的运行方式, 发生单相接地时系统线电压保持对称, 短期内不会影响辅助负载的正常工作。然而, 若故障未能及时消除, 极易发展为两点或多点接地, 进而引发相间短路, 产生巨大的短路电流, 导致电传动系统部件烧损或触发

保护停机, 严重威胁行车安全^[1]。

目前, 正线运行的机车在发生此类故障时, 车载监控系统虽然能提示“辅助单相接地”报警, 却无法定位具体的故障支路。受限于此, 现行的应急处理方案通常要求司机停车, 并重新启动辅助变流器, 随后逐一断开各辅助负载断路器进行“试探性”排查, 直至报警消失。这种排查方式不仅效率低, 而且增加了机车在正线上的非正常停留时间, 易引发线路拥堵甚至造成严重的行车中断事故^[2]。

针对上述问题, 本文提出了一种基于改进零序电路的辅助系统接地故障检测与定位方法。该方法通过在辅助变流器输出端增设可控电阻支路, 并在各负载前端配置零序电流互感器, 利用接地时的零序电流分布特性, 实现了对具体故障支路的快速、精准识别。该方案旨在改变传统的人工排查

【作者简介】白雪(1975-), 男, 本科, 高级工程师, 从事机车技术性能研究。

模式，在保障机车不停车运行的前提下实现故障隔离，从而有效降低机车运用风险。

2 现有机车辅助单相接地检测原理

如图 1 所示，典型电力机车的辅助系统通常配备两组互为冗余的辅助变流器。其中一组工作于定压定频（CVCF）模式，主要为水泵、油泵等恒频负载供电；另一组工作于变压变频（VVVF）模式，负责驱动各类冷却风机等变频负载^[3]。辅助变流器首先将直流输入经 DC-AC 逆变转换为三相 PWM 波，再经降压变压器隔离变压及滤波电容滤波后，输出标准的三相 380V 交流电源，以驱动机车辅助负载^[4]。现有的辅助单相接地检测方案，通常在降压变压器二次侧（Y 型接法）的中性点串接高阻值的接地电阻及电流传感器。其工作原理为：当辅助系统发生单相接地故障时，回路中产生零序电流并流经中性点，电流传感器检测到该电流后触发系统报警。然而，这种基于总回路检测的常规方式存在明显的局限性，即其仅能监测到系统发生了接地故障，却无法准确识别出具体发生故障的负载支路，导致故障定位困难。

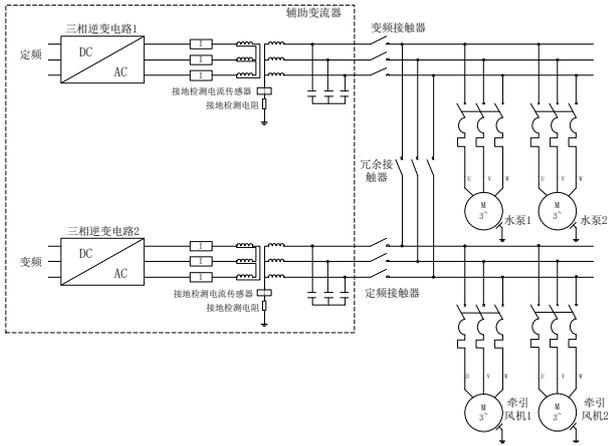


图 1 现有机车辅助单相接地检测原理

3 改进型辅助单相接地检测

针对常规检测方法的不足，本文提出了一种改进的检测方案。如图 2 所示，改进后的系统在原有的高阻检测支路（R1）基础上，并联了一条由低阻值电阻（R2）与接触器串联构成的“定位支路”。同时，在辅助变流器输出侧的每一个负载支路断路器前端，均独立安装了一只穿心式零序电流互感器（TA），用于采集各支路的零序电流信号。

3.1 基于零序电流的接地选线原理

当三相辅助系统发生单相金属性接地故障时，故障相对地电压降为零，非故障相对地电压升高为线电压（即升高 $\sqrt{3}$ 倍），导致三相电压系统失去平衡，中性点发生电位漂移，从而产生零序电压。此时，系统的电容电流分布随之改变：故障相的对地电容电流被短路，而非故障相的电容电流则经由大地、故障点及电源中性点构成闭合回路。由于三相电容

电流的矢量和不再为零，零序电流互感器的环形铁芯中将感应出磁通，进而在二次侧产生感应电压，驱动保护元件动作^[5]。

改进方案的具体检测逻辑如图 3 与图 4 所示。当系统正常运行时，中性点仅通过高电阻 R1 接地，用于实时监测系统对地绝缘状态。一旦 R1 支路检测到中性点电压偏移（即发生单相接地），系统将启动定位程序：闭合 R2 支路的接触器，投入低电阻。由于 R2 阻值较低，它将在中性点与大地之间形成一条低阻抗通路，显著放大故障回路中的零序电流（包含有功分量与电容分量）。这一放大的零序电流信号能够被故障支路对应的零序电流互感器准确捕获，从而实现故障定位^[6]。

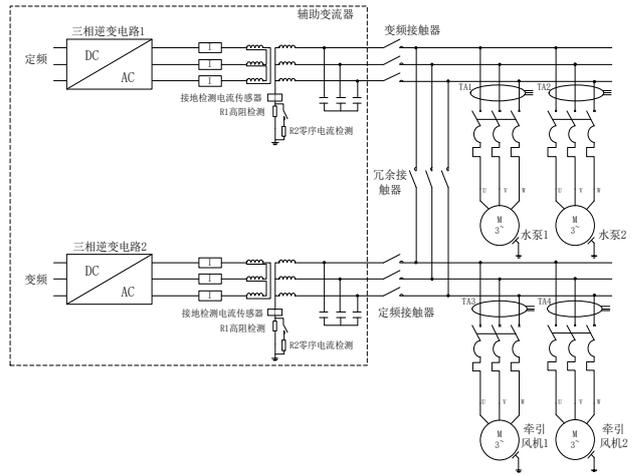


图 2 改进型辅助单相接地检测

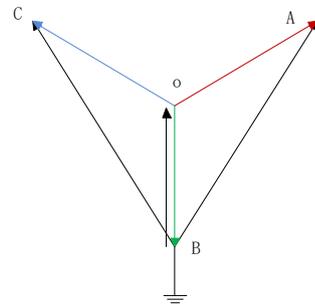


图 3 发生单相接地时各相对地电压

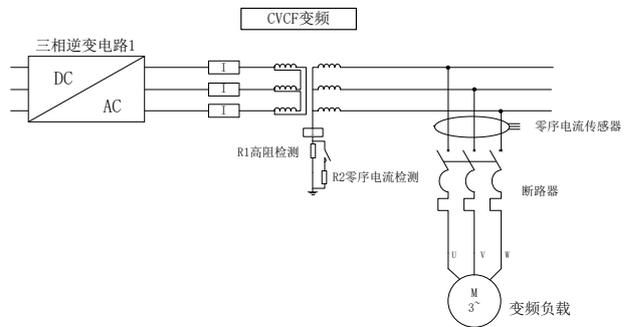


图 4 中性点接地检测原理

相比于采用三只普通电流互感器组成的“零序电流过

滤波器”，直接采用单只穿心式零序互感器可以有效消除因互感器特性不一致而产生的“不平衡电流”误差，且接线更为简洁可靠。整个检测过程基于基尔霍夫电流定律（KCL），即流入电路任一节点的复电流代数和为零^[7]。

通过该机制，当监测到某冷却风机或泵类负载发生单相接地，监控屏立即提示司机隔离该特定支路。司机断开对应断路器后，系统自动断开R₂接触器，恢复高阻监测状态。该方法无需停车，大幅提高了机车的运用效率。

3.2 零序回路电流的矢量分析

根据电路理论，电缆线路均存在对地分布电容^[8]。如图5所示，辅助变流器经由母线向多条支路供电。当某一辅助支路（设为第k路）发生单相接地故障时，系统中各支路的零序电流分布呈现以下特征：

非故障支路：流经该支路零序电流互感器的电流，仅为该支路本身的对地电容电流。由于电缆较短，该电流幅值极小且方向由母线流向线路。

故障支路：流经故障支路零序电流互感器的电流，是系统中所有非故障支路对地电容电流之和与中性点电阻支路（R₁//R₂）提供的电阻性电流的矢量和。其幅值远大于非故障支路，且方向相反。

利用上述电流幅值与相位的显著差异，配合改进后的低阻放大电路，即可精准判别出发生接地的具体支路。

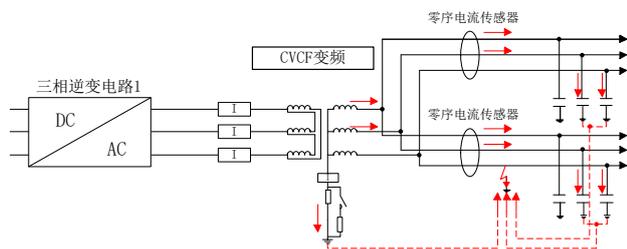


图5 发生单相接地时各支路零序电流通路

3.3 R₁ 高电阻参数选取原则

高阻监测电阻（R₁）的选取需充分考虑辅助系统的对地分布电容特性。当系统发生单相接地时，非故障相电压升高会导致各支路产生不对称的零序电容电流。R₁的取值应遵循“阻性电流与容性电流相匹配”的原则，既要限制长时间接地的故障电流以防止元件损坏，又要确保中性点偏移电压足够被检测电路识别。

系统对地电容主要由电缆、变压器绕组及电机绕组的对地电容构成，其中电缆电容占主要部分。电缆对地电容电流为：

$$I_c = 0.1U_e L = 0.1 * 0.38 * 0.2 = 0.0076A \quad (1)$$

式中：I_c为电缆电容电流；U_e为额定线电压，单位为kV；L为电缆长度，单位为km^[9]。

基于上述电容电流的估算值，为保证监测灵敏度，R₁的阻值一般选取小于15000Ω：

$$R_1 = \frac{220}{0.0076 * 2} = 15000\Omega$$

当发生单相接地时，由于I_c通常较小，仅靠R₁回路往往难以驱动零序保护装置动作，这也是必须引入低阻定位支路的原因。

3.4 TA选型与R₂零序电阻匹配设计

零序电流互感器（TA）的低电流传输特性是影响检测精度的关键因素。由于互感器存在励磁阻抗，当一次侧零序电流幅值过低（如小于5A甚至1A）时，大部分电流将作为励磁电流损耗，导致二次侧输出严重失真。研究表明，在低电流工况下，常规零序电流互感器的变比误差可达10%以上，相位角误差达20'以上，极端情况下甚至无二次电流输出，从而导致漏判或误判^[10]。

为了解决这一问题，本方案采用“依据TA线性区反推电阻阻值”的匹配设计原则：

1.TA选型：优先选用量程适中（如5A）且在小电流段具有较好线性度的零序电流互感器。

2.R₂阻值整定：根据TA的最佳工作电流范围确定R₂的阻值。若TA的额定测量范围上限为5A，为保证可靠检测，设计目标电流可设定为3A左右（即位于量程的60%处，避开低端非线性区）。

此设计确保了当R₂投入时，流经故障支路互感器的电力机车电流足以使其工作在准确的线性区域，从而实现准确列车正线运行定位。

4 结论

电力机车辅助系统单相接地故障的精准定位，对于保障列车正线运行安全及提高检修效率具有重要意义。针对现有监测策略仅能提示系统接地而无法识别具体故障支路的缺陷，本文提出并设计了一种基于改进零序电路的故障定位方法。通过在辅助变流器中性点构建高/低阻切换回路，并配合各负载支路的零序电流互感器，利用低阻状态下放大的零序电流特征，实现了对故障支路的快速、准确选线。分析与论证表明，该方案不仅克服了传统人工排查方式耗时长、效率低的弊端，而且能够在不中断机车运行的前提下完成故障隔离，显著降低了因辅助系统故障导致的行车中断风险。该检测方案原理清晰、硬件改造成本可控，为电力机车辅助系统的智能化保护与运维提供了有效的技术参考。

参考文献

- [1] 张磊. HXD1c型电力机车辅助变流器故障分析及处理[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2020(5): 011-011.
- [2] 傅曲武. HXD3C型电力机车辅助变流装置接地故障分析及改进[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(S01): 66-6884.
- [3] 赵卫. HXD3CA型电力机车辅助变流器故障分析与处理[J]. 铁道机车与动车, 2023, (10): 43-45.
- [4] 惠代其, 张宇龙, 李东. 机车辅助变流器及其控制系统设计[J]. 电力电子技术, 2020, 54(8): 29-3157.