

10 kV 铁路输电线路故障信息综合处理系统研究

邵华平¹, 何正友², 钱清泉², 覃 征¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西南交通大学电气化自动化研究所, 610031, 成都)

摘要: 通过对 10 kV 铁路自闭、贯通输电线路特点的分析, 研究了其相间短路、单相接地等不同故障的特性, 并在此基础上设计了故障信息综合处理系统. 该系统通过分析采集到的数据, 由远方控制单元判定故障类型且将故障数据报文送往调度中心, 该中心根据判据判定出故障区段: 对于相间短路, 调度中心会自动启动相应的程控卡片, 快速切除故障区段; 对于单相接地, 在工作站上会自动报警. 同时, 为系统设计了换相算法、单相接地算法和故障检测判别流程等. 换相算法以配电所为参考来拟订其物理相序, 其余开关站或配电所的物理换相位置则通过矩阵与配电所参考物理相位置的乘积获得. 试验和现场运行表明, 该系统可以有效、及时、准确地判别故障位置和故障相以及故障类型等, 大大缩短了故障查找的时间.

关键词: 输电线路; 故障信息; 远程传输单元; 调度中心

中图分类号: U2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)08 - 0869 - 04

Comprehensive Research on Transmission Line Fault Information for 10 kV Railway Power System

Shao Huaping¹, He Zhengyou², Qian Qingquan², Qin Zheng¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China; 2. Institute of Electrification and Automation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Through the analysis of the traits of 10 kV railway auto-blocking and continuous feed line, the characteristics of different faults such as short circuit between phases and grounding failure of single phase were researched. On this basis, a fault information process system was designed. After analyzing of the data acquisition, the remote transmission unit of this system can judge the fault style and send the data to the scheduling center by which the fault section can be judged. If it is a short circuit between phases, the center can startup the corresponding program control card to separate rapidly the fault section and give an alarm about the condition of phase grounding. Several critical technologies used in this system such as phase switch algorithm, fault detection and flow estimation, and single phase grounding algorithm were discussed. The test and field operation indicate that this system can estimate fault section, fault phase and fault type efficiently, accurately and rapidly, and the fault search time is greatly shortened. The system can increase both of economic and social benefits.

Key words: power transmission line; fault information; remote transmission unit; scheduling center

铁路信号电源是列车指挥信号的供电系统, 它需要自闭和贯通两路供电线路. 铁路电力自闭、贯通线的负荷沿铁路线分布, 点多、容量小且故障频繁. 10 kV 铁路自闭、贯通线属于小电流接地系统, 目前

在自闭线路上装有老式的保护装置, 当线路发生故障, 特别是发生单相接地故障时, 难以判断故障发生位置, 也难以及时排除故障. 据此, 本文通过分析相间短路、单相接地等不同故障的特性, 建立了由各开

收稿日期: 2003 - 10 - 20. 作者简介: 邵华平(1974~), 男, 博士生; 覃 征(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70271058).

关站的远程传输单元(RTU)、通信通道、调度主站三大部分的故障综合处理系统。

1 10 kV 自闭、贯通线路的特点

目前的自闭、贯通电网具有如下特点。

(1) 为中性点不接地的小电流系统,正常运行时系统无零序电压和电流。当发生单相接地时,对负荷供电没有影响,一般情况下允许再继续运行 1~2 h。

(2) 输电线路较长。根据 TB10008-99《铁路电力设计规范》的要求,供电臂长宜为 40~60 km,但有的地方可长达 70~80 km^[1,2]。

(3) 供电的点多、负荷小。10 kV 自闭、贯通电网专为自动闭塞装置供电,其经过的车站都有接入点,且负荷较小。

(4) 运行环境差,维护困难。部分线路采用电缆传输,电缆一般埋在地下,所以它受地质、气候的影响较大,日常维护也很困难。

在现有的保护装置下,当发生相间短路时,母线侧断路器跳闸,这会引发大面积停电,扩大故障影响范围。因此,有必要研究和开发新的 10 kV 自闭、贯通线路故障的综合分析处理系统,以实现故障区段的自动准确判断和迅速隔离,减小故障影响范围,缩短故障查找时间。

2 自闭、贯通线路故障分析

线路故障一般可分为三大类,即单相接地故障、相间过流故障和断线。在各开关站、变电所及配电所能提供相电压、零序电压、相电流及零序电流互感器的条件下,可判定三相短路(三相接地短路)、两相短路、两相接地短路、单相接地、断线等故障。下面分别讨论其故障特征。

2.1 相间短路

相间短路包括两相相间短路、两相接地短路、三相相间短路、三相接地短路,如图 1 所示。设故障发生在第 J 与第 $J+1$ 个站之间,则其故障特征可归纳为表 1。

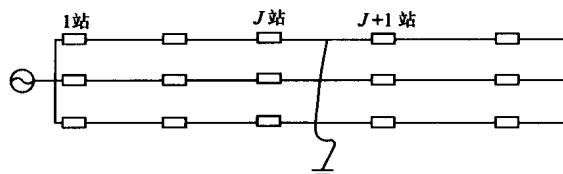


图 1 自闭、贯通线路的故障分析示意图

2.2 单相接地

当无电抗器补偿的系统发生单点直接接地、经过渡电阻的单点接地以及两点异地接地等情况时,可以利用故障点前后零序电流和零序电压呈现相位差相反等特性进行区段判断。系统有电抗器补偿时,故障区段判断必须利用故障点两侧的零序 5 次谐波电压与电流相位差相反的特性。此特性详见表 2。

3 故障综合处理系统设计

3.1 故障区段检测

各个子站通过对采集到的电流、电压测量值进行分析、计算、比较,由如图 2 所示的 RTU 判定出故障类型,并将故障类型标志与加有时标的故障数据报文一同送往调度中心。调度中心收到故障数据报文后,根据故障的类型选择相应的判据,判定出故障区段。单相接地可根据当时配电系统的工况,选择最优故障区段的判别方案来判断单相接地故障区段。

3.2 故障切除与隔离

对于各种相间(含接地)短路,调度中心根据判断出的故障区段,自动启动相应的程控卡片,操作相

表 1 自闭、贯通线路的短路故障特征

	故障特征	描述
两相相间短路	$I_1^{(p)}, I_2^{(p)}, \dots, I_J^{(p)} \quad I_{DZ}$ $I_{J+1}^{(p)}, I_{J+2}^{(p)}, \dots < I_{DZ}, p$ 为故障相 $I_{01}, I_{02}, \dots = 0; V_{01}, V_{02}, \dots = 0$	故障相电压降低,第 J 站(包括 J 站)之前的所有站的故障相有故障电流,之后的站无故障电流。
两相接地短路	$I_1^{(p)}, I_2^{(p)}, \dots, I_J^{(p)} \quad I_{DZ}$ $I_{J+1}^{(p)}, I_{J+2}^{(p)}, \dots < I_{DZ}, p$ 为故障相 $I_{01}, I_{02}, \dots > 0; V_{01}, V_{02}, \dots \quad U_{DZ}$	故障相电压降低,第 J 站(包括 J 站)之前的所有站的故障相有故障电流,之后的站无故障电流。系统有零序电流 I_{DZ} 和零序电压 U_{DZ} 。
三相相间短路	$I_1^{(p)}, I_2^{(p)}, \dots, I_J^{(p)} \quad I_{DZ}$	故障相电压降低,第 J 站(包括 J 站)之前的所有站的故障相有故障电流,之后的站无故障电流。
三相接地短路	$I_{J+1}^{(p)}, I_{J+2}^{(p)}, \dots < I_{DZ}, p$ 为故障相 $I_{01}, I_{02}, \dots = 0; V_{01}, V_{02}, \dots = 0$	故障相电压降低,第 J 站(包括 J 站)之前的所有站的故障相有故障电流,之后的站无故障电流。

表 2 自闭、贯通线路单相接地故障特征

故障特征	
单相单点直接接地	(1)故障后端线路零序电流的大小等于本线路的接地电容电流,故障前端线路零序电流的大小等于同一母线上所有非故障线路零序电流之和,也是所有非故障线路的对地电容电流之和。 (2)故障前端线路零序电流的相位滞后零序电压 90°;故障后端线路零序电流的相位超前零序电压 90°。
单相单点经过渡电阻接地	(1)故障前端线路零序电流的相位滞后零序电压 90°,故障后端线路零序电流的相位超前零序电压 90°。 (2)接地电阻不影响零序电流与零序电压的相位关系,只影响幅值和初始相位角。
单相两点(或多点)异地接地	(1)第 1 个故障前端线路零序电流的相位滞后零序电压 90°;第 2 个或最后一个故障后端线路零序电流的相位超前零序电压 90°。 (2)两接地点间的零序电流与零序电压的相位差与接地电阻、线路对地电容等有关。
中性点经消弧线圈接地系统单相单点直接接地	中性点经电抗补偿的系统发生单相接地时,网络中零序电流和零序电压的 5 次谐波与不加电抗补偿的系统零序电流和零序电压相位具有相同的特性。

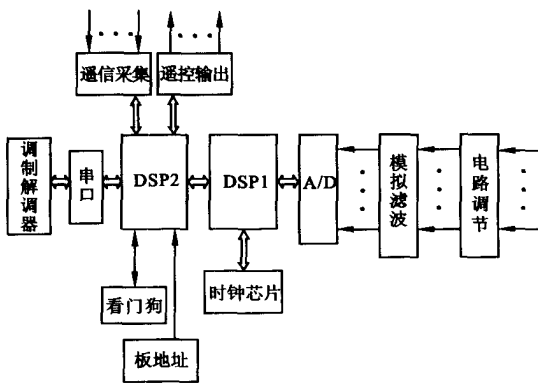


图 2 RTU 体系结构

应的开关站开关,快速切除故障区段,以保证其他电站正常工作。对于单相接地,在调度中心的调度员工作站上会自动弹出报警窗,对单相接地故障、故障相和故障区段给予声音提示,供调度员选择。

基于以上原理和分析,10 kV 自闭贯通线路故障综合处理系统应由调度中心、通信系统和分布于各配电所的 RTU 子站 3 部分组成,整个系统沿用原 SCADA 系统的体系结构。调度中心的典型系统配置如图 3 所示,它可以是环型接线或 T 型接线。

4 技术关键

4.1 换相算法

由于 10 kV 自闭、贯通线路通常为架空传输线,每隔一定距离存在换相操作,这将导致各开关站、配电所的物理相存在不对应问题(见图 4),因此必须

建立物理相和参考相的对应关系。为此,特设计如下换相算法。

(1)以配电所为参考,拟订其物理相序(A\B\C),其余开关站或配电所的物理换相位置用一矩阵 D 与配电所参考物理相位置值相乘得到,如开关站 1、开关站 2、开关站 3 分别表示为

$$\begin{bmatrix} A(1) \\ B(2) \\ C(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(1) \\ B(2) \\ C(3) \end{bmatrix}$$

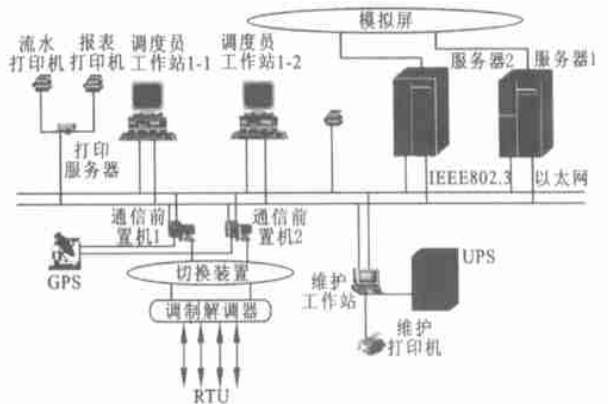


图 3 调度中心的典型系统配置

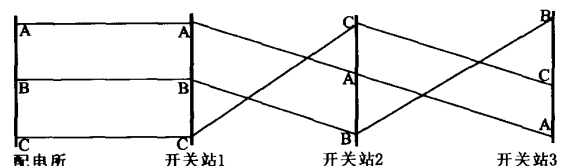


图 4 换相示意图

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} C(3) \\ A(1) \\ B(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(1) \\ B(2) \\ C(3) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} B(2) \\ C(3) \\ A(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(1) \\ B(2) \\ C(3) \end{bmatrix} \end{cases}$$

(2) 矩阵 D 可以由单相接地实验或单相故障信息获得, 即

$$D = \{d_{ij}\} = \begin{cases} d_{ij} = 1, i = n, j = m \\ d_{ij} = 1, i = \text{mod}[n + 1], j = \text{mod}[m + 1] \\ d_{ij} = 1, i = \text{mod}[n + 2], j = \text{mod}[m + 2] \\ d_{ij} = 0, \text{其他} \end{cases}$$

式中: m 为基准配电所测得的接地相; n 为对应开关站测得的故障相; $\text{mod}[\cdot]$ 表示对值取模, 若该值大于 3 则对 3 取余数。

实测的基准站 (示意图中的配电所为 B 相接地或用数字表示为第 2 相接地, $m = 2, A = 1, B = 2, C = 3$) 为某一开关站 2, 测得其第 3 相接地 ($n = 3$), 按算法则有

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

由 $D[1 \ 2 \ 3]^T$ 可得实际相序 $[3 \ 1 \ 2]^T$, 即实际为 B 相接地。

4.2 故障区段判别流程

在系统运行中, 由于通道的原因, 可能有 RTU 的故障检测信息不能及时准确地传送到调度中心, 为提高系统的容错性和检测能力, 特别设计了检测流程, 如图 5 所示。

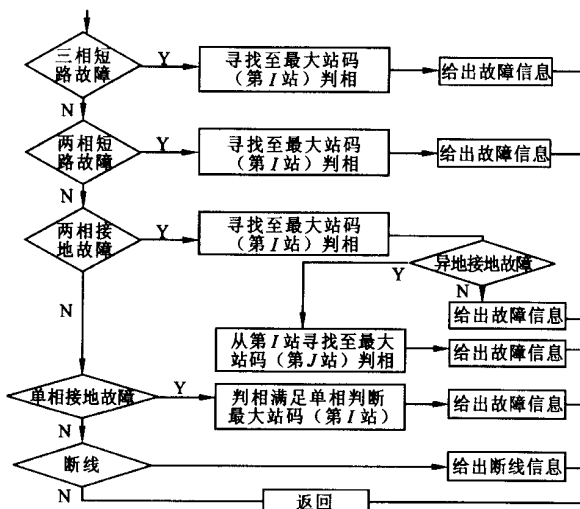


图 5 故障位置判断流程

4.3 单相接地

我国现有的小电流接地系统故障选线大多采用基于稳态分量的分析方法, 其中: 幅值比较法的精度和准确度较低; 相位比较法由于时延效应, 很可能引起误选; 基于零序电流高次谐波 (以 5 次谐波为主) 的原理实现故障选线, 也因零序电流谐波分量的成分小、易于受干扰等原因, 使得选线在实际运行中易发生误判^[3,4]。实际的自闭、贯通线路的单相接地故障表明, 接地的电容电流的暂态成分往往比稳态分量大几倍或者更多, 提取这一突变的暂态特征分量将有助于故障区段的检测。本系统设计的 RTU 测量单元采用具有高速数字信号处理能力的 DSP 作为主 CPU, 它具有强有力的电流电压特征提取能力。除了常规的基于稳态零序电流特征幅值和相位计算检测外, 本系统还增加了基于小波分析的暂态特征提取功能。该功能主要利用故障点前一个站和后一个站测得的微弱零序电流、零序电压中的暂态相位部分特征, 应用递归小波变换提取不同频段微弱零序暂态电流与电压的相位关系, 再将这种关系转换成故障特征量, 所有的特征量经通信通道送往调度中心, 调度中心用开关站 RTU 上送的特征信息, 结合多种判别方法, 给出故障特征。

5 结 论

铁路 10 kV 自闭、贯通线路是为铁路信号供电的重要电网, 对该线路的监视控制、故障检测、故障定位是至关重要的。本文通过对相间短路、单相接地故障等特性的分析, 建立了基于各开关站 RTU、通信通道、调度主站 3 部分组成的故障综合处理系统; 应用小波分析、信号处理、智能判别等技术, 可对故障位置、故障相以及故障类型作出有效、及时、准确的判别。现场运行表明, 该系统可大大缩短故障查找时间, 显著提高了供电可靠性。

参考文献:

- [1] 李瑞生, 王玉国, 熊章学, 等. 适用于铁路自动闭塞及电力贯通线路的微机保护的研究 [J]. 继电器, 2001, 29 (2): 39 - 41.
- [2] TB10008 - 99, 铁路电力设计规范 [S].
- [3] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述 [J]. 继电器, 2001, 29(4): 16 - 20.
- [4] 林功平. 配电网馈线自动化解决方案的技术策略 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7): 52 - 55.

(编辑 苗 凌)