

高速铁路全并联 AT 牵引网状态测控方案与仿真分析

王旭光, 李群湛, 陈民武, 易东, 崔中一

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为了有效提高牵引网的供电可靠性和持续性, 针对现有高速铁路牵引变电所继电保护系统所存在的不足, 提出了一种全并联 AT 牵引网状态测控系统方案。通过阐述其基本原理和系统构成, 利用故障潮流符号值法, 给出了各种类型牵引网短路时的故障判断方法。结合牵引网分段供电, 对一实际工程算例进行了 Matlab/Simulink 建模和仿真分析。结果表明, 该模型能够实现故障切除与恢复供电, 达到了缩小停电范围和提高牵引网供电可靠性的目的, 验证了该方案的正确性和有效性。

关键词: 牵引网; 高速铁路; 测控系统; 故障潮流; 分段供电

A scheme of state measure and control of all-parallel AT traction network for high-speed railway and simulation analysis

WANG Xuguang, LI Qunzhan, CHEN Minwu, YI Dong, CUI Zhongyi

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to improve power supply reliability and continuity of traction network effectively, for the lack of relay protection system in traction substation of the existing high-speed railway, a scheme of measure and control system for state of all-parallel AT traction network is proposed. Through expounding its basic principles and system structure, using fault current symbol value, the methods judging the failure of traction network occurring various types of short-circuit are given, combined with power supply of traction network segmentation, a Matlab/Simulink simulation model is built and analyzed for an practical engineering example. The results show that the model can realize the fault removal and service restoration, reduce the range of power failure and reach the purpose of improving power supply reliability of traction network, which verify the correctness and effectiveness of the scheme.

Key words: traction network; high-speed railway; measure and control system; fault current; power supply of segmentation

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2016)01-0128-06

0 引言

目前我国高速铁路普遍采用全并联 AT 供电方式, 其具有输送功率大、供电距离长、接触网电压损失低等优点^[1], 但由于 AT 牵引网本身结构的复杂性, 当其发生短路故障时, 对故障的判断及故障类型的辨识存在一定难度^[2-3]。基于目前牵引网继电保护方案, 发生各种类型短路故障均将导致牵引变电所馈线断路器跳闸, 同时 AT 所和分区所设置的失压保护启动, 使整个供电臂中断供电, 造成停电范围较大, 需要经历复杂的倒闸作业, 才能恢复供电。因此, 加强对 AT 牵引网的保护是提高整个牵引供电系统供电可靠性的最有效途径^[4-5]。

本文针对一种全并联 AT 牵引网状态测控系统方案开展研究, 首先, 阐述了其基本原理和系统构成; 其次, 基于故障潮流符号值法, 给出了各种类型牵引网短路时实际的故障判断方法, 并结合牵引网分段供电, 实现了故障切除与恢复供电, 达到缩小停电范围和提高供电可靠性的目标; 最后, 结合实际工程算例, 建立了 Matlab/Simulink 仿真模型, 仿真结果验证了该方案的正确性和有效性。

1 全并联 AT 牵引网测控系统

1.1 全并联 AT 牵引网测控系统基本原理

全并联 AT 测控系统的功能是对 AT 牵引网运行状态的进行实时监测辨别, 当发生故障时, 准确快

速的判断故障区段, 故障类型, 及时将故障支路隔离, 保证整个 AT 牵引网中正常区段的供电可靠性。

1.1.1 故障潮流符号值法

(1) 潮流符号值的标定

在 AT 牵引网发生短路故障的情况下, 标定接触网 T 支路和负馈线 F 支路的空载潮流符号值为 0, 流入支路的故障潮流符号值记为 1, 流出支路的故障潮流符号值记为 -1^[6]。

潮流符号值根据潮流方向而得, 潮流方向的判断依据是各测试端口电压与电流相位差值的绝对值, 即 $\Delta\phi = |\phi U - \phi I|$ 。

对于接触线 T, 规定:

1) 支路靠近变电所侧

电压与电流相位差值的绝对值小于等于 90° 时, 潮流方向为流入支路, 符号值为 1; 大于 90° 时, 潮流方向为流出支路, 符号值为 -1。

2) 支路远离变电所侧

电压与电流相位差值的绝对值小于等于 90° 时, 潮流方向为流出支路, 符号值为 -1; 大于 90° 时, 潮流方向为流入支路, 符号值为 1。

由于 AT 牵引供电系统中, 接触线 T 与负馈线 F 电压相位差 180° , 所以负馈线 F 潮流方向的判断与接触线 T 相反。T 线与 F 线潮流方向及符号值如图 1 所示。

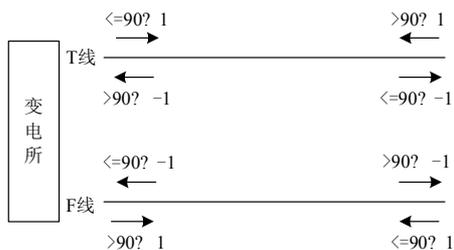


图 1 T 线、F 线潮流方向与潮流符号值

Fig. 1 Direction and symbol value of power flow of T-line and F-line

(2) 基于故障潮流符号值法的短路故障辨识

由 AT 牵引网结构知, 短路故障的典型类型可以分为以下几种: 接触线 T 对钢轨 R 短路; 负馈线 F 对钢轨 R 短路; 接触线 T 与负馈线 F 短路。

正常情况下, 当发生以上短路故障时, 短路区间的潮流方向及其符号值如图 2 所示。

可知, 当发生短路故障时, 通过计算线路两侧故障潮流符号值和值的绝对值 f , 则有:

若 $f = 0$, 则判定该支路内无故障;

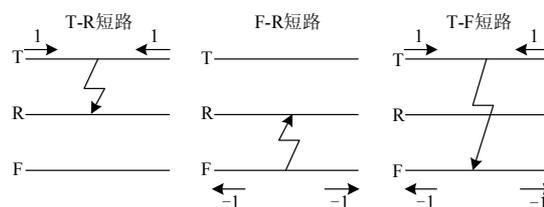


图 2 典型类型短路故障潮流符号值

Fig. 2 Fault current symbol value of typical type short-circuit

若 $f = 2$, 则判定该支路内为接触线 T(或负馈线 F)对钢轨 R 短路;

若 $f = 4$, 则判定该支路内为接触线 T 与负馈线 F 短路。

故可据此来判断 AT 牵引网短路故障状态, 从而对相应故障区段实施保护。

1.1.2 牵引网分段供电原理

分段供电即是将牵引网供电单元适当划小, 这样不仅为及时发现、隔离和排除故障提供了可能, 并可把故障及其影响范围限制到最小, 能进一步提高系统的可控性、可维护性与供电可靠性^[7]。

分段可根据具体情况进行划分, 常见方式如下:

(1) 自然分段处: 分区所、复线铁路上下行、AT 供电方式的 AT 段。

(2) 以区间(10 km 左右)为单元对牵引网进行纵向分段。

(3) 接触网锚段可视为一个最小分段。

(4) 单边供电的一个供电臂可视为一个最大分段。

1.2 全并联 AT 牵引网测控系统构成

为实现全并联 AT 牵引网测控系统达到保护牵引网的目的, 对整个测控系统进行了设计^[8-12]。主要由三部分组成: 底层测控装置, 高速数据通道, 上层控制终端, 如图 3 表示。

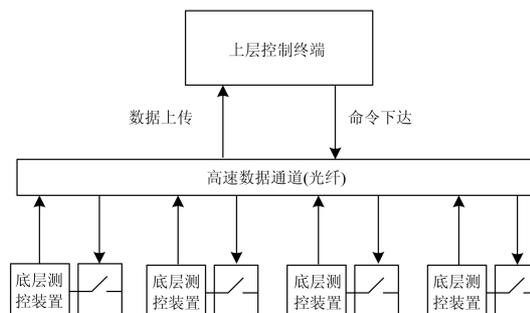


图 3 测控系统结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of measure and control system

(1) 底层测控装置

主要作用是对数据采集处理并执行上层控制终端的动作命令。

全并联 AT 牵引网测控系统需要对 AT 牵引网运行状态进行实时监测。首先将 AT 牵引网进行自然分段,划分为 AT 段后,测控装置对每一个 AT 段的接触线 T 和负馈线 F 两端的电气量(电压电流的幅值和相位)进行实时同步数据采集和上传,包括线路上的潮流符号值。AT 段用 $ATab$ 表示,其两端的断路器分别为 $KTab$ 、 $KFab$ ($a=1,2$; $b=1,2,3\cdots$)。其中, a 表示上下行, 1 表示上行, 2 表示下行; b 表示自耦段(断路器)编号。断路器的开关是由上层控制终端下达动作命令, 底层测控装置执行, 实现 AT 段分支线路的投切。全并联 AT 供电系统底层测控装置布置图如图 4 表示。

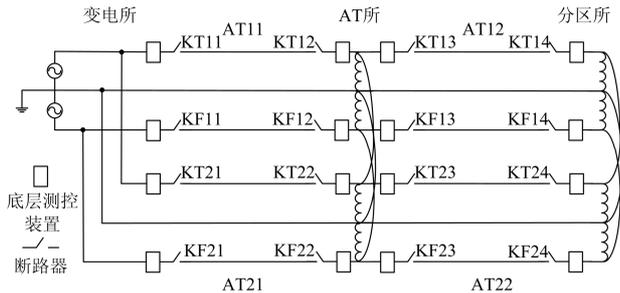


图 4 测控系统底层测控装置布置图

Fig. 4 Layout of underlying measurement and control device of measure and control system

(2) 高速数据通道

主要作用是实现底层测控装置与上层控制终端的双向通信。

光纤传输具有衰减小、频带宽、抗干扰性强、安全性能高、体积小、重量轻等优点, 并且目前高速铁路系统主要采用基于同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)对固定站与站之间、固定设备之间进行组建, 实现通信, 是一种成熟的光纤通信技术。其为测控数据传输提供了必要的基础, 故全并联 AT 牵引网测控系统采用光纤作为高速数据传输和通信通道。

(3) 上层控制终端

主要作用是对底层测控装置采集的数据进行集合分析、处理与判断, 并进行控制命令的下达。

上层控制终端将底层测控装置采集上来的实时数据进行集合分析, 辨识 AT 牵引网运行状态。当牵引网发生故障时, 上层控制终端通过测控装置上传的电气量与潮流符号值判断出故障线路, 故障类型, 并将控制命令下达给底层测控装置, 由底层测控装置控制断路器开关将故障支路切出, 对故障支路实施保护。

1.3 测控系统工作原理流程

全并联 AT 牵引网测控系统的工作原理流程图如图 5 所示。

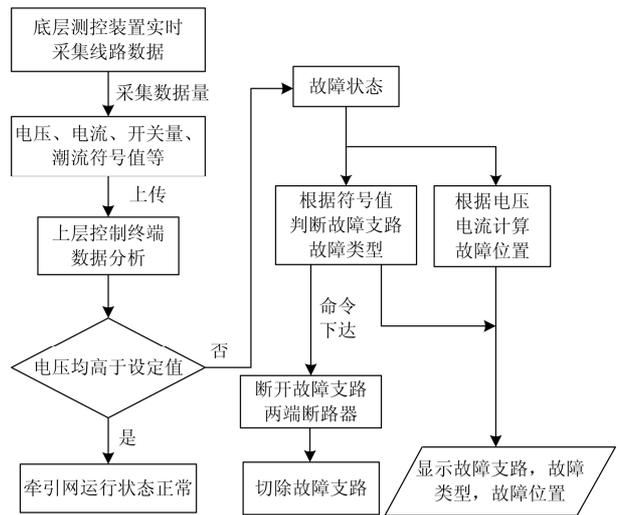


图 5 测控系统工作原理流程图

Fig. 5 Schematic diagram and flowchart of measure and control system

具体步骤如下:

(1) 底层测控装置实时采集各端口(变电所、AT 所、分区所)的接触网 T、负馈线 F(对钢轨)电压互感器 Y_n 检测出的电压值, 与流过 T、F 的电流值, 同时判断潮流符号值, 并将采集的数据上传, 上层控制终端对数据进行分析处理。

(2) 当各端口电压全部高于设定值(以 $17\text{ kV}^{[13]}$ 为例)时, 牵引网处于正常运行状态, 根据各支路两端符号值来判断运行状态。

(3) 当各端口任一电压值小于设定值(17 kV)时, 牵引网发生故障: 短路。上层控制终端计算各自耦段支路两端的故障潮流符号值的和值: 若支路的故障潮流符号值的和值的绝对值大于等于 1, 则判定为故障支路。

(4) 确定故障支路(T 线或 F 线)后, 上层控制终端向故障支路两端的底层测控装置下发控制命令, 断路器先分闸, 再重合, 重合成功, 则恢复正常, 重合失败, 则令该 AT 段 n 两端的接触网断路器 $KTab$ 和负馈线断路器 $KFab$ 一起分闸, 切除故障支路, 使线路恢复正常工作状态。

2 全并联 AT 测控系统短路故障仿真与结果分析

为验证和分析该系统能够准确切除故障线路的有效性, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建了全并联 AT

牵引网测控系统仿真模型。其中牵引变电所电源侧电压为 220 kV, 最小短路容量为 6 704 MVA; 牵引变压器采用 Vx 接线方式, 其额定容量 40 MVA; AT 变压器额定容量为 8 MVA; 牵引网模型参数依据为合肥—蚌埠一条实际运行线路参数, 基于 Carson 理论计算得带保护线的复线全并联 AT 牵引网单位长度(1 km)阻抗参数, 每个 AT 段距离为 10 km 并进行模块封装, 上下行分别有 2 个 AT 段; 光纤传输时间在建模中忽略; 底层测控装置和上层控制终端均由自行构建设计来实现。

本文在三个不同位置进行了牵引网典型短路故障仿真, 即 5 km 处 T-R 短路、7 km 处 F-R 短路和 13 km 处 T-F 短路。

(1) 全并联 AT 牵引网上行第一个 AT 段(AT11) 5 km 处发生 T-R 短路

如图 6 所示, 给出了发生短路时 T 线电压及短路点处 T 线两侧的电流波形图和上层控制终端的控制命令波形图。仿真短路故障发生在 0.1 s 时刻, 仿真时间为 0.27 s。

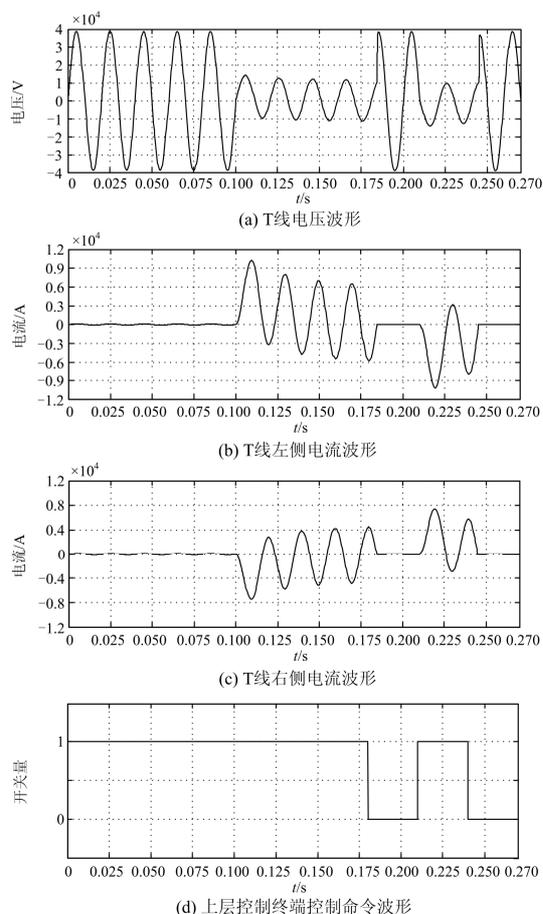


图 6 AT11(5 km)T-R 短路 T 线电压电流及控制命令波形图

Fig. 6 Voltage, current and control command waveform of T-line of T-R short-circuit in AT11(5 km)

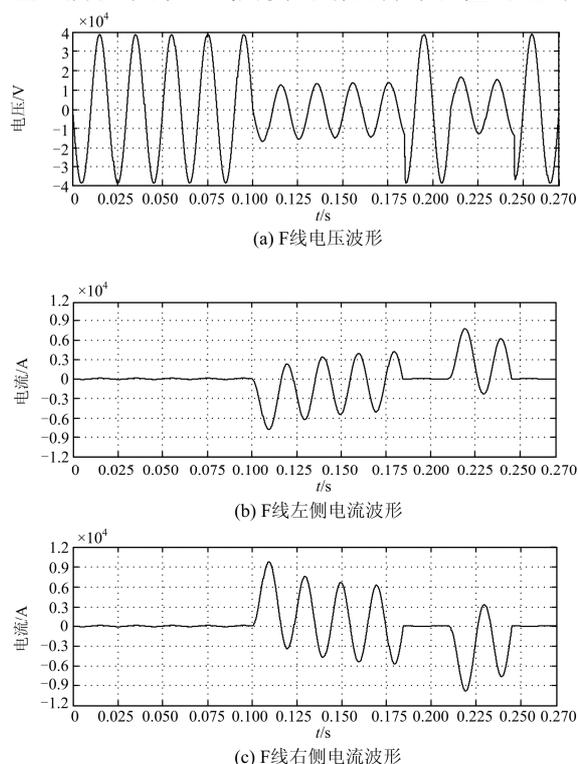
由图 6 可以看出, 在 0.1 s 时刻发生短路故障, 电压跌落到 17 kV 以下, 上层控制终端判断此时牵引网发生了短路故障。在 0.1s 时刻发生短路故障后, T 线两侧潮流方向相反, 由两侧向短路故障点流入, 所以故障 T 线两侧的潮流符号和值的绝对值为 $|+1|=2$ 。上层测控终端通过上传的符号值, 判断 AT11 发生了 T-R 短路, 上层控制终端向 AT11 接触线 T 两侧的底层测控装置发送动作命令, 断开断路器, 在 0.18 s 时刻将故障支路切除。

上层控制终端在 0.21 s 时刻发送重合闸命令。由于 0.1 s 时刻发生的为永久性短路故障, 故重合闸后线路仍处在短路故障状态中, 在 0.24 s 时刻, 上层测控中心再次向底层测控装置发送动作命令, 断开断路器, 将故障支路暂时隔离。上层控制终端控制命令波形图如图 6 (d) 所示。

(2) 全并联 AT 牵引网上行第一个 AT 段(AT11) 7 km 处发生 F-R 短路

如图 7 所示, 给出了发生短路时 F 线电压及短路点处 F 线两侧的电流波形图和上层控制终端的控制命令波形图。仿真短路故障发生在 0.1 s 时刻, 仿真时间为 0.27 s。

由图 7 可以看出, 在 0.1 s 时刻发生短路故障, 电压跌落到 17 kV 以下, 上层控制终端判断此时牵引网发生了短路故障。在 0.1 s 时刻发生短路故障后, F 线两侧潮流方向相反, 由短路故障点向两侧流出, 所以故障 F 线两侧的潮流符号和值的绝对值



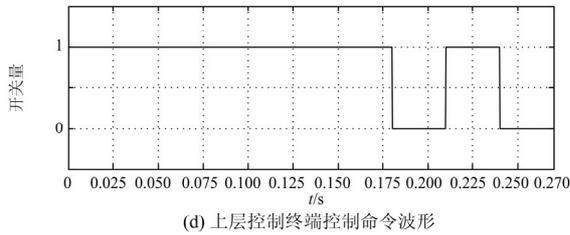


图 7 AT11(7 km)F-R 短路 F 线电压电流及控制命令波形图
Fig. 7 Voltage, current and control command waveform of F-line of F-R short-circuit in AT11(7 km)

为 $-1+(-1)=2$ 。上层测控中心通过上传的符号值，判断 AT11 发生了 F-R 短路，上层控制终端向 AT11 负馈线 F 两侧的底层测控装置发送动作命令，断开断路器，在 0.18 s 时刻将故障支路切除。

上层控制终端在 0.21 s 时刻发送重合闸命令。由于 0.1 s 时刻发生的为永久性短路故障，故重合闸后线路仍处在短路故障状态中，在 0.24 s 时刻，上层测控中心再次向底层测控装置发送动作命令，断开断路器，将故障支路暂时隔离。上层控制终端控制命令波形图如图 7(d)所示。

(3) 全并联 AT 牵引网上行第二个 AT 段(AT12) 13 km 处发生 T-F 短路

如图 8 所示，给出了发生短路时 T、F 线电压及短路点处 T、F 线两侧的电流波形图和上层控制终端的控制命令波形图。仿真短路故障发生在 0.1 s 时刻，仿真时间为 0.27 s。

由图 8 可以看出，在 0.1 s 时刻发生短路故障，T 线电压与 F 线电压同时发生跌落低于 17 kV，上层控制终端判断此时牵引网发生了短路故障。

在 0.1 s 时刻发生短路故障后，T 线两侧潮流方向相反，由两侧向短路故障点流入，故障 T 线两侧的潮流符号和值的绝对值为 $|1+1|=2$ ；而 F 线两侧潮流方向相反，由短路故障点向两侧流出，故障 F 线两侧的潮流符号和值的绝对值为 $-1+(-1)=2$ 。故此时 T 线和 F 线的潮流符号值和值的绝对值为 $|2+2|=4$ ，上层控制终端通过上传的符号值，判断 AT12 发生了 T-F 短路，上层控制终端向 AT12 接触线 T 与负馈线 F 两侧的底层测控装置发送动作命令，断开断路器，在 0.16 s 时刻将故障支路切除。

上层控制终端在 0.2 s 时刻发送重合闸命令。由于 0.1 s 时刻发生的为永久性短路故障，故重合闸后线路仍处在短路故障状态中，在 0.24 s 时刻，上层测控中心再次向底层测控装置发送动作命令，断开断路器，将故障 T 线与 F 线暂时隔离。上层控制终端控制命令波形图如图 8 (g)所示。

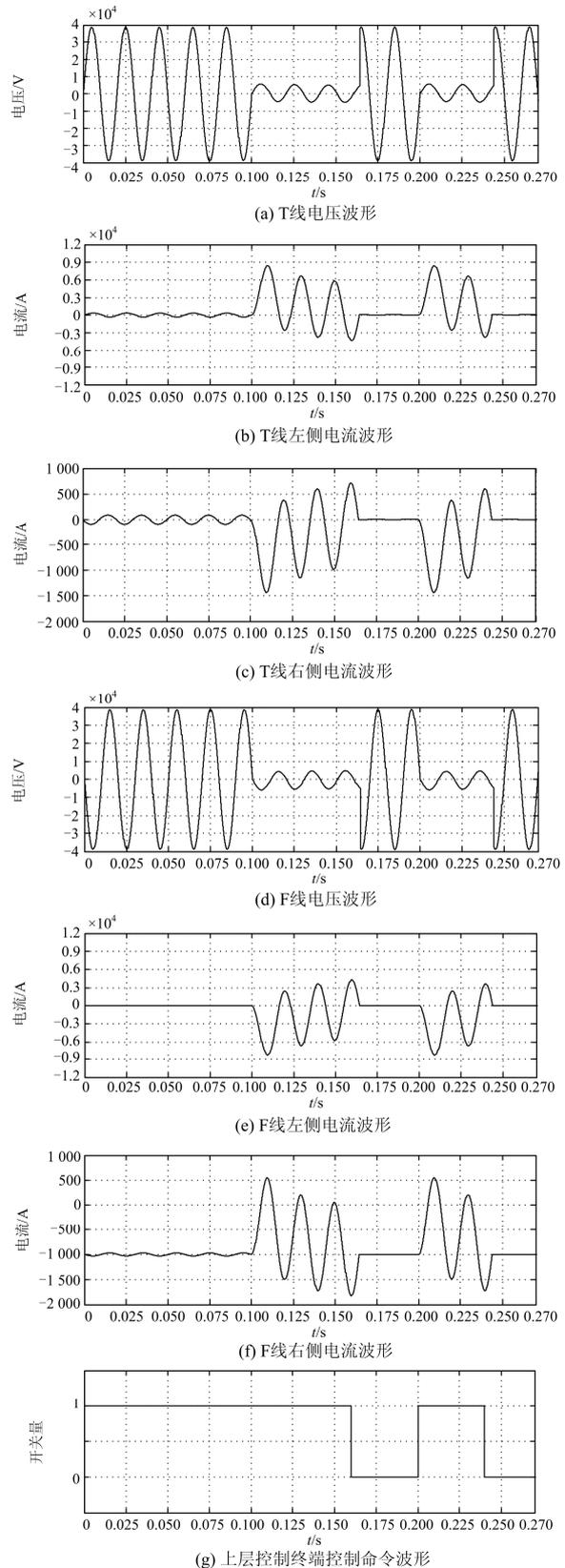


图 8 AT12(13 km)T-F 短路 T、F 线电压电流及控制波形图
Fig. 8 Voltage, current and control command waveform of T-line and F-line of T-F short-circuit in AT12(13 km)

可见, 通过在三个不同位置进行了牵引网典型短路故障(T-R、F-R、T-F 短路)仿真, 所搭建的测控系统均能实现可靠保护动作, 验证了上述牵引网状态测控方案的正确性和有效性, 实现了对故障支路切除、隔离并重新恢复供电, 最大限度缩小停电范围, 有利于保证牵引供电系统的供电可靠性。

3 结论

针对现有对 AT 牵引网保护的不足, 研究了一种全并联 AT 牵引网测控系统方案, 利用故障潮流符号值对短路故障进行识别和判断, 结合实际算例, 基于 Matlab/Simulink 平台构建了牵引供电系统仿真模型, 对典型短路故障类型进行仿真分析, 验证了其基本原理和 workflow。目前课题组正在开展上述牵引网供电状态测控系统样机的研发, 相关算法和功能的也在进一步完善, 以满足在某高速铁路试验段开展工程试验的要求。

参考文献

- [1] 李群湛. 我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题[J]. 铁道学报, 2010, 32(4): 117-124.
LI Qunzhan. On some technical key problems in the development of traction power supply system for high-speed railway in China[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(4): 117-124.
- [2] 林国松, 高仕斌, 李群湛. 基于故障分量相关分析的供电牵引网异相短路保护[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 82-85.
LIN Guosong, GAO Shibin, LI Qunzhan. Protection against wrong phase coupling of power traction system based on correlation analysis of fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 82-85.
- [3] 钱澄浩, 何正友, 胡海涛, 等. 一种牵引网故障定位的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 21-25, 30.
QIAN Chenghao, HE Zhengyou, HU Haitao, et al. A new method of fault location for traction network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 21-25, 30.
- [4] 李群湛, 郭锴, 周福林. 交流电气化铁路 AT 供电牵引网电气分析[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(1): 1-6.
LI Qunzhan, GUO Kai, ZHOU Fulin. Analysis of AT power supply network in AC electrified railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(1): 1-6.
- [5] 陈民武. 基于 GO 法的高速铁路牵引变电所可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 56-61.
CHEN Minwu. The reliability assessment of traction substation of high speed railway by the GO methodology [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 56-61.
- [6] 李群湛, 陈民武, 黄彦全. 高速铁路全并联 AT 牵引网状态测控方法研究[J]. 电气化铁道, 2014(增刊): 11-15.
LI Qunzhan, CHEN Minwu, HUANG Yanquan. Study on methods of measure and control in all-parallel AT traction network for high speed railways[J]. Electric Railway, 2014(S): 11-15.

- [7] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 559-568.
LI Qunzhan. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 559-568.
- [8] 刘育权, 华煌圣, 李力, 等. 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 112-122.
LIU Yuquan, HUA Huangsheng, LI Li, et al. Research and application of multi-level wide-area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 112-122.
- [9] 李勇, 王江峰, 何正友, 等. 高速铁路牵引供电系统动态模拟综合实验系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 123-128.
LI Yong, WANG Jiangfeng, HE Zhengyou, et al. Design and implementation of integrated dynamic simulation experiment system of high-speed railway traction power supply system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 123-128.
- [10] 李俊刚, 张爱民, 彭华夏, 等. 区域层次化保护系统研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 34-40.
LI Jungang, ZHANG Aimin, PENG Huaxia, et al. Research and design of zone area hierarchical protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 34-40.
- [11] 何志勤, 张哲, 尹项根, 等. 集中决策式广域后备保护的分区模型与优化算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 212-219.
HE Zhiqin, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Partition model and optimization algorithm for wide-area backup protection based on centralized decision-making mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 212-219.
- [12] 李俊刚, 张爱民, 张杭, 等. 广域保护系统数据网络可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 344-350.
LI Jungang, ZHANG Aimin, ZHANG Hang, et al. Reliability evaluation of the wide area protect system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 344-350.
- [13] 铁道部建设管理司. TB10009-2005 铁路电力牵引供电设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2005.
Construction Department of the Ministry of Railways. TB10009-2005 design specification for railway traction power supply[S]. Beijing: Ministry of Railways of the People's Republic of China, 2005.

收稿日期: 2015-03-25; 修回日期: 2015-05-13

作者简介:

王旭光(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统理论; E-mail: wxg551133@163.com

李群湛(1957-), 男, 博士, 教授, 研究方向为牵引供电系统理论、电能质量与控制等;

陈民武(1983-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为牵引供电理论与新技术及电能质量预测、评估与控制技术等。

(编辑 张爱琴)