

文章编号:1005-0523(2013)03-0012-05

地铁三轨供电系统的仿真与直流馈线保护的研究

杨丰萍, 杨 扬, 龚 正

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:首先介绍了地铁供电系统的构成,简要分析了DC1500V三轨牵引供电的基本原理。利用MATLAB/Simulink工具建立某条实际运行的DC1500V三轨供电方式的地铁线路数学模型,对不同点的短路电流和列车启动电流仿真分析后,举例说明了如何通过对电流上升率、电流增量和电流上升持续时间的测量来区分故障情况和正常运行的情况。为地铁馈线保护的配置提供了实用的理论基础。

关键词:地铁供电系统;启动电流;短路电流;馈线保护

中图分类号:TM77

文献标志码:A

随着我国经济的发展,城市交通日趋紧张,而城市轨道交通,尤其是地铁作为一种大运量、高密度的交通工具迅速发展,并被越来越广泛地应用。为保证地铁牵引供电系统安全、可靠地向列车供电,直流牵引供电系统的保护装置发挥着至关重要的作用。我国直流牵引供电系统的研制与开发起步较晚,直流馈线保护装置大都采用进口设备,价格昂贵且维护困难,但随着我国在这方面需求的日益增大,发展生产具有自主知识产权的直流牵引供电保护系统,对我国今后城市轨道的发展具有重要意义。

1 地铁牵引供电系统

地铁供电系统是整个地铁的重要组成部分,主要分为电源系统、牵引供电系统和动力照明系统三部分^[1]。城市轨道交通的牵引变电所一般采用2台整流变压器和4台整流器构成整流机组,将外部电源接入10 kV交流电转换成750 V或1 500 V的直流电,经过直流馈线,向接触网或第三轨供电,地铁车辆就是通过接触网或第三轨获得电能。

地铁牵引供电系统采用直流供电制式,相对于交流供电而言,直流供电具有调速范围广、易于控制、牵引网结构简单、电压质量高等优点^[2]。近年各个国家与地区修建的地铁多采用DC 750 V第三轨供电和DC1500V接触网供电以及正在兴起的DC1500V三轨供电制式。对于新兴采用

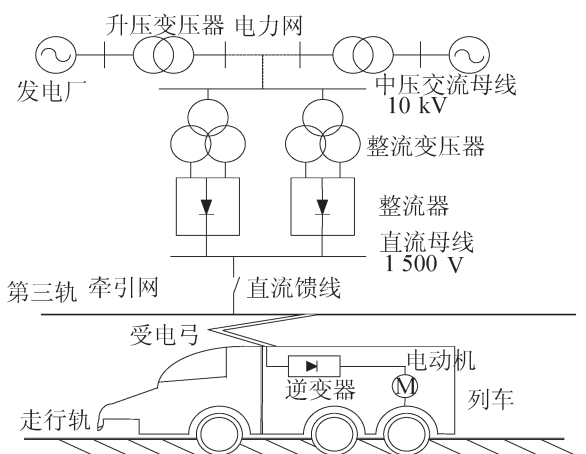


图1 DC1500V三轨地铁牵引供电系统原理图
Fig.1 Schematic diagram of DC1500V triple rail metro traction power supply system

收稿日期:2013-03-02

作者简介:杨丰萍(1967—),女,教授,硕士,研究方向为交通信息工程及控制,电力牵引及传动。

DC1500V 三轨供电方式的牵引供电系统(如图1),由于其自身结构的差异,导致其故障形式与接触网式供电有所不同。因此对采用此种方式供电的系统进行直流短路故障分析以及保护配置的研究是十分必要的。文献[3]仅介绍了DC1500V 三轨供电的基本原理,文献[4]仅介绍了 di/dt 及电流增量保护的基本原理和整定方法,未建立具体的模型讨论参数设置。本文选取某一实际运行的DC1500V 三轨地铁线路的一个区间配置 di/dt 及电流增量保护(主保护)的详细方案,并对其启动过程和短路故障仿真分析,得出保护的整定值,通过区分启动电流与故障电流来对整定值设置的正确性和合理性加以验证。

2 di/dt 及电流增量保护(DDL保护)

国外在城市轨道交通发展初期主要通过电流速断保护和过电流保护来切断短路故障^[5],效果并不理想。随着电力电子技术及计算机技术的发展,采用微机控制的保护装置大大提高了直流牵引供电系统保护装置的可靠性和准确率。以 di/dt 及电流增量保护为例,详细分析其控制原理,阐述其如何区别DC1500V 三轨供电系统中短路电流和列车启动电流以及一些负载小电流,用于线路中的短路故障保护。

di/dt 及电流增量保护由瞬时跳闸和延时跳闸两部分组成,瞬时跳闸响应线路近端短路故障,能够迅速发现并切除故障。延时跳闸通过延时时间 T 可以把短路电流和启动电流及负载小电流区分开来,用于线路中、远端保护。保护特性如下:

当初始电流上升率很大时,满足 $di/dt > E$ (电流上升率启动值),一旦电流增量 ΔI 也达到启动电流 $E_{\Delta I}$ (电流增量启动值),则通过瞬时跳闸切除短路故障;当初始电流上升率较小时,满足 $F < di/dt < E$ (F 为电流上升率返回值),为了区分短路小电流和负载电流,电路上升率将会被保护系统监视一段时间,一旦到延时时间 T 则将电流增量 ΔI 与电流增量返回值 $F_{\Delta I}$ 相比较,若 $\Delta I > F_{\Delta I}$,将通过延时跳闸切除故障。

1) 根据以上分析,可以得到瞬时跳闸和延时跳闸保护动作方程:

瞬时跳闸动作方程

$$\begin{cases} di/dt > E \\ \Delta I > E_{\Delta I} \end{cases}$$

式中: di/dt 为电流上升率; E 为瞬时跳闸电流上升率启动值; ΔI 为从 $di/dt > E$ 时刻开始的电流增量,即初始电流增量; $E_{\Delta I}$ 为瞬时跳闸电流增量启动值。

延时跳闸动作方程

$$\begin{cases} E > di/dt > F \\ \Delta I > F_{\Delta I} \\ t > T \end{cases}$$

式中: F 为延时跳闸电流上升率返回值; $F_{\Delta I}$ 为延时跳闸电流增量返回值; T 为延时跳闸整定时间; ΔI 为延时时间到达整定时间 T 时的电流增量。

2) 考虑到在列车正常运行状态下保护不应该误动作,以及当短路发生时故障线路应被立即切除, di/dt 及电流增量保护的整定原则如下:

di/dt 及电流增量保护算法流程框图如图2所示。

瞬时跳闸电流上升率启动值 E 的数值应

大于启动电流的最大电流上升率;延时跳闸电流上升率返回值 F 的数值应该小于远端短路电流的初始电

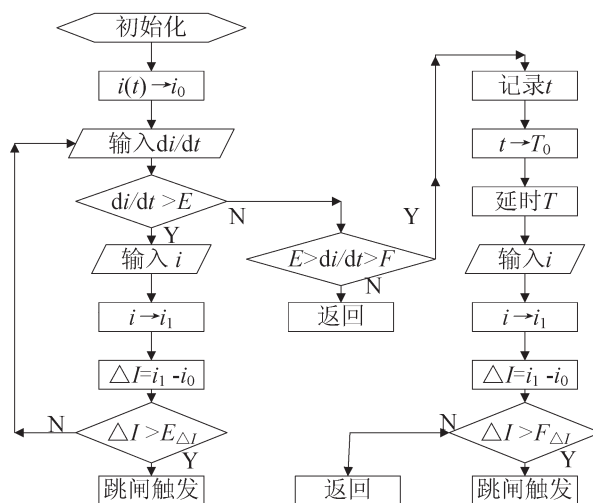


图2 di/dt 及电流增量保护算法流程框图

Fig.2 Flow diagram of di/dt and current increment protection algorithm

流上升率。

2) 瞬时跳闸电流增量启动值 $E_{\Delta I}$ 应大于启动电流和列车通过接触网分段时冲击电流的最大值;延时跳闸电流增量返回值 $F_{\Delta I}$ 的数值应小于远端短路电流的电流增量。

3) 考虑到列车通过接触网分段时列车内的滤波器有一个充电过程,所以延时跳闸时间 T 应保证大于半个列车谐振周期及误差值。

3 DC1500V 三轨系统的仿真分析与保护整定

在DC1500V三轨供电系统中,为防止保护装置误动作,必须正确区分机车的启动电流和远端短路故障电流。短路电流是对地铁牵引供电系统进行直流馈线保护配置的前提和重要依据,本文以等效24脉波整流机组为基础建立直响应流牵引变电所的仿真模型进行故障仿真分析。采用Matlab/Simulink软件建立模型得到DC1500V三轨供电系统各种工况下馈线电流、电压变化波形。仿真时牵引网电阻率取 $0.213 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$,走行轨兼作回流网,电阻率一般取为 $0.013 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$ 。馈线长度一般为2~4 km,仿真分析取为3 m。根据列车启动时与电源距离的不同,以及短路点位置的不同,可以分为近(0~1 km)、中(1~2 km)、远(2~3 km)端启动和近、中、远端短路。由于篇幅关系,本文仅给出远端启动和远端短路的仿真波形。

地铁整流器为无相控整流,即触发延迟角 $\alpha = 0$ 。在不考虑换相电抗的情况下,平均直流输出电压为

$$U_{d0} = \frac{12}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{24}}^{\frac{\pi}{24}} \sqrt{2} U \cos \omega t d(\omega t) = \frac{24\sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{\pi}{24} U$$

式中: U_{d0} 为平均直流输出电压; U 为输出电压有效值; ω 为角速度。

远方短路电流:

$$i(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = \frac{U}{R_s + R_t + R_r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\frac{L_s + L_t + L_r}{R_s + R_t + R_r}}} \right)$$

式中: R 为系统等效电阻之和; R_s 为牵引变电站等效电阻; R_t 为第三轨等效电阻; R_r 为走行轨等效电阻; L_s 为牵引变电站等效电感; L_t 为第三轨等效电感; L_r 为走行轨等效电感。

3.1 列车启动仿真

列车距电源2.5 km启动,线路电流波形、电机端电压波形如图3所示。列车启动大约耗时0.1 s,电动机两端电压在启动时有非常明显的下降,0.01 s时出现极小值856.7 V,较稳态电压小约470 V,电压下降率高达35.3%,因此在启动时必须考虑到继电保护装置中低电压保护可能误动作;启动电流在0.011 s时出现极大值957.5 A,0.053 5 s时出现极小值216 A,而稳态值约为240 A,极大值远远大于稳态值,在做继电保护整定仍应考虑启动时出现的过电流情况,以避免继电保护装置误动作。

3.2 系统短路仿真

DC1 500 V三轨供电系统发生短路,可认为是第三轨与走行轨间绝缘损坏。系统启动完成后,当短路点距电源2.5 km时,系统短路电流波形、电源端电压波形如图4所示。列车启动0.3 s后发生短路故障,电源端电压立即减小,随后稳定在1 370 V左右,电流在短路后迅速增大,稳态短路电流为2 400 A左右,为正常运行时稳态电流的十倍左右,且短路电流持续的时间相对较长。故继电保护装置中的电流上升率及电

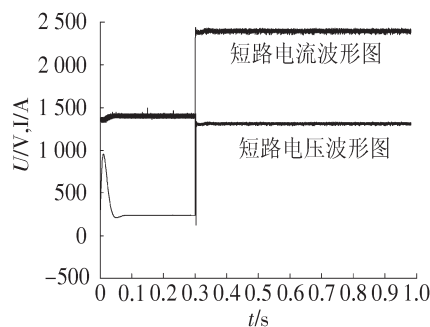


图3 列车启动线路电流、电压波形图
Fig.3 Graph of the trains start circuit current and voltage waveform

流增量保护可以发现短路情况,并延时切除故障线路段。

3.3 保护整定

对近、中端启动和短路做类似仿真分析可以得到列车在近、中、远三处启动的主要电气数据列于表1;近、中、远三处短路时的主要电气数据列于表2。可以发现,短路发生的瞬间,电流上升率很高,并且存在一个故障暂态冲击尖峰,该尖峰幅值远远超过稳态短路电流值,其特性取决于牵引变电站交直流阻抗的特性。随着故障点与电源点距离的增大,电流上升率及幅值均有所下降。列车启动时的最大电流增量 $\Delta I=1\,259\text{ A}$,最大电流变化率 $di/dt=100.72\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;系统短路时的最大电流增量 $\Delta I=9\,658\text{ A}$,最大短路电流变化率 $di/dt=2\,414.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。最小电流增量 $\Delta I=2\,148\text{ A}$,最短路电流变化率 $di/dt=1\,074\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

根据仿真数据以及 di/dt 与电流增量保护的動作方程和整定原则,可以计算出该保护的各項参数,见表3。由此完成 di/dt 及电流增量保护的配置方案,为下一步微机保护硬件设计提供数据支持。

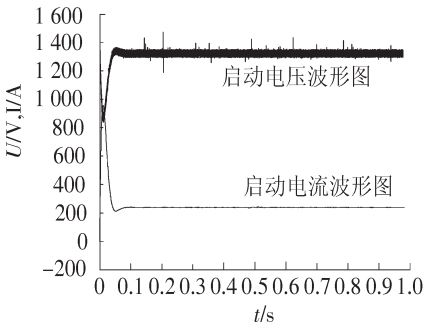


图4 系统短路电流电压波形图
Fig.4 Graph of system short-circuit current and voltage waveform

表1 近中远处启动时电气数据表
Tab.3 Start electrical data of near, medium or far distance

参数	近端启动	中端启动	远端启动
电机端电压稳态值/V	1 450	1 390	1 330
电流稳态值/A	240	240	240
电流极大值/A	1 259	1 090	957.5
电流极小值/A	17	149	216

表2 近中远处短路时电气数据表
Tab.2 Short-circuit electrical data of near, medium or far distance

参数	近端短路	中端短路	远端短路
电源端电压稳态值/V	1 180	1 350	1 370
稳态短路电流/A	9 600	3 850	2 400

表3 DDL 参数表
Tab.3 The DDL parameters

DDL参数	$E/(A\cdot ms^{-1})$	$F/(A\cdot ms^{-1})$	$\Delta I_1/kA$	$\Delta I_2/kA$	t/ms
数值	1 300	80	2.15	1.26	12.5

4 结束语

利用 MATLAB/Simulink 仿真软件,建立 DC1500V 三轨地铁供电系统的数学模型,得到直流馈线的机车启动电流和第三轨短路电流。通过分析这两种电流的电气量特征,并对馈线主保护之一的 DDL 保护的整定原则详细讨论,得出整定值,从而解决现有保护算法难以区分这两种电流的难题。由于本文采用的模型均是工程上的简化模型,在工程实践中应进一步提高计算精度。

参考文献:

- [1] 于松伟,杨兴山,韩连祥,等. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008:48-50.
- [2] 杜芳. 地铁机车建模及直流牵引供电系统故障分析[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [3] 王晓红. 地铁直流馈线保护研究[D]. 成都:西南交通大学,2002.
- [4] 刘臻,丁光发. 直流馈线DDL保护参数的设定[J]. 城市快轨交通,2005,18(4):23-24.
- [5] 徐劲松,高劲,江平,等. 浅析地铁直流牵引变电所的保护原理[J]. 电气化铁道,2003,6(3):13-15.
- [6] 周捷,宋云翔,徐劲松,等. 直流牵引供电系统的微机保护测控探讨[J];电网技术,2002,12(4):26-28.
- [7] 张秀峰,王毅非. 地铁馈线电流增量保护 ΔI 检出精度与分离方法的研究[J];西南交通大学学报:自然科学版,1997,1(5):11-14.
- [8] LI M X, HE J H, BO Z Q, et al. Simulation and algorithm development of protection scheme in DC traction system[C]//Pow-ertech, 2009 IEEE Bucharest, Bucharest: IEEE power tech, 2009: 1-6.

A Research of Subway Triple Rail Power Supply System Simulation and DC Feeder Protection

Yang Fengping, Yang Yang, Gong Zheng

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This thesis firstly introduces the construction of metro power supply system and analyzes briefly the basic principle of DC1500V triple rail traction power supply. By establishing the mathematical model of DC 1500V triple rail power supply circuit based on MATLAB/Simulink and conducting the simulation and analysis of different short circuit currents and train starting current, this paper illustrates how to distinguish between the fault and normal conditions on the basis of current increase rate, increment and rise duration, which may lay some theoretical basis for the metro feeder protection configuration.

Key words: metro power supply system; starting current; short circuit current; feeder protection