

牵引馈线短路故障的Matlab仿真与分析

李学武, 索娜

(郑州铁路职业技术学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 牵引馈线短路类型包括瞬时性故障和永久性故障两类, 区分瞬时性故障和永久性故障是实现牵引馈线自适应重合闸的关键。该文阐述了在 Matlab 软件平台上构建牵引供电系统模型的步骤与方法, 并进行了实例计算。仿真结果表明, 短路后的故障电压波形可以作为区分短路故障类型的判据。

关键词: 牵引馈线; SimPowerSystem; 仿真; 短路故障; 电弧模型

MATLAB simulation and analysis of short circuit faults of the tractive feeder

LI Xue-wu, SUO Na

(Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The types of the short circuit faults of the tractive feeder includes the transient and permanent faults. The division of the transient faults from the permanent faults is the sticking point of the realization of the adaptive auto-reclosure of the tractive feeder. This paper expounds the process and means to construct the model of the tractive power system with employing MATLAB software and carries through the calculation with an instance. The simulation results show that the voltage waveform of the short circuit faults could be the criterion of the division of the types of the short circuit faults.

Key words: tractive feeder; SimPowerSystem; simulation; short circuit faults; arc model

中图分类号: TM76

文献标识码: B

文章编号: 1003-4897(2007)15-0050-04

0 引言

向电气化铁路供电的牵引供电系统由分布在铁路沿线的牵引变电所及沿铁路架设的牵引网组成。牵引变电所的功能是将三相 110 kV 或 220 kV 高压交流电变换为两个单相 27.5 kV 的交流电, 通过牵引馈线向铁路上、下行两个方向的接触网(额定电压为 25 kV)供电, 牵引变电所每一侧的接触网都称供电臂。牵引供电回路的构成是: 牵引变电所、牵引馈线、接触网、电力机车、钢轨与大地、回流线。图 1 所示为直接供电方式的牵引供电系统图^[1]。

在牵引网故障中, 就其故障性质来说, 分为瞬时性与永久性故障两类。瞬时性故障是大气过电压造成的绝缘子闪络、线路对树枝放电, 大风引起的碰线、鸟害等造成的短路等, 约占总故障次数 80%~90%以上; 永久性故障由支柱倾倒、刮弓断线、绝缘子击穿或损坏等引起。

为避免瞬时性故障引起的停电事故, 传统的自动重合闸只能在不清楚故障性质的情况下盲目进行, 当重合于永久性故障时对系统稳定和电气设备所造成的危害将非常严重。

牵引供电系统容量大、电压高, 进行科研试验

的条件难以满足, 系统的安全运行也不允许进行短路试验。因此, 运用计算机仿真技术建立模型并进行仿真试验, 是重要方法与手段。

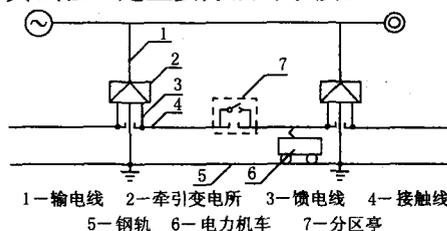


图1 直接供电方式的牵引供电系统图

Fig.1 Tractive supply system with direct supply type

目前, 电力系统仿真软件有很多, Matlab 以其强大的计算功能、友好的动态仿真环境和丰富的工具箱越来越成为从事包括电力网络、电力电子和控制系统等电力系统学习和研究的重要仿真工具。

本文应用 Matlab 软件的电力系统工具箱 SimPowerSystem 对三相牵引变电所单边供电牵引供电系统以及在该系统牵引网上发生的接地故障进行仿真。SimPowerSystem 是一种针对电力系统的可视化建模与仿真工具, 主要由加拿大魁北克电力公司和 TECSIM International 公司共同开发。仿真结果的有效性已被加拿大魁北克电站的运行数据、

试验数据以及其仿真实验室提供的数据所证实^[2]。

1 牵引网接地短路的物理过程分析

我们可以以时段 I、时段 II 和时段 III 依次表示牵引网接地开始到故障点消失后的过程。

时段 I (从牵引网发生接地短路到馈线断路器跳闸): 在此时段, 瞬时性故障和永久性故障下电弧的变化是不同的, 永久性故障情况下弧光会很快熄灭, 因此可被认为是经过一个线性电阻接地; 瞬时性故障下电弧会经历熄灭、重燃、再熄灭、再重燃等数个周期, 因此, 瞬时性故障必须要用一个非线性电阻来模拟。牵引网接地后, 在接地点有无电弧的产生必然对接地牵引网两端的电压和电流波形产生影响。

时段 II (从馈线断路器跳开到瞬时性故障点消失): 馈线断路器跳开后, 除了开断时故障牵引网上残存电荷建立的直流残压外, 相邻牵引网通过耦合关系在断开牵引网上建立起一定幅值的电压, 我们一般称之为恢复电压。根据故障类型的不同, 相应的电流电压大小和波形也必然不同, 同时也会受到线路运行参数的影响。

时段 III (瞬时性故障点消失后, 或者永久性故障完全稳定后): 永久性故障稳定后, 故障相与健全相之间只有相间耦合联系, 健全相的电压和负载电流分别通过相间静电耦合和电磁耦合在被开断相上产生感应电压。瞬时性故障时, 接地处的电弧将消失, 线路绝缘恢复, 其恢复电压是电容耦合电压和电感耦合电压的相量和; 永久性故障时, 当接地电阻很小时, 可以不考虑电容耦合电压分量, 故障相两端的电压主要由电感耦合电压组成。在相邻牵引网同样运行状态下, 故障牵引网在瞬时性和永久性两种故障情况下所表现出来的恢复电压必然不同, 藉此也可区分瞬时性故障和永久性故障。

综上所述, 在故障发生后的三个时段, 瞬时性故障与永久性故障的电气参量均有所不同, 都可作为区分故障类型的判据。但是, 区分电气参量大小的变化需要参考具体线路的边界条件才能明确故障类型, 且具有不规则性; 而电气参量的波形却体现了不同的短路故障的本质特征, 也就是说, 大小只是一个量的变化, 但波形却代表着一个质的不同。

再从时间上来讲, 如果选择时段 I 就开始检测故障类型, 可以有更充足的时间判断故障类型, 确定重合与否。要在故障发生后即对故障类型进行判断, 必须从故障电压的波形来区分。因此, 在时段 I 通过检测波形的办法判断故障类型是最佳的选择。

在时段 I, 可以通过检测故障牵引网在瞬时性故障和永久性故障下的残压, 也可以检测故障牵引网的电流来判断故障类型。由于牵引变电所中一般只测量牵引母线电压, 而不测量某一馈线电压, 因此, 应当考虑设置馈线电压测量装置, 或者从馈线流互中获取电压。当然, 两种方法都要避免互感器饱和对波形产生的影响。

2 牵引供电系统仿真模型

本文以某牵引变电所为例, 其牵引供电采用单线直接供电单边供电的方式。该牵引变电所通过 100 km、110 kV 高压输电线路从地方电力系统获取三相工频交流电能, 变电所有两路进线电源, 设置两台牵引主变压器固定全备用, 其 110 kV 侧电气主接线采用最常见的双 T 接线, 运行方式为一路电源与一台牵引主变压器运行, 而另一路电源及另一台牵引主变压器备用。作为阶段性工作, 本文未考虑设置在牵引变电所中的并联电容补偿装置, 假定它们处于退出状态。其示意图如图 2 所示。

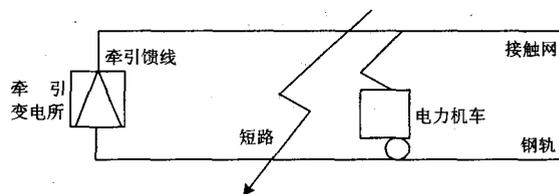


图 2 某牵引变电所供电系统示意图

Fig. 2 A certain tractive substation supply system

具体参数如下:

牵引主变: 接线方式: $Y_n, d11$

容量: 30MVA

阻抗: $Z_0 = R_0 + jX_0 = 0.249 + j3.9752$

牵引网: 单线、直接供电方式、单边供电

单位自阻抗: $Z_s' = 0.237 + j0.485 \Omega / \text{km}$

供电臂长度: $L = 33.8 \text{ km}$

电力机车: 等效阻抗: $Z_j = 88 + j66 \Omega$

为简化计算, 只考虑供电臂上有一台电力机车运行, B 相牵引网发生接地故障的情况, 将 B 相作为故障相, 进行接地短路的仿真计算。通过 Matlab 软件中的 SimPowerSystems 所仿真的系统模型如图 3 所示。

用一个故障断路器模型(QF_k)和一个接地电阻(R_k)来模拟牵引网发生的短路故障, 当模拟瞬时性故障时, 可以再串入一个电弧模型(Cassie arc

model)。其中故障断路器(QF_k)的闭合表示故障发生,断开表示故障切除。接地电阻(R_k)表示发生短路故障时的过渡电阻(根据牵引网运行经验取值),以Load元件仿真电力机车取流。接触网被平均分为L1~L5五段,以利于设置故障点位置和机车运行位置。

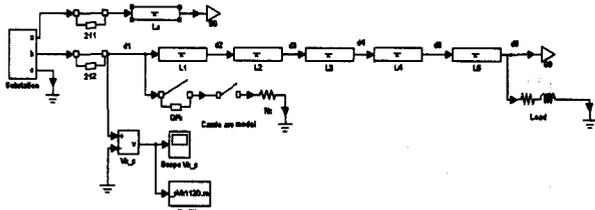


图3 仿真系统模型

Fig.3 Model of the simulation system

3 电弧模型的数字仿真

根据电弧特性可将瞬时性故障所产生的电弧分为一次电弧和二次电弧^[3]。

一次电弧是由于故障引起的,出现在故障发生到故障相断路器断开前(即前述时段I中产生的电弧),而二次电弧是在故障相断路器断开后,由健全相与故障相之间相互耦合而引起并维持的(即前述时段II、III中产生的电弧)。对于牵引供电系统,主要是一次电弧,对于复线电气化铁路可能存在二次电弧的现象。在某种程度上,如果时间间隔足够小,则外界条件可以假设成基本不变,此时一次电弧的动态行为与有约束的开关电弧行为相似。研究表明^[4]在此条件下电弧的动态特性可以由下面的电弧模型来模拟。

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{T} \left(\frac{u^2}{u_c^2} - 1 \right) \quad (1)$$

显然这是一个关于电弧动态导纳的微分方程,确定 T 、 u_c 就可以求解。本文采用了式(1)所示的电弧模型,对电弧进行数字仿真。

(1) T 的确定

T 反应了电弧伏安特性曲线中电压的上升速度,记为:

$$T = \frac{\alpha \times I_p}{L_p} \quad (2)$$

式中: I_p 为电弧伏安特性曲线中的峰值电流,可近似采用直接短路时的短路电流。 α 为经验值,可通过实验方法求得,当电弧电流的峰值在1.4~24 kA范围内, α 为 2.85×10^{-5} ; L_p 为电弧的长度也可以近似

为常数。

(2) u_c 的确定

大量实验研究表明^[19],对于大部分电弧,当电弧电流的峰值在1.4~24 kA范围内时,沿着主弧柱的单位长度的电压降与电弧电流无关,基本为常数,经验值为15 V/cm,所以有:

$$u_c = 15 \times L_p \quad (3)$$

以Matlab软件为平台,利用Simulink/SimPower Systems(电力系统模块库)中的元件建立的通用电弧模型如图4所示。电弧模型由电压控制的电流源(Controlled Current Source)、微分方程编辑器(DEE)、定值检测(Hit Crossing)、阶跃信号(Step)、电压测量(Voltage Measurement)等模块组成。

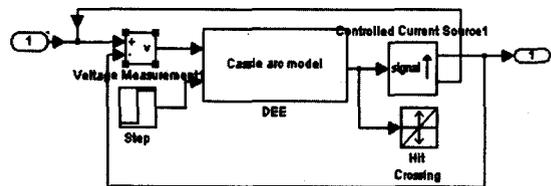


图4 电弧模型的实现

Fig.4 Realization of the arc model

牵引网的绝缘水平设计要求其绝缘泄漏距离应不小于100 cm^[1]。所以,牵引网绝缘闪络时,电弧长度至少为100 cm。由于外界环境的影响其长度还会发生改变,本文将电弧长度确定为100 cm进行仿真。 I_p 近似采用直接短路时的短路电流,由运行经验确定为8 kA。根据式(2)、(3)确定电弧参数 u_c 、 T 。由此完成对电弧数字仿真模型的设置。

4 仿真参数设置及仿真结果分析

设牵引网接地故障的开始时间为仿真开始后的0.01 s,因此,故障模拟断路器(QF_k)原始状态设置为分闸状态,仿真开始后的0.01 s闭合表示故障开始。馈线断路器(212)原始状态为合闸状态,仿真开始后的0.13 s分闸,表示由馈线继电保护装置反应牵引网故障而动作,作用于馈线断路器跳闸停电,包括馈线继电保护装置动作时间0.10 s和断路器分闸时间0.02 s两个部分。瞬时性故障时期设为8个工频周期(0.16 s),即仿真开始0.17 s后故障模拟断路器(QF_k)恢复为分闸状态,表示故障点完全熄弧,瞬时性故障消失。永久性故障的时期为 ∞ ,本文中故障模拟断路器(QF_k)闭合后直至仿真结束。

由于需取故障发生后而馈线断路器未跳闸前的时间段内的电压波形作为故障分析依据,所以设仿真时间为0.22 s。为反映各种故障对判断结果造成影响的因素,可以设置不同的故障性质、不同的故

障发生时间、不同的过渡电阻值、不同的故障地点以及故障时不同的电力机车取流状况,分别进行了接地短路故障的仿真计算。

永久性故障时馈线断路器出口处的电压波形如图 5 所示。在 0.01 s 时短路故障发生,电压急剧衰减,但波形并未发生明显畸变,在 0.13 s 时馈线断路器跳闸成功,电压几乎衰减为零。电压幅值大小取决于短路点位置以及过渡电阻大小。

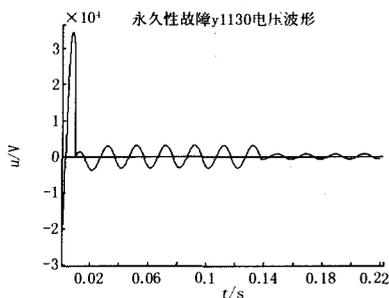


图5 永久性故障时牵引网电压波形

Fig.5 Voltage waveform of the tractive feeder when permanent faults

瞬时性故障时馈线断路器出口处的电压波形如图 6 所示。在 0.01 s 时短路故障发生,电压急剧衰减,但由于通过电弧接地,电弧的非线性特点使得波形发生明显畸变,电压幅值大小随着故障点位置以及过渡电阻大小不同而改变。在 0.13 s 时馈线断路器跳闸成功,电压继续衰减,并且波形畸变更加严重。0.17 s 时瞬时性故障消失,电压波形经过短暂调整后恢复正常。

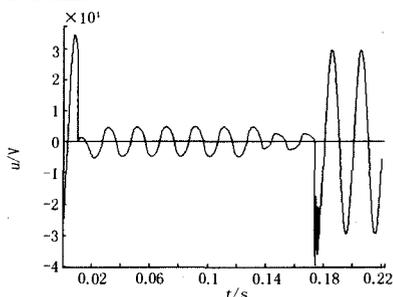


图6 瞬时性故障时牵引网电压波形

Fig. 6 The voltage waveform of the tractive feeder when transient faults

上述电压波形是在电源 A 相初相位为 0° 、短路点在供电臂首端、过渡电阻 1Ω 、一台电力机车在供电臂末端取流时仿真测得。其波形特点与前述

物理过程分析相符,同时与牵引变电所微机馈线保护的故障录波结果相一致。

对比图 5 和图 6 我们在直观上可以得到一个结论,就是瞬时性故障下故障牵引网电压波形的畸变程度比永久性故障下故障牵引网电压波形的畸变程度大,而且由于电弧电阻因素,其畸变所持续的时间要长一些。

在实际牵引供电系统中^[5],为了躲过电力机车内部故障时其自身保护动作时间(0.06~0.08 s),牵引馈线主保护动作时间一般设置为 0.1s,加上馈线断路器的分闸时间(约 0.02 s),这样从故障产生到断路器分闸成功,大概有 120 ms 的时间(即工频电压 6 个周期),可以通过波形特征判别区分牵引馈线短路故障类型,为是否进行重合闸提供判据。

参考文献

- [1] 吉鹏霄. 接触网[M]. 北京: 化工出版社, 2006.
JI Peng-xiao. Overhead Contact System[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [2] Power System Blockset for Use with Simulink. User's Guide Version 1[M]. 1998.
- [3] 范越, 施围. 小波变换在超高压输电线路单相接地故障类型判别中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(4): 18-22.
FAN Yue, SHI Wei. Single-Phase-to-Ground Fault in Extra-High-Voltage Lines[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(4): 18-22.
- [4] Johns A T, Agrarrwa R K, Song Y H. Improved Techniques for Modeling Fault Arcs on Faulted EHV Transmission System[J]. IEE Proc-Gener, Transm and Distrib, 1994, 141(2): 148-154.
- [5] 王永康. 继电保护及自动装置[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000. 51-52.
WANG Yong-kang. Relay Protection and Automatic Equipment[M]. Beijing: China Railway Press, 2000. 51-52.

收稿日期: 2006-05-24; 修回日期: 2007-06-04

作者简介:

李学武(1972-), 男, 讲师, 控制工程硕士, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

索娜(1973-), 女, 讲师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: sansanna@163.com