

# 牵引供电新型异相短路保护原理的研究

李冀昆, 高仕斌, 王涛

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 在建立电弧模型的基础上, 对异相电弧短路故障信号进行仿真分析, 证明原有的馈线保护原理存在缺陷。对牵引供电系统异相电弧短路故障发生时, 各相电压电流的谐波特点进行分析研究, 提出了通过检测异相短路两供电臂间电压来确认异相短路发生时的低压保护方案。通过对轻、重载和单臂、双臂工况下发生异相电弧短路故障时的两供电臂间相间电压仿真, 验证了该保护方案的正确性, 有效性和可行性。这种保护方案可作为牵引网异相短路的主保护, 并与牵引网馈线成套保护结合, 组成牵引网完整的保护策略。

**关键词:** 牵引供电系统; 异相电弧短路; 电弧模型; 谐波分析

## Research on new protection principle against wrong-phase short circuit of the AC traction supply

LI Ji-kun, GAO Shi-bin, WANG Tao

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

**Abstract:** The fault sign of wrong-phase arc short circuit is simulated and analyzed by building arc model. The flaw of the existing feeder protection principle is proved. Based on the analysis of the harmonics characteristics of each phase voltage and current that result from wrong phase arc short circuit, the low voltage protection principle by detecting the voltage between the two supply arms is proposed to confirm the appearance of wrong phase short circuit. The correctness, effectiveness and feasibility of the protection principle are verified by simulations of the voltage between the two supply arms in the conditions of the light load, heavy load, and one arm, two arms short circuit. This protection principle can be used as the main protection against wrong phase arc short circuit in traction network, and it can be combined with traction supply feeder complete protection to form a complete protection strategy.

**Key words:** AC traction supply system; wrong-phase arc short circuit; arc model; harmonic analysis

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0063-05

## 0 引言

牵引供电系统异相短路是一种危害很大的近区故障。日本和印度等国早就针对电气化区段所采用的主变压器接线形式和供电方式, 在牵引网考虑了异相短路的专门保护装置。对于这种故障, 在国内, 过去很长时间都没有引起人们的重视。我国牵引供电系统的异相短路, 其成因主要是受电弓电弧引起的。由于电弧电阻非线性、时变性、高阻等特点, 常规原理馈线保护中的阻抗保护、电流速断保护往往难以正确地反应动作。国内目前只有文献[1-4]进行了这方面的研究并提出了专门设置牵引网异相短路保护的方案, 但都存在着敏感度低, 难于整定的

缺陷。然而, 由于高阻电弧故障因电弧短路的条件、地点、状态和诱发原因各异, 呈现明显的随机性和时变性, 因此对高阻电弧故障保护成为继电保护所面临的一个急需解决又难于解决的问题。高阻电弧故障保护的问题, 在国外已经进行了大量的理论探讨和试验分析, 其中以美国 Texas A&M 大学的 B. D. Russell 为代表, 提出了一系列用于电力系统高阻故障检测的判据, 并有一些样机在试运行。高阻故障的检测方法主要有能量方法、随机方法、电弧相特性方法和频谱分析法。高阻电弧故障的保护对于国内外广大的继电保护工作者来说是一个比较复杂棘手的问题, 由于常规保护一般不能有效地识别这类故障, 这种潜在的隐患对系统所造成的危害有时是很难设想的, 因此这也是一个运营现场迫切需要解决的问题。本文从分析电弧电压的特征入手, 通过 Matlab/Simulink 工具进行仿真实验, 分析了异相

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金科技创新项目 (SWJTU09CX030)

短路发生时, 各供电臂电压的特征, 提出了新的异相短路保护方案, 同时考虑到非故障线路对故障线路的影响及各种工作情况, 仿真验证, 证明所提出的保护与故障性质识别原理的正确性、可行性。

### 1 电弧模型的选用

我国牵引供电系统的异相短路, 其成因主要是受电弓飞弧引起的。在电力系统中, 电弧模型分为一次电弧 (Primary Arc) 和二次电弧 (Secondary Arc)。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, 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。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。研究表明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。

定义:  $u = L \times e$

其中:  $L$  为电弧的长度;  $e$  为弧柱中的电场强度。

根据文献[5], 可以得到电弧数学模型为:

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

式中:  $g$  为电弧的电导;  $u$  为电弧电压;  $u_c$  为电弧电压常数。

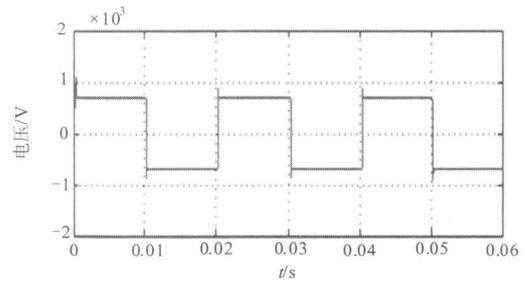
参数确定:

(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:  $T = \frac{\alpha \times I_p}{L_p}$ 。式中:  $I_p$  为

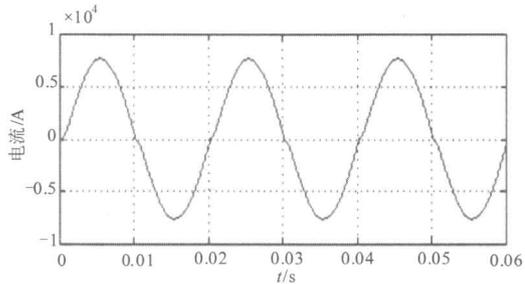
电弧伏安特性曲线中的峰值电流, 可近似采用直接短路时的短路电流。  $\alpha$  为经验值, 取  $\alpha = 2.85 \times 10^{-5}$ ;  $L_p$  为电弧的长度也可以近似为常数。

(2)  $u_c$  的确定: 大量实验研究表明<sup>[4]</sup>, 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, 有:  $u_c = 15 \times L_p$ 。

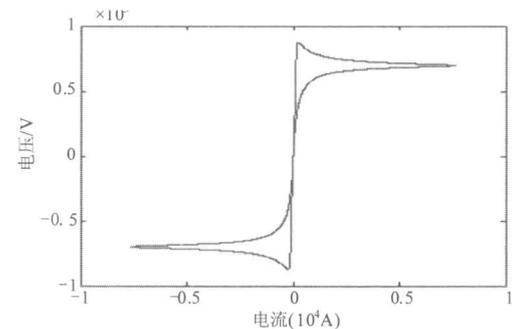
对实测图形数据进行分析得到以下结论: 电弧电压近似方波; 电弧电流近似正弦波; 电弧电阻呈脉冲样波形, 电弧的伏安特性曲线近似磁滞回线, 呈严重的非线性, 在电压过零点附近呈现高阻, 其余时刻为低阻。本文根据实测电弧参数<sup>[4]</sup>, 在 Simulink 环境中编写电弧仿真程序, 其仿真结果如图 1 所示。



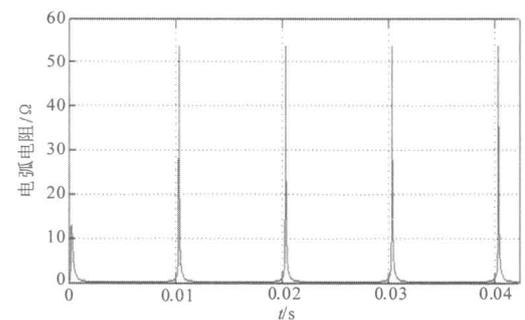
(a) 电弧电压仿真波形



(b) 电弧电流仿真波形



(c) 电弧的伏安特性曲线



(d) 电弧电阻

图 1 电弧数学模型的仿真

Fig.1 Arc mathematical model simulation

仿真结果表明, 该模型能够反应电弧的“零休”现象和高阻特性, 与国内外各种文献给出的实测和实验室条件下得到电弧数据<sup>[5]</sup>进行了比较分析, 验证了模型的正确性, 可以作为研究牵引供电系统异相短路故障的有效仿真模型。

## 2 异相短路分析

本文以雁翅变电所为例, 其牵引供电采用复线 BT 方式单边供电, 牵引网末端有横连线连接。一次侧电力系统阻抗: 最大方式  $X'_{smax} = j0.6402 \Omega$ , 最小方式  $X'_{smin} = j1.0255 \Omega$ , 牵引主变: 接线方式 YN, d; 容量 20 MVA; 阻抗  $Z_b = R_b + jX_b = 0.249 + j3.97 \Omega$ ; 牵引网: 复线、BT、末端有横线连接; 单位自阻抗  $Z_0 = R_0 + jX_0 = 0.36345 + j0.7794 \Omega/\text{km}$ ; 供电臂长度:  $L = 40 \text{ km}$ , 则牵引供电系统异相短路的等效电路如图 2 所示。

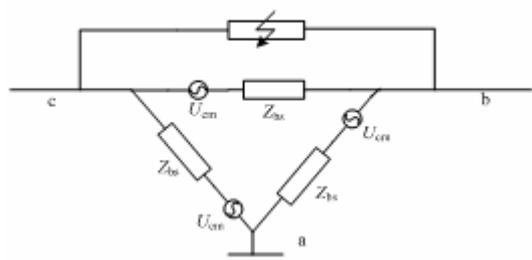


图 2 牵引供电系统异相短路的等效模型

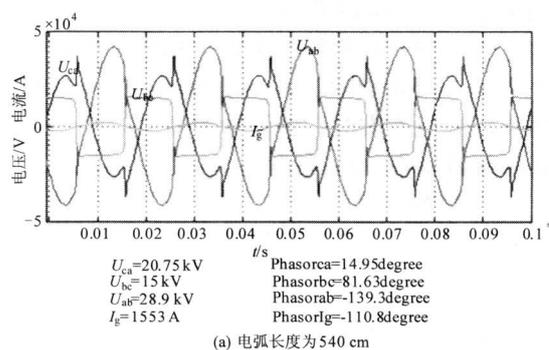
Fig.2 Wrong-phase short circuit model of traction supply system

其中,  $Z_{bs} = Z_b + Z_s$ , 由 Y/Δ 网络变换求得的值, 即: 最大运行方式:  $Z_{bs} = 3(j0.6402 + 0.249 + j3.97) = 0.747 + j13.8306 \Omega$ ; 最小运行方式:  $Z_{bs} = 3(j1.0255 + 0.249 + j3.97) = 0.747 + j14.9865 \Omega$ 。

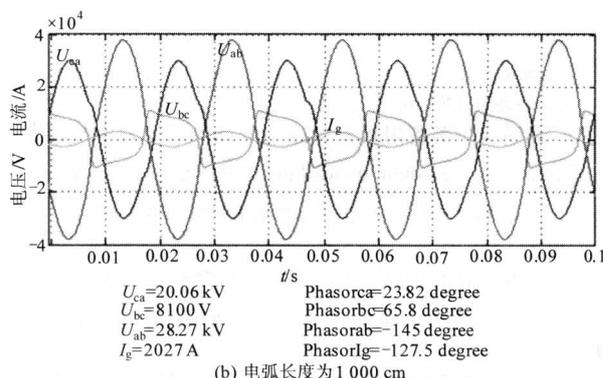
分相绝缘器一般由三或四块相同的玻璃钢绝缘件组成。每块玻璃钢绝缘件长 180 mm, 宽 25 mm, 高 60 mm, 且玻璃绝缘件之间的接触线无电, 称为中性区, 中性区的长度按照规定不小于 18 m, 所以导致牵引供电系统异相短路电弧长度至少为  $180 \times 3 = 540 \text{ cm}$  或  $180 \times 4 = 720 \text{ cm}$ , 由于外界环境的影响其长度还会发生改变, 所以对长度分别为 540 cm, 720 cm, 1 000 cm, 1 200 cm 的电弧进行仿真。

把电弧故障的模型引入牵引供电系统异相短路的仿真中, 用 Matlab/Simulink 中的 PSB 模块建立仿真系统, 得到牵引网发生不同长度的异相电弧短路时的数据波形。如图 3 所示。

通过对不同长度的电弧异相短路的仿真结果进行分析总结, 表 1 得出两供电臂测量阻抗与电弧长度的关系。



(a) 电弧长度为 540 cm



(b) 电弧长度为 1 000 cm

图 3 异相电弧短路三相电压的波形及短路电流的波形

Fig.3 Waveforms of the three-phase voltage and short-circuit current when the arc wrong phase short circuit occurs

表 1 两供电臂在不同电弧长度下的测量阻抗

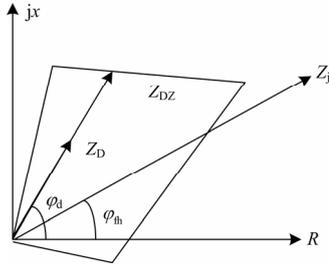
Tab.1 Measurement impedances of power arm under different arc length

	arc length			
电弧长度/cm	540	720	1 000	1 200
滞后相 $U_{ca}/\text{kV}$	21.06	20.69	20.75	22.6
测量阻 $Z_{ca}/\Omega$	10.39	11.15	13.36	20.62
电流滞后电压 $\varphi_{ca}/(^{\circ})$	150.82	141.3	124.8	114.1
超前相 $U_{ba}/\text{kV}$	27.27	28.01	28.9	28.65
测量阻 $Z_{ba}/\Omega$	13.45	15.1	18.61	26.14
电流滞后电压 $\varphi_{ba}/(^{\circ})$	-17.5	-19.9	-28.5	-30
短路电流/A	2 027	1 855	1 553	1 096
$U_{ba}/U_{ca}$	1.29	1.35	1.39	1.27

牵引变电所馈线保护多采用阻抗保护作为主保护<sup>[6]</sup>, 其阻抗特性为四边形特性<sup>[7-8]</sup>如图 4 所示。

正常牵引负荷下, 即使负荷较大, 变电所 27.5 kV 侧母线电压仍较高, 保护装置阻抗元件的测量阻抗如图 4 中  $Z_j$ 。馈线发生接地短路故障, 短路电流急剧升高, 变电所 27.5 kV 母线残压较低, 阻抗元件线路测量阻抗如图 4 中  $Z_D$ 。根据表 1 数据分析可知: 异相电弧短路发生时方向阻抗元件的测量阻抗  $Z_{jca}$ ,  $Z_{jba}$  的测量阻抗分别进入第二象限和第四象

限。阻抗元件不能正确动作。由表 2 数据分析可知, 异相电弧短路使各相的电压发生畸变, 含有一定量的 3, 5, 7 等奇数次谐波, 故障相电压  $U_{bc}$  畸变最为严重, 近似为方波, 谐波含量较高, 3、5、7 次谐波的含量均在 30% 左右。



$Z_{DZ}$  为保护线路阻抗整定值;  $Z_D$  为短路故障测量线路的阻抗值;  $\varphi_d$  为短路阻抗角;  $\varphi_h$  为负荷阻抗角;  $Z_j$  为负荷测量线路阻抗

图 4 馈线保护装置阻抗元件四边形动作特性及主向量图

Fig.4 Impedance element quadrilateral operating characteristics and main vector map of feeder protection device

表 2 故障相电压  $U_{bc}$  的综合谐波含量分析

Tab.2 Comprehensive analysis on fault phase voltage harmonic content of  $U_{bc}$

	content of $U_{bc}$			
电弧长度/cm	540	720	1 000	1 200
总的有效值/V	8 100	10 800	15 000	18 000
直流分量有效值/V	0	0	0	0
基波的有效值/V	7 697	10 016.67	13 546.85	16 311.69
交流谐波有效值/V	2 524	4 043.44	5 985.96	7 309.67
谐波含量/基波含量	0.33	0.403	0.442	0.448

### 3 异相短路保护原理

从前面的仿真分析可知, 异相短路发生时, 原有的馈线保护不能正常动作。而此时, 故障相电压  $U_{bc}$  有较大的降低, 两供电臂的电压也发生改变, 超前相电压  $U_{ba}$  升高, 滞后相电压  $U_{ca}$  降低, 其比值  $U_{ba}/U_{ca} > 1.2$ 。变电所出口处三相电压都有一定的畸变, 其中故障相电压  $U_{bc}$  畸变最为严重, 电压波形近似方波, 3, 5, 7 次谐波含量较高, 3 次谐波含量在 30% 左右, 其他两供电臂电压虽有一定的畸变, 但三次谐波含量不超 10%。根据这些特点本论文提出了通过检测故障相电压  $U_{bc}$  实现异相短路的保护的方案。

$$\text{动作方程: } \begin{cases} U_{bc} \leq U_{zd} \\ K = \frac{U_3 + U_5 + U_7}{U_1} \geq K_{zd} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $U_{bc}$  为故障相电压;  $U_{zd}$  为电压的整定值 (建议取 22.5 kV);  $U_3, U_5, U_7$  为故障相电压  $U_{bc}$  的 3, 5, 7 次谐波;  $U_1$  为故障相  $U_{bc}$  的基波;  $K_{zd}$  建议取为 0.40。

异相短路低压保护原理如图 5, 跳闸出口将控制两供电臂的断路器同时动作, 切断故障。

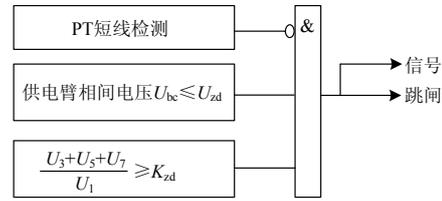


图 5 异相短路低压保护原理框图

Fig.5 Block diagram of low-voltage protection on wrong-phase short circuit

### 4 保护原理的验证

本文提出通过检测异相短路两供电臂间电压  $U_{bc}$  来确认异相短路发生的保护: 异相短路低压保护方案。

理论上分析, 牵引供电系统的运行和故障情况可能有以下几种情况也能使两供电臂相间电压  $U_{bc}$  降低: 1) 两供电臂一臂轻载一臂重载; 2) 两供电臂重载; 3) 两供电臂中有一供电臂发生接地短路故障。本文对这三种情况进行仿真, 验证异相短路在这些情况下不会误动作, 结果见表 3。表 3 给出了异相短路低压保护动作情况, 说明该保护原理应能保证异相短路发生时, 即使供电臂上存在各种负荷运行, 均能作出正确反应, 本文提出的异相短路低压保护方案是可靠的、灵敏的。

### 5 结论

通过建立电弧的数字模型, 将其引入牵引网异相短路的分析, 本文做了大量的仿真研究得到了以下结论: (1) 利用方向阻抗元件实现异相短路的专用距离保护, 在异相短路时存在选择性差难于整定的缺点, 不宜作为异相短路的主保护; (2) 两馈线的电流速断若同时作为相短路的主保护, 由于电弧短路故障高阻的特点, 将造成某些情况下, 电流速断不能有效识别异相短路而拒动, 此外即使能够动作, 其动作时间的不同, 最终导致电弧异相短路故障不能断开, 这是不允许的; (3) 异相短路的危害较大, 为了保证迅速、可靠地断开故障, 采用专门的异相短路保护措施时必要的; (4) 本文通过仿真分析提出了异相短路低压保护, 并且通过仿真验证了其选择性和灵敏性。这种保护方案具有性能完善, 易于实现的优点, 可作为牵引网异相短路的主保护并与牵引网馈线成套保护结合, 组成牵引网完整的保护策略。

表 3 异相短路低压保护动作情况分析

Tab.3 Operation analysis on low-voltage protection on wrong-phase short circuit

各种运行情况		$U_{bc}/kV$	$\frac{U_3 + U_5 + U_7}{U_1}$	异相短路低压保护的 动作情况
正常运行情况	两供电臂 ba 臂空载 ca 臂重载 (负载电流 871 A)	28.25	—	不动作
	两供电臂 ca 臂空载 ba 臂重载 (负载电流 954 A)	24.59	11.80%	不动作
	ca 臂负载电流 592.2 A, ba 臂负载电流 702.4 A	25.72	17.49%	不动作
	ca 相单相接地短路 (10 km), ba 臂空载	26.02	0	不动作
供电臂发生接地故障	ca 相单相接地短路 (0 km), ba 臂空载	23.81	0	不动作
	ca 相单相接地短路 (0 km), ba 臂负载电流 551 A	21.66	19.90%	不动作
	ba 相单相接地短路 (10 km), ca 臂空载	23.48	0	不动作
	ba 相单相接地短路 (0 km), ca 臂空载	23.82	0	不动作
异相短路故障	ba 相单相接地短路 (0 km), ca 臂负载电流 464 A	21.83	14.79%	不动作
	电弧长度 540 cm, 两供电臂空载	8.1	49.18%	动作
	电弧长度 720 cm, 两供电臂空载	10.8	61.38%	动作
	电弧长度 1 000 cm, 两供电臂空载	15	65.88%	动作
	电弧长度 1 200 cm, 两供电臂空载	18	64.15%	动作
	电弧长度 1 200 cm, ba 供电臂负载电流 538.1 A	18	65.41%	动作
电弧长度 1 200 cm, ba 供电臂负载电流 732 A, ca 供电臂负载电流 267 A		18	64.57%	动作

## 参考文献

- [1] 贺威俊. 电力牵引网异相短路保护动作行为特性分析[J]. 铁道学报, 1986, 13 (3): 37-44.  
HE Wei-jun. Analysis on the working features of relay protection against wrong-phase coupling for AC traction systems[J]. Journal of the China Railway Society, 1986, 13 (3): 37-44.
- [2] 高仕斌, 王毅菲, 张劲. 牵引变电所异相短路故障及常规馈线保护的动作为分析[J]. 铁道学报, 2000, 15 (8): 24-27.  
GAO Shi-bin, WANG Yi-fei, ZHANG Jin. Analysis on fault and operating features of feeder protection against wrong-phase short circuit for AC traction substation[J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 15 (8): 24-27.
- [3] 王仁甫. 电弧现象模型的发展[J]. 高压电器, 1991, 27 (4): 39-46.  
WANG Ren-fu. Arc phenomenon model and its developing[J]. High Voltage Apparatus, 1991, 27 (4): 39-46.
- [4] John S A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved techniques for modelling fault arcs on faulted EHV transmission systems[J]. IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 1994, 141 (2): 148-154.
- [5] Djuric M B, Terzija V V, A new approach to the arcing

faults detection for fast autoreclosure in transmission systems[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1980, 16 (6): 253-260.

- [6] 潘启敬. 牵引供电系统继电保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [7] 洪佩孙. 距离保护与阻抗保护[J]. 江苏电机工程, 2001, 12 (3): 48-49, 54.  
HONG Pei-sun. Distance protection and impedance protection[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2001, 12 (3): 48-49, 54.
- [8] 张振省. 牵引变电所馈线阻抗保护整定模式的优化[J]. 高压电器, 2000, 18 (3): 16-19.  
ZHANG Zhen-sheng. Traction substation feeder protection setting mode impedance optimization[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 18 (3): 16-19.

收稿日期: 2009-11-26; 修回日期: 2010-01-13

作者简介:

李冀昆 (1978-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电力系统继电保护研究; E-mail: jikunli\_0@126.com

高仕斌 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事牵引供电系统自动化研究;

王涛 (1972-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事计算机控制理论研究。