

重载铁路牵引变电所电流增量保护动作分析

张翼翔, 王 鑫

(朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 肃宁 062300)

摘要: 近年来重载铁路采用交流机车后, 牵引变电所电流增量保护动作次数逐渐增加。为此, 从电流增量保护的原理入手, 着重从跳闸和故障录波等数据以及线路条件、机车运行等多个方面, 分析了电流增量保护动作的原因, 确认造成电流增量保护误动作是保护设计和定值取值存在缺陷, 并通过计算找到了采用电抗法测距原理的故障装置在电流增量保护跳闸后所测出的故障距离不能作为查找真实故障点的依据; 最后就变电所保护定值、变电所故障测距和保护的闭锁措施等几方面存在的问题给出了相应的改进措施。

关键词: 重载铁路; 变电所; 电流增量

Analysis of actions of current increment protection in traction substation of heavy-haul railway

ZHANG Yixiang, WANG Xin

(Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Suning 062300, China)

Abstract: In recent years, with the adoption of AC locomotive in heavy-haul railway, the number of actions of incremental current protection in traction substation increases gradually. Therefore, this paper starts with the principle of current incremental protection, analyzes the reasons of current incremental protection action from tripping, fault location, fault wave recording, the train line conditions, locomotive operation and other aspects. It is confirmed that the “misoperation” of current increment protection is caused by the defect of protection design and fixed value. Through calculation, it is found that the fault distance measured after the current increment protection tripping cannot be used as the basis to find the real fault point. Finally, the corresponding improvement measures are given for the problems existing in the substation protection fixed value, fault location and protection blocking measures.

Key words: heavy haul railway; substation; current increment

0 引言

电气化铁路牵引变电所距离保护为躲过线路的最大负荷, 整定值一般较小, 而线路短路接地电阻较大时, 如高电阻接地, 距离保护可能无法动作, 这样就降低了供电系统的可靠性。牵引变电所馈线设立电流增量保护, 可以有效切除高电阻接地故障, 保护牵引供电设

备。朔黄线牵引变电所微机保护改造后增加了电流增量保护。2012年以前该保护从未动作过, 但随着运量的增长, 从2013年朔黄铁路引进了牵引功率达9 600 kW的新型8轴大功率交流传动电力机车, 逐步替代了原先的SS4B电力机车(功率6 400 kW)后, 电流增量保护已经数次动作, 且动作次数有不断增加的趋势, 影响

了正常的运输生产，因此有必要对该保护跳闸的原因作深入分析。

1 牵引变电所电流增量保护运行现状

1.1 交流机车运行情况

相比直流机车，交流机车具有牵引动力大、节能降耗显著、劳动强度低和人力成本低等明显优势。近年来随着运量的迅速攀升，朔黄线在创新重载牵引模式、增加万吨列车开行数量和最大限度发挥交流机车的作用等方面做了很多工作。2015年1月11日，交直流机车混编1.74万t列车正式开行，每日开行两列。2016年3月9日，首列由两台8轴大功率交流机车按“1+1”模式牵引的2万t重载列车试运行成功，12轴大功率交流牵引进入试运行阶段。1万t和2万t重载列车增加开行对数，双向对开也已形成了常态化。

1.2 电流增量保护原理

比较负荷与短路两种状态可知，无论是在牵引运行状态还是在再生制动状态，负荷电流中均含有大量的谐波（直流机车主要为3次、5次和7次谐波，交直交型机车主要有3次、5次、7次、19次、21次、41次、43次、61次和65次谐波）。另外，当AT投入或机车变压器投入时，产生的励磁涌流含有很高的2次谐波分量，而短路故障时，故障电流基本是基波。故利用2次谐波闭锁和高次谐波抑制等功能，判断基波电流增量 ΔI 而动作的保护，可以不受机车再生负荷的影响，作为距离保护的后备对高电阻接地故障能起到较好的保护作用^[1-2]。其逻辑框图如图1所示。

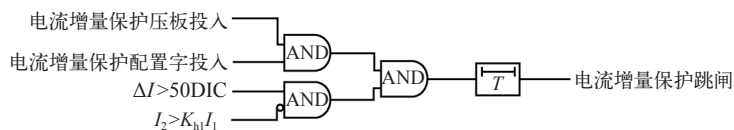


图1 电流增量保护逻辑框图

Fig. 1 Logic block diagram of current increment protection

电流增量原理为

$$\Delta I = I_{1h} - I_{1q} - K_{hr2}(I_{gh} - I_{gq}) > 50DIC \quad (1)$$

$$K_{h1} < I_2/I_1 \quad (2)$$

式中， K_{hr2} 为增量保护谐波加权系数，通过定值整定； K_{h1} 为2次谐波闭锁系数，通过定值整定；50DIC为增量保护电流定值； I_{1q} 、 I_{1h} 为故障前后两时刻基波电流； I_{gq} 、 I_{gh} 为故障前后两时刻3次、5次谐波电流之和； I_1 、 I_2 为故障后基波、2次谐波电流。

电流增量保护启动后在动作延期内，如果电流小于增量保护小电流闭锁定值，则增量保护返回。任一保护动作也使该保护返回。

整定原则：电流增量保护按照一台机车最大起动电流进行整定。

$$\Delta I_{zd} = K_k \Delta I_{f_{max}} \quad (3)$$

式中， ΔI_{zd} 对应定值中的50DIC； K_k 为可靠系数，一般取1.2~1.3； $\Delta I_{f_{max}}$ 为机车最大起动电流，与车型有关。

对无滤波装置的机车负荷，3次、5次谐波含量高，需将谐波抑制投入并设置谐波加权系数。对负荷均为AC-DC-AC动车组的线路，由于低次谐波含量低，无法依赖谐波抑制功能，因此要相应加大整定动作值。

1.3 电流增量保护动作情况

朔黄线牵引变电所电流增量保护的整定值最初按照SS4B电力机车起动电流（256 A）的1.25倍整定，整定值为320 A。本文以小觉牵引变电所为例（该所为直供加回流方式，本文都是以直供加回流供电方式为前提进行讨论），其电流增量保护定值为：电流增量保护1.28 A；保护时限2 s；增量保护小电流闭锁0.9 A；2次谐波闭锁系数0.2；线路阻抗角 65° ；保护TA电流比250。

截至2016年3月17日，小觉变电所电流增量保护跳闸共出现6次，跳闸数据统计如表1所示。

2 原因分析

2.1 小觉变电所电流增量保护跳闸数据分析

(1) 电压电流数据分析^[3]

从表1的数据来看，变电所和分区所的故障

表 1 电流增量保护跳闸数据

Tab. 1 Trip data of current increment protection

序号	断路器编号	跳闸时间	保护动作类型	重合闸动作情况	故障技术参数				
					故障电流 /A	故障电压 /kV	一次电抗 /Ω	故障测距 /km	阻抗角 (°)
1	212	2016.03.17 21:49:50	电流增量保护动作	重合成功	712.96	27.44	9.11	16.87	166.5
2	211	2016.01.23 23:13:48	电流增量保护动作	重合成功	594.14	26.77	13.44	16.88	17.20
3	212	2016.01.23 23:13:47	电流增量保护动作	重合成功	554.01	26.65	8.33	16.87	169.9
4	212	2015.10.06 04:41:54	电流增量保护动作	重合成功	631.17	26.00	6.89	16.87	170.0
5	211	2014.06.28 21:06:39	电流增量保护动作	重合成功	686.73	26.08	23.22	16.88	37.5
6	212	2014.04.13 22:36:08	电流增量保护动作	重合成功	552.47	27.3	9.78	16.87	168.6

电压基本都未降，在26.5 kV上下；变电所和分区所的故障电流都不大，在600 A上下；因此这6次跳闸均不属于接触网接地故障。

(2) 阻抗角和CTC数据分析

韶4B的负荷阻抗角一般在30°~40°，交流机车的负荷阻抗角一般在10°~20°，朔黄沿线的线路阻抗角为65°，表2为CTC回放数据。

表 2 跳闸时刻机车在区间分布情况

Tab. 2 Distribution of locomotives in sections at tripping time

序号	编号	跳闸时间	故障测距 /km	机车在接触网线路分布情况	阻抗角 (°)
1	212	2016.03.17 21:49:50	16.87	三个交流机车 (1台1万t, 2台2万t)	166.5
2	211	2016.01.23 23:13:48	16.88	两个交流机车 (各1万t)	17.20
3	212	2016.01.23 23:13:47	16.87	两个交流机车 (各1万t)	169.9
4	212	2015.10.06 04:41:54	16.87	两个交流机车 (各1万t)	170.0
5	211	2014.06.28 21:06:39	16.88	两组韶4B机车 (各1万t)	37.5
6	212	2014.04.13 22:36:08	16.87	两个交流机车 (各1万t)	168.6

从表2数据来看，第2次跳闸时刻在211供电臂上运行有两个交流机车，阻抗角17.20°，为交流机车的负荷阻抗角；第5次跳闸时刻在

211供电臂上运行有两组韶4B机车，阻抗角为37.5°，为韶4B机车的负荷阻抗角；其余4次均为在212供电臂上运行有两个交流机车，阻抗角均为170°左右，是由于运行在区间的交流机车再生制动产生的反向电流向接触网反送电的缘故（朔黄铁路212上行线为重车下坡道，211下行线为空车上坡道），因此该阻抗角也属于交流机车的负荷阻抗角。综上所述，从阻抗角数据分析来看，这6次跳闸均为机车正常运行的负荷阻抗角，并不在接触网线路接地后的故障阻抗角范围内。

(3) 故障测距数据分析

小觉变电所212DL、211DL分别供小觉至猴烈接触网上下行，并通过猴烈分区所的232DL实现上下行接触网闭环，其中小觉至猴烈接触网上行全长16.87 km，小觉至猴烈接触网下行全长16.88 km（含供电线长度），故障标准测距装置采用的是电抗法的测距原理来进行故障测距。

由表1可知，这6次跳闸故测装置所得出的故障点均在线路最末端，即接触网分相处，但接触网工区多次巡视均未发现故障点。下面以表1中的第3次跳闸为例，通过一组计算来得出实际的故障距离。

212DL供小觉至猴烈接触网上行的供电臂，故测装置定值中该段接触网线路共分为三

段：第一段为小觉变电所212DL至小觉站上网点，其中供电线长度1.78 km，单位电抗0.283 Ω；第二段为小觉站上网点至猴烈站上网点，其中供电线长度13.360 km，单位电抗0.316 Ω；第三段为猴烈站上网点至猴烈分区所232DL，其中供电线长度1.74 km，单位电抗0.221 Ω；因此线路全长的最大电抗为： $X_{\max}=1.78 \text{ km} \times 0.283 \text{ } \Omega + 13.36 \text{ km} \times 0.316 \text{ } \Omega + 1.74 \text{ km} \times 0.221 \text{ } \Omega = 4.889 \text{ } 04 \text{ } \Omega$ 。

由表1中的数据得出第一次跳闸的故障电抗为： $X_1=26.65 \text{ kV}/554.01 \text{ A} \times 1 \text{ } 000 \times \sin 169.9^\circ=8.436 \text{ } \Omega$ 。

显然 X_1 远远超出了该段线路的最大电抗值，因此故测装置所显示的故测距离自动默认为线路最末端，即16.88 km。虽然故测装置的计算形式是正确的，但运用该方式计算出来的故障距离显示的却不是真正的故障点发生地。

当接触网设备有高电阻接地故障时，变电所电压会有一定程度的降低，同时在短时间内基波电流会有300~1 200 A以内的增值。不考虑其他因素，完全按极限状态来计算，即 $U_{\min}=1.3 \text{ kV}$ ， $I_{\max}=1 \text{ } 200 \text{ A}$ ，线路阻抗角 65° ，得出其最小电抗为 $X_{\min}=9.06 \text{ } \Omega$ 。

由上述可以得出，无论在高电阻接地故障下还是线路机车过负荷情况下，导致的馈线电流增量保护跳闸后，故障标准装置所测的故障距离应视为无效，不能作为查找真实故障点的依据。

(4) 小觉变电所电流增量保护故障录波分析

以2016年01月23日211断路器跳闸的故障录波数据为例，图2和图3为2016年01月23日211DL跳闸25 ms和0 ms故障录波截图。截图中显示的值均为有效值，馈线电流互感器电流比为250。由这两个图可以看出，在保护起动前25 ms内电流从241.5 A增大到563 A，增量电流为321.5 A，达到电流增量保护的定值320 A（保护装置固有误差在5 ms），并在保护启动后至断路器动作前故障电流均在550 A上下，远远高于增量小电流闭锁电流定值225 A，通过保护装置的故障录波分析得出保护启动正常，动

作出口正确。



图2 211DL跳闸故障25 ms录波截图

Fig. 2 25 ms wave recording screenshot of 211DL tripping fault

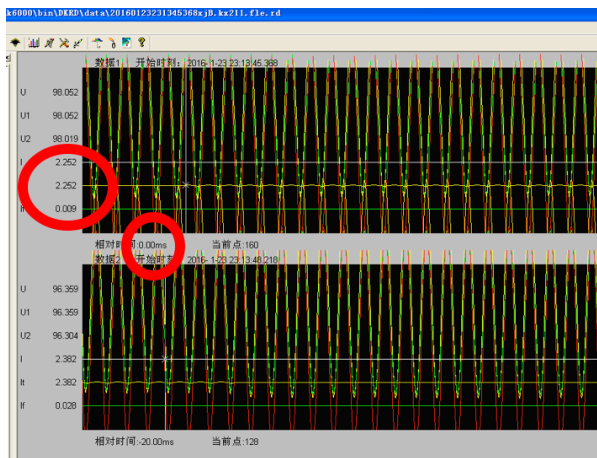


图3 211DL跳闸故障0 ms录波截图

Fig. 3 0 ms wave recording screenshot of 211DL tripping fault

(5) 跳闸前后机车取流情况分析

2016年3月17日，小觉变电所212DL电流增量保护再次跳闸后，调取了跳闸时刻212DL供电臂上两趟列车主断路器跳闸的报告记录。记录显示：跳闸时刻线路列车位置分别为K184+729处（万吨，刚通过分相，坡度为9‰）和K193+241处（2万t，区间，坡度为7‰），其中18462次/万吨列车在跳闸前30 s闭合主断路器。由报告可以看出，自闭合主断路器开始到欠电压跳主断路器，机车一直处于制动状态，而28274次2万t列车在跳闸前后也一直处于制动状态。从机车主断路器跳闸前2 s

(21:49:52) 的电流数据来看,两趟列车由于再生制动产生的返送电流共达到了880 A,造成小觉变电所212DL电流增量保护动作。

2.2 小觉变电所电流增量保护动作原因分析

以上6次电流增量跳闸均呈现故障电流小、故障电压几乎未降、阻抗角为机车正常运行的负荷阻抗角和谐波含量低等特点,因此并不存在接触网设备高电阻接地或供电设备绝缘子老化等情况。由于同一供电臂下的两个“万吨列车”同时起动并持续加速或在连续下坡的区间线路条件下同时制动产生的突变电流未躲过增量定值,同时2次谐波闭锁及高次谐波抑制未能闭锁增量保护出口,在负荷电流未躲过增量小电流闭锁电流后,电流增量保护出口跳闸。

3 结论与对策

在目前朔黄线大量投运大功率交流机车和万吨重载列车常态运行的新形势下,采用以下三种方法可以解决电流增量保护误动的问题。

3.1 调整电流增量保护定值

电流增量保护定值是按SS4B机车最大起动电流整定,该定值在朔黄线开通以来一直未作调整,对于机车起动电流大、2次谐波含量低的交流机车而言,若同一供电臂上两个万吨机车同时起动并持续加速,或在连续下坡的区间线路条件下同时制动,将导致机车正常负荷电流躲不过电流增量保护定值,在大量投运大功率交流机车和万吨重载列车态势下,该定值已不适应目前的运行现状。

建议调整电流增量保护定值,同时调整电流增量小电流闭锁系数。由式(1)可以得出,可将电流增量保护定值从既有的1.28 A调整到1.68 A,电流增量小电流闭锁系数从0.7调整到0.9。

3.2 改进故障标准装置的测距原理

朔黄线目前正在进行牵引供电扩容改造,全线采用AT供电方式,并在神池南至西柏坡区段采用牵引网全并联供电方式。与传统的上、

下行接触网只在供电臂末端并联一次的供电方式不同,同一区间上、下行接触网除在末端分区所并联以外,在区间中部的“AT所”实施一次横向并联。上文已经阐述了朔黄线直供区段在电流增量保护跳闸后,无论是由于线路机车过负荷原因引起的误动作还是高电阻接地故障引起的跳闸,故障标准装置的数据都不能作为查找真实故障点的依据。结合AT改造施工,对所内故障标准装置进行升级改造,建议在变电所、分区所和AT所之间建立单独的故障标准通道,综合采用AT中性点吸上电流比和电抗法的测距原理,断路器重合闸成功时采用AT中性点吸上电流比的测距原理,故障标准通道故障或断路器重合闸失败时采用电抗法的测距原理。

3.3 引入新的闭锁方案

交流电力机车具备额定功率大、起动电流大、谐波含量低和再生制动电流返送牵引网等电气特性,但对于电流增量保护而言,由于其高次谐波含量较低,使得保护中的2次谐波闭锁和高次谐波抑制等功能几乎未发挥作用,而从这几次跳闸的情况来看增量小电流闭锁电流也未达到理想的闭锁效果,但从保护的灵敏性和可靠性角度分析,不断地调整定值和时限并不能有效解决该问题,因此有必要引入新的闭锁方案。

短路试验数据显示^[4],线路末端高电阻接地以后,变电所电压下降并不明显,但分区所电压会急剧下降,而正常负荷时分区所电压下降也不明显,因此建议在变电所馈线保护增加分区所和AT所的电压采集通道,并在变电所电流增量保护设置中植入分区所(AT所)低电压阈值来闭锁变电所馈线电流增量保护的出口。其逻辑关系如图4所示。

图4中, K_{h1} 为2次谐波闭锁系数,通过定值整定;50DIC为增量保护电流定值;50DIV为低电压定值; I_1 、 I_2 为故障后基波、2次谐波电流。

当发生高电阻接地故障时,故障点附近分

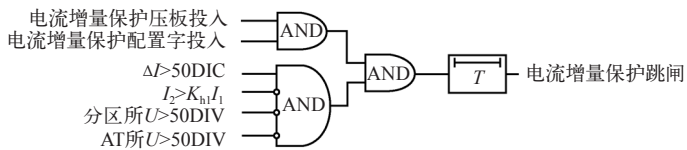


图4 电流增量保护逻辑框图

Fig. 4 Logic block diagram of current increment protection

区所或AT所的馈线电压会急剧下降，确保电流增量保护可以可靠动作；当负荷正常时，变电所、分区所以及AT所的电压几乎未降，从而闭锁增量保护动作。该方案可有效避免了电流增量保护的误动作，同时保证了高电阻接地故障跳闸的灵敏性。

4 结束语

对小觉变电所电流增量保护定值进行了调整，从实际运行情况来看，经受住了近期“逐日增加开行2万t和上下行双向对开2万t列车”的考验，小觉变电所再未发生过电流增量保护“误跳”情况，达到了预期效果，消除了潜在的不安全因素和隐患，保证了供电设备安全稳定运行。

参考文献

- [1] 贺家李，宋从矩．电力系统继电保护原理[M]．北京：中国电力出版社，2004．
- [2] 张秀峰，王毅飞．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，1997，32(1)：23-27．
- [3] 高亮．电力系统微机继电保护[M]．北京：中国电力出版社，2007．
- [4] 吕晓冬，孙培胜．京沪高速铁路接触网短路试验分析[J]．中国科技纵横，2012(22)：57-58．

作者简介



张翼翔

张翼翔（1967—），男，高级工程师，主要从事于电气化铁道供电工作。

(收稿日期：2020-06-12)EA