

牵引网馈线自适应保护原理及配置方案研究

邱荣光

(华东交通大学 电气与电子学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 首先讨论了影响牵引网馈线保护原理及配置的因素, 然后分析了牵引网馈线自适应保护的原理, 其中重点探讨对距离保护传统阻抗多边形进行改进的可行性, 并利用现场运行数据进行了仿真验证, 最后提出了牵引网馈线自适应保护的配置方案。

关键词: 牵引网; 自适应保护; 阻抗多边形; 改进; 馈线保护配置

中图分类号: U224.4

文献标识码: A

牵引负荷是单相、变化的负荷, 主要与线路情况、机车类型、列车重量和运行速度有关; 牵引负荷电流中含有丰富的谐波成分, 负荷的阻抗角大; 牵引网供电臂供电距离长, 且牵引网阻抗较大, 相应的短路电流小; 由于牵引负荷为移动负荷, 接触网故障发生的几率较电力系统输电线路要频繁得多^[1]。由于牵引负荷的特殊性以及牵引网故障频繁的特点, 牵引网馈线保护在牵引供电系统的保护中占有重要地位。

自适应继电保护定义为能根据电力系统运行方式和故障状态的变化而实时改变保护性能、特性或定值的新型继电保护。本文借鉴电力系统中自适应保护的较完善的理论和运行经验, 研究根据牵引负荷特点构成的牵引网馈线自适应保护方案, 具有重要的理论和实际意义。

1 牵引网馈线自适应保护的原理

1.1 自适应距离保护

在现有的牵引网馈线保护装置中, 一般采用距离保护作为主保护。由于电力机车经常运行在起动、调速、再生制动等工况下, 以及降弓通过电分相再合闸时引起励磁涌流, 因此, 当线路上既有正常负荷又有再生负荷或励磁涌流时, 其综合负荷就可能落入

保护动作区, 造成常规距离保护的误动作, 如图1所示^[2]。

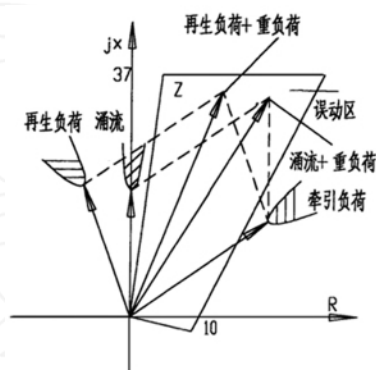


图1 牵引负荷特性

线路正常负荷运行时, 由于电力机车为整流负荷, 含有丰富的奇次谐波, 其中以三次谐波的成分最高, 一般可达到 20% ~ 30%^[3]; 机车通过电分相或空载投入 AT 牵引网时, 产生的励磁涌流中含有丰富的二次谐波分量。与之相比, 当接触网发生短路故障时, 短路电流基本为正弦波。因此, 可以根据谐波成分的大小来区分负荷电流和故障电流。

定义综合谐波含量为: $K = \frac{I_2 + I_3 + I_5 + I_7}{I_1}$, 其中

I_1, I_2, I_3, I_5, I_7 分别为负荷电流中的基波、二、三、五、七次谐波。阻抗继电器的动作方程为

收稿日期: 2007-10-27

作者简介: 邱荣光(1972-), 女, 河北秦皇岛人, 华东交通大学讲师, 硕士, 主要从事电力系统及其自动化教学与研究。

$$\begin{cases} R \leq \frac{1}{1+K} R_{zd} \\ X \leq \frac{1}{1+K} X_{zd} \end{cases} \quad (1)$$

其中, R 、 X 为阻抗继电器的测量电阻和电抗; R_{zd} 、 X_{zd} 分别为阻抗继电器的电阻和电抗整定值. 正常运行时, $K > 0$, 从而使 R_{zd} 和 X_{zd} 乘以一个小于 1 的系数, 相当于把多边形阻抗继电器的线路边和负荷边收缩了; 机车运行于再生制动状态、通过电分相或空载投入 AT 牵引网时, 电流中的谐波分量会比正常运行时更大, 阻抗继电器的动作边界也缩小了; 而当馈线发生常规故障时, $K \approx 0$, 阻抗继电器的动作边界不变.

通过分析可知, 自适应距离保护利用实时检测到的综合谐波含量对阻抗继电器的动作边界进行实时在线调整, 即实时修改保护定值, 实现了保护的自适应.

1.2 阻抗多边形的改进

在电力系统距离保护中, 为了防止保护线路末端经过渡电阻短路时, 保护装置可能出现的超范围动作, 阻抗多边形的线路边一般会下倾一个 δ

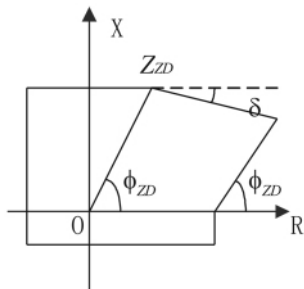


图2 偏移阻抗特性

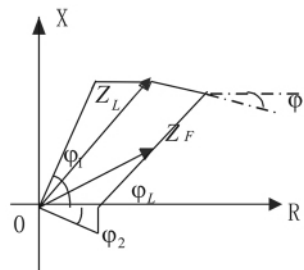


图3 改进的阻抗多边形

角 φ , 在确定线路边的定点之后, 以定点作为顶点, 分别做电抗轴的垂线和一条下倾线, 如图 2 所示. 当牵引网发生非金属性短路故障时, 过渡电阻会造成距离保护的误动作, 又由于涌流区就在电抗轴附近, 可能会引起保护的错判. 本文并借鉴图 2 的方法, 在图 1 阻抗多边形的基础上, 把线路边下倾一个 φ 角, 改进后的阻抗多边形如图 3 所示, 其中, Z_F 为负荷阻抗, Z_L 线路阻抗.

麦元变电所的技术参数为: 复线单边供电方式 (如图 4 所示); 馈线全长约为 25.01 km; 线路单位阻抗为 $0.746 \Omega/\text{km}$, 线路阻抗角为 65° , 负荷阻抗角为 37.8° . 变电所设置两段式距离保护. 为验证改进后的阻抗多边形能否正确动作, 本文选取此变电所的 10 组现场故障数据, 利用 MATLAB6.5 进行仿真测试, 分别测试故障时刻阻抗和故障排除后 I、II 段的判断, 结果如表 1~3 所示.

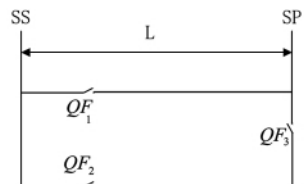


图4 变电所供电方式示意图

表1 故障时刻阻抗 I、II 段判断

序号	二次侧电压 (V)	二次侧电流 (A)	故障阻抗 (幅值和相角)	距离 I 段判断	距离 II 段判断
1	57.1	7.22	$7.9 \angle 45^\circ$	在保护区内, 保护动作	在保护区内, 保护动作
2	77.1	4.21	$18.28 \angle 44.5^\circ$	不在保护区内, 保护不动作	不在保护区内, 保护不动作
3	6.3	12.19	$0.52 \angle 56.2^\circ$	在保护区内, 保护动作	在保护区内, 保护动作
4	39.4	9.42	$4.18 \angle 46.5^\circ$	在保护区内, 保护动作	在保护区内, 保护动作
5	36	8.5	$4.23 \angle 61.3^\circ$	在保护区内, 保护动作	在保护区内, 保护动作
6	48.2	6.89	$6.98 \angle 61.9^\circ$	在保护区内, 保护动作	在保护区内, 保护动作
7	36.4	8.82	$4.13 \angle 63^\circ$	在保护区内, 保护动作	在保护区内, 保护动作
8	9.0	12.72	$0.71 \angle 45^\circ$	在保护区内, 保护动作	在保护区内, 保护动作
9	48.5	6.8	$7.13 \angle 61.9^\circ$	在保护区内, 保护动作	在保护区内, 保护动作
10	36.9	9.14	$4.04 \angle 47.9^\circ$	在保护区内, 保护动作	在保护区内, 保护动作

表2 I段返回时阻抗I、II段判断

序号	I段返回	距离I段判断	距离II段判断
1	$16.73 \angle 72.4^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	在保护区内,保护动作
2	$19.64 \angle 44.9^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	在保护区内,保护动作
3	$9.89 \angle 85.3^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	在保护区内,保护动作
4	$16.36 \angle 65.8^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	在保护区内,保护动作
5	$17.23 \angle 69^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	在保护区内,保护动作
6	$11.57 \angle 87.6^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	在保护区内,保护动作
7	$19.32 \angle 55.1^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	在保护区内,保护动作
8	$17.89 \angle 59.9^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	在保护区内,保护动作
9	$16.14 \angle 70.4^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	在保护区内,保护动作
10	$16.26 \angle 75^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	在保护区内,保护动作

表3 II段返回时阻抗I、II段判断

序号	II段返回	距离I段判断	距离II段判断
1	$9.89 \angle 85.3^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	不在保护区内,保护不动作
2	$19.64 \angle 44.9^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	不在保护区内,保护不动作
3	$24.25 \angle 87.2^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	不在保护区内,保护不动作
4	$11.57 \angle 87.6^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	不在保护区内,保护不动作
5	$30.82 \angle 91.6^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	不在保护区内,保护不动作
6	$28.59 \angle 84.8^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	不在保护区内,保护不动作
7	$29.55 \angle 73.7^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	不在保护区内,保护不动作
8	$27.98 \angle 89.2^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	不在保护区内,保护不动作
9	$27.18 \angle 72.9^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	不在保护区内,保护不动作
10	$24.7 \angle 91.3^\circ \Omega$	不在保护区内,保护不动作	不在保护区内,保护不动作

从表2和表3中可以看出,故障排除后阻抗I、II段都没有动作,判断完全正确.而表1中第二组数据的阻抗I、II段在故障时刻都判断错误,其余9组数据的阻抗I、II段都判断正确.

注意到表1中第二组数据的故障电压、电流和其他各组差别较大.在这种故障状态下,电压值比正常状态下降不多即差别较小,而电流值虽然比正常状态下电流值有一定幅度的增大但是仍然较小,不如其他各组数据明显.从而造成测量阻抗值不在阻抗多边形范围之内,初步分析这种故障应不属于单相接地故障.参照异相短路故障发生时,故障电流中富含谐波且数值电流较小,两个故障相的对地电压不仅下降较小,甚至可能不降反增^[8].分析表1中的第2组故障数据应该是由异相短路故障造成的.仿真结果验证了本文图3的改进阻抗多边形的正确性.

1.3 牵引网馈线自适应电流速断保护

牵引网馈线采用电流速断保护主要是为了保证馈线在发生近端故障时,保护装置能够快速动作,同时可以辅助判断牵引网异相短路故障.考虑到牵引网馈线自适应距离保护利用综合谐波含量自适应调

节动作边界的方法,其本身就是基于故障电流的,因此可以直接用于实现电流速断保护的自适应.具体的动作特性为^[8]: $I_1 > I_{zd} (1 + KK_h)$, 式中, I_1 为电流基波测量值, K 为综合谐波含量, K_h 为谐波抑制的加权系数, I_{zd} 为电流整定值.

1.4 自适应电流增量保护

电流增量保护是利用短路时电流瞬间增大的特性,通过比较正常状态时的负荷电流和高阻故障时电流随时间变化的分量 ΔI 不同来检出故障,交流 ΔI 型继电器特性如图5所示.

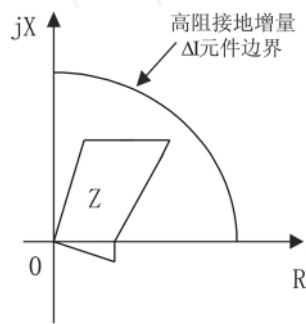


图5 电流增量保护特性

其中电流增量 $\Delta I = I_{gh} - I_{gq}$, I_{gq} 、 I_{gh} 分别为故障前后的电流值. ΔI 的整定值为该区间实际走行一列

列车的最大电流值。一般情况下,一个供电区间的最大负荷电流约能达到列车最大电流的两倍左右,所以与普通的过电流继电器相比, ΔI 型保护继电器的选择能力为它的两倍。但当电力机车过分相或电分段时就无法避开负荷电流变化的分量;此外,由于电力机车起动的励磁涌流都可能使 ΔI 型保护误动作,所以必须改善其性能。

动作方程为

$$\Delta I = \Delta I_1 - KK_{2357} I_{1h} = I_{1h} - I_{1q} - KK_{2357} I_{1h} \geq (1 + K_{2357}) \Delta I_{zd} \quad (2)$$

式中 $K_{2357} = (I_2 + I_3 + I_5 + I_7) / I_1$ 为综合谐波含量; $K = \text{int}(10 * K_{2357})$ 为自适应抑制系数。这样 ΔI 型继电器就会随谐波含量而改变其计算值,具有自适应性。

1.5 自适应电压增量保护

电气化铁道采用单相供电,为了使其从电力系统三相电网取流基本对称,采用分相分段取流的方法,即每隔 20 km ~ 25 km 设置一个分相段,相邻分相段由不同的两相供电,如果机车不降弓带电通过分相区,会发生异相短路故障^[6],如图 6 所示。此时,常规原理的阻抗继电器很难做出正确的判断,有必要在变电所出口处设置门的异相短路保护——自适应电压增量保护。

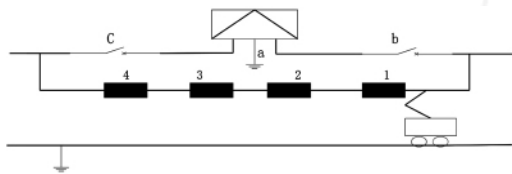


图6 电力机车通过电分相图

当发生异相短路故障时,故障相电压会有较大的降低,定义自由相电压为电弧电压 U_{dbc} ,它接近于方波,含有丰富的谐波含量;从而可以通过检测故障相电压和谐波分量来判断牵引网异相短路故障。

自适应电压增量保护的方程^[6]为

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U_1 + K_u K_{\Sigma h} U_{1h} = U_{1q} - U_{1h} \\ &+ K_u K_{\Sigma h} U_{1h} \geq (1 - K_{\Sigma h}) \Delta U_{zd} \\ K_{\Sigma u} &\geq K_{\Sigma D} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, ΔU_1 为自由相电压 U_{dbc} 的基波电压增量, U_{1q} 、 U_{1h} 为自由相前后两时刻的基波电压, ΔU_{zd} 为电压增量元件的整定值。自由相综合谐波含量为 $K_{\Sigma u}$

$= \frac{U_{bc3} + U_{bc5} + U_{bc7}}{U_{bc1}}$; 助增系数为 $K_u = \text{int}(10 K_{\Sigma u})$,

U_{bc1} 、 U_{bc3} 、 U_{bc5} 、 U_{bc7} 分别为自由相电压的基波和三、五、七次谐波电压。

自适应电压增量保护通过实时检测电压综合谐波含量而实时在线调整保护定值,实现了保护的自适应。自适应电压增量保护可作为异相短路故障的主保护。

当全所停电时,自由相电压为零,计算得到的谐波含量为离散值,可能满足式 3,导致在恢复供电时,馈线断路器无法合闸成功送电,同时,由于有些变电所馈线较多,从馈线引入电流所需交流输入回路较多,引入变压器二次侧电流作为式 3 判断的先决条件,即 $I_{f1} > I_{dz}$ 或 $I_{f2} > I_{dz}$ 。

1.6 自适应过电流保护

自适应过电流保护也是通过引入电流的综合谐波分量,实现保护的自适应。对于重负荷线路,过电流保护还可以选择低电压闭锁和二次谐波闭锁功能。动作方程为

$$\begin{aligned} I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 &\geq (1 + K_{\Sigma}) I_{zd}^2 \\ I_2 / I_1 &\geq K_2 \quad (\text{I、II、III段}) \quad (4) \\ U_1 &< U_{zd} \end{aligned}$$

K_{Σ} 为综合谐波抑制系数, K_2 为二次谐波闭锁值, U_1 为基波电压, U_{zd} 为低电压启动值。 I_{zd} 为过流保护的定值,按接触网承受过负荷的能力整定。三段过电流保护均可以根据实际情况投退。

2 牵引网馈线自适应保护的配置

以自适应距离保护为主保护,用以保护馈线的各种接地故障;以自适应电压增量保护、自适应电流增量保护、自适应过流保护和自适应电流速断保护作为后备保护,分别用于保护牵引网馈线异相短路故障、高阻接地故障、接触网过热及短路故障、近端短路故障。同时,根据馈线具体情况可配合二次谐波闭锁、低电压闭锁、PT断线闭锁等功能。保护的逻辑框图如图 7 所示。

3 小结

文章分析了牵引网馈线自适应保护的原理,借鉴电力系统距离保护的做法,探讨对牵引网馈线传统距离保护阻抗多边形进行改进的可行性,并利用部分现场运行数据进行了仿真验证,最后提出了牵引网馈线自适应保护的配置方案。对保护原理的研究及工程实际具有借鉴意义。

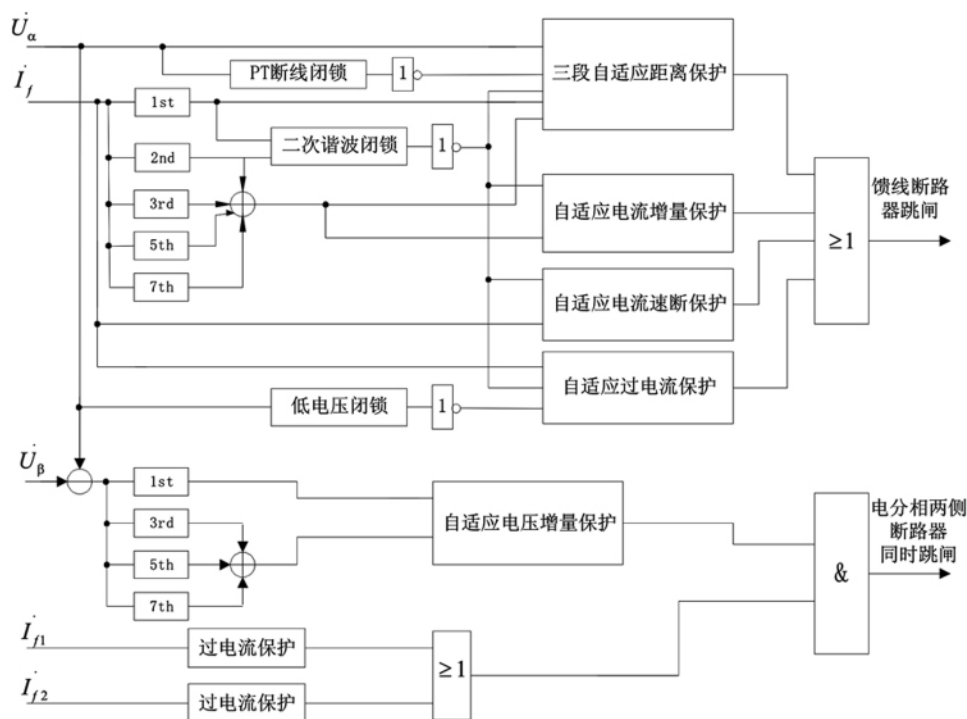


图7 牵引网馈线自适应保护配置的逻辑框图

参考文献:

- [1] 高仕斌. 高速铁路牵引供电系统新型保护原理研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [2] 王耀棠, 肖 霞, 郭勤俭. 新型的牵引网馈线成套保护 [J]. 继电器, 2000, 28(4): 50-52.
- [3] 张爱样. 智能型自适应继电保护的应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [4] 林湘宁, 刘 沛, 井 嵘. 基于 DSP 实现多边形阻抗特性最佳判据的选择 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 62-64.
- [5] 刘家军. 牵引变电所自动化馈线测控保护装置的研制 [D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [6] 高仕斌, 王毅非, 张 劲. 牵引变电所异相短路故障及常规馈线保护动作行为分析 [J]. 铁道学报, 2000, 22(4): 24-27.
- [7] 李冀昆. 牵引供电系统异相短路保护原理的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2004.

Study on the Principles and Scheme of the Feeder line's Adaptive Protection in Traction Power Supply System

DI Rong - guang

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

Abstract: In this paper, firstly, the factors that influence protection principles and scheme of traction power supply system are discussed. Secondly, the principles of adaptive protection for feeder in traction power supply system are analyzed in detail. The adaptive distance protection is particularly analyzed. The feasibility of improving the conventional impedance polygon is discussed and the simulation is verified through traction substation's running data. The feeder line's adaptive protection scheme is presented in the end.

Key words: traction network; adaptive distance protection; impedance polygon; improvement; feeder protection scheme
(责任编辑: 王建华)