

带串联电容补偿装置的电力牵引网故障测距研究

林国松, 陈小川

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 电力牵引网故障测距一般采用电抗法, 但增加了串补电容的电力牵引网线路电抗单调性遭到破坏。基于线路 $R-L-C$ 模型, 采用微分方程法分析计算, 提出带串补线路电力牵引网故障点位于电容前或电容后位置的识别方法。对于不同过渡电阻、不同短路相角情况下, 基于可替代暂态程序仿真和 Matlab 的分析表明, 该方法能有效判别故障点位于电容前或电容后的位置。此后, 可通过常规的电抗法进行测距。

关键词: 故障测距; 串联补偿; 微分方程解析法

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)03-0051-03

0 引言

常规电气化铁路供电线路一般采用电抗测距方法, 对于故障测距装置安装位置的每个测量电抗, 获得唯一的对应故障点。但是, 对于一些重载、长距离牵引线路, 为了提高网压, 在线路始端或中部增加串补电容, 线路发生故障时, 每个测量电抗可能对应 2 个故障点, 从而改变了故障线路的电抗距离单调性, 因此, 必须对电容前故障和电容后故障进行识别。基于一些文献^[1,2]的分析, 本文通过构造电力牵引网线路 $R-L-C$ 模型, 简单分析了判别方法的可行性, 通过可替代暂态程序 ATP(Alternative Transient Program)仿真和 Matlab 进行数据分析, 得到一种有效的判别方法, 结果表明该方法不受短路故障角的影响, 并且基本不受过渡电阻影响。

1 问题提出

电力牵引变压器一般采用 Y/d11 接线方式, 变比为 110 kV/27.5 kV, 在低压侧采用两相作为 2 个方向的架空接触线, 另一相接钢轨。接触网称为供电臂, 直供线路的供电臂长度一般不超过 40 km。电力牵引网短路故障相当于常规电力系统的两相短路^[3], 线路含 2 个串补电容的短路故障如图 1 所示。

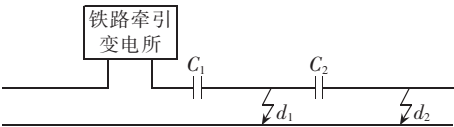


图 1 电力牵引网短路示意图

Fig.1 S/C faults of power traction system with series compensation

当供电线路发生故障时, 变电所端口测量阻抗要考虑 2 个串补电容投入的影响。2 个串补有 4 种组合投入状态, 于是便存在 4 种不同的短路电抗与距离关系, 如图 2 所示。

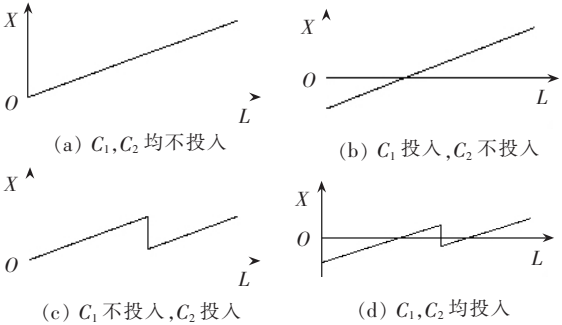


图 2 含串补电力牵引网短路电抗与距离关系曲线图

Fig.2 The relationship between reactance and distance in power traction system with series compensation

对图 2(a)(b), 电抗与距离关系具有单调性, 所以只要知道属于这 2 种情况, 可直接采用对应的电抗距离表进行测距; 对图 2(c)(d), 同一电抗值可能对应 2 个距离值, 不能直接查表测距, 须先判断故障位于区间串补电容前或后才能进行分段查表测距。因此, 首要问题是如何判别故障位于哪个分段。

2 模型建立与分析

2.1 模型建立

电力牵引网测量端口电源侧可根据戴维南等效定理等效为一个带内阻抗的电压源, 由于电力牵引网线路距离短, 可以采用集中参数等效表示^[3], 构造故障在电容前或电容后电力牵引网线路模型如图 3 所示。图中, Z 为电源内阻, u 为端口测量电压, i 为端口测量电流, R 为线路电阻与过渡电阻之和, L 为线路电感, C 为串补电容。 u, i 应满足方程

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(t) dt \quad (1)$$

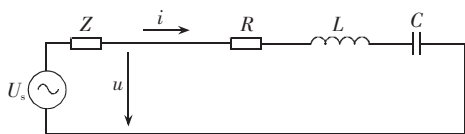


图3 含串补电容电力牵引网故障模型

Fig.3 The fault model of power traction system with series compensation

2.2 模型分析

取不同时刻的电压、电流采样值,得方程组

$$\begin{aligned} u(t_1) &= Ri(t_1) + L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_1} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_1} i(t) dt \\ u(t_2) &= Ri(t_2) + L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_2} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_2} i(t) dt \\ u(t_3) &= Ri(t_3) + L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_3} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_3} i(t) dt \end{aligned} \quad (2)$$

积分分量 $\int_{-\infty}^t i(t) dt$ 拆为 $\int_{-\infty}^0 i(t) dt$ 和 $\int_0^t i(t) dt$, $\int_{-\infty}^0 i(t) dt$ 未知,可以通过增加一个方程组消去。方程组(2)化为

$$\begin{aligned} u(t_1) &= Ri(t_1) + L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_1} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_1} i(t) dt \\ u(t_2) &= Ri(t_2) + L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_2} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_2} i(t) dt \\ u(t_3) &= Ri(t_3) + L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_3} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_3} i(t) dt \\ u(t_4) &= Ri(t_4) + L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_4} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_4} i(t) dt \end{aligned} \quad (3)$$

相减得:

$$\begin{aligned} u(t_2) - u(t_1) &= R[i(t_2) - i(t_1)] + L \left(\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_2} - \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_1} \right) + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \\ u(t_3) - u(t_2) &= R[i(t_3) - i(t_2)] + L \left(\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_3} - \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_2} \right) + \frac{1}{C} \int_{t_2}^{t_3} i(t) dt \\ u(t_4) - u(t_3) &= R[i(t_4) - i(t_3)] + L \left(\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_4} - \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=t_3} \right) + \frac{1}{C} \int_{t_3}^{t_4} i(t) dt \end{aligned} \quad (4)$$

通过对方程组的分析,将微分方程组的微分分量化为差分形式、积分分量按梯形法则求解。将电压、电流采样值代入方程组,即可得到方程解 C ,并可根据 C 值判断故障位于区间串补电容前或后。显然,采用式(4)的方法,能够很好地在基于嵌入式微处理器的装置中进行运算。

2.3 故障判据

当故障发生于区间串补电容前时,测量电容值满足 $C = C_1$;当故障发生于区间串补电容后时,测量

电容满足 $C = (C_1 + C_2) / (C_1 C_2)$ 。在此,把 C 当作参考电容。所以,当线路发生故障时,通过连续对故障电压和电流采样,得到了大量满足式(4)的数据,即可利用多点数据建立起一组微分方程组。例如,取 $t = 1 \sim 4$ 的4组数据建立一个方程组,可得出方程组的一组解 (R, L, C) ;当取 $t = 2 \sim 5$ 的另4组数据,又可得到另一组解。采用 100 点/周期 ($\Delta t = 0.2 \text{ ms}$) 的仿真采样频率,获取故障启动半周期后的 53 组采样数据,得到 50 个方程组,并解得相应的 50 个解。

必须针对一个实际的电力牵引网短路故障,采用模型计算所得出的参数值进行分析比较才能得出结论,判别故障点的位置。在此,提出故障位于串补电容前后的判据如下:

a. 当线路只投入 C_2 时,计算电容满足 $0.9C < C_{\text{测}} < 1.1C$ (其中 $C = C_2$) 的百分比 (这里称吻合度) 达到一定比例 (如 40%, 称吻合度定值),认为故障位于区间串补电容后,反之故障位于区间串补电容前;

b. 当线路投入 C_1 和 C_2 时,计算电容满足 $0.9C < C_{\text{测}} < 1.1C$ (其中 $C = (C_1 + C_2) / (C_1 C_2)$) 的百分比达到一定比例,认为故障位于区间串补电容后,反之故障位于区间串补电容前。

将电力牵引网变电所串补电容、区间串补电容值和它们的投入情况作为整定值整定,按上面的判据进行判断,然后根据常规算法 (如傅氏算法) 得到的电抗值进行查表测距。

3 仿真计算

现以 30 km, 27.5 kV 的电气化铁路含串补供电线路为例进行 ATP 数字仿真,并用 Matlab 6.5 对数据进行处理。系统模型见图 1,系统阻抗 $Z = j4.54 \Omega$; 线路单位阻抗 $z = 0.157 + j0.149 \Omega/\text{km}$,变电所串补电容 $C_1 = 600 \mu\text{F}$,安装于变电所出口,区间串补电容 $C_2 = 800 \mu\text{F}$,安装于距离变电所 10 km 处;当 2 个串补均投入时,参考电容 $C = (C_1 + C_2) / (C_1 C_2) = 343 (\mu\text{F})$ 。

本文针对区间串补电容前、后各处按 $0 \Omega, 10 \Omega, 50 \Omega, 100 \Omega$ 的过渡电阻进行了大量仿真,下面仅列出前后 5 km, 10 km 的数据,采样间隔为 0.2 ms,提取故障发生半个周期后的 53 点采样数据,利用 Matlab 6.5 计算得到 50 个点的计算电容值。对变电所串补电容、区间串补电容均投入时,在不同电压初始相角进行的仿真如表 1 和表 2 所示。

由表 1 和表 2 可见,采用的判据可以很好地判断故障位于区间电容前或电容后,并且不受短路故障角的影响,对于过渡电阻在 100Ω 以内,采用合适的吻合度整定值仍可以作出正确的判断。

仿真是采用变电所电容和区间电容均投入的方式,对于不投入前者只投入后者的方式,可以得到一致的结论,此处不再赘述。必须指出的是,当参考电容量较小时,可以扩大吻合度整定值。当然,必须确保 2 种情况下的参考电容值有足够的分辨区域。

表 1 含串补电容电力牵引网馈线故障仿真结果(5 km)

Tab.1 The simulative results of feeder fault in power traction system with series compensation(5 km)

$\theta_0/(^\circ)$	仿真结果	R/Ω (前 5 km)				R/Ω (后 5 km)			
		0	10	50	100	0	10	50	100
0	吻合度/%	0	0	8	26	96	88	76	42
	判别结果	前	前	前	前	后	后	后	后
45	吻合度/%	0	0	0	4	100	90	100	84
	判别结果	前	前	前	前	后	后	后	后
90	吻合度/%	0	0	0	0	98	80	96	92
	判别结果	前	前	前	前	后	后	后	后
135	吻合度/%	0	0	0	4	100	88	98	78
	判别结果	前	前	前	前	后	后	后	后

注: θ_0 为电压初相角; R 为过渡电阻;表 2 同。

表 2 含串补电容电力牵引网馈线故障仿真结果(10 km)

Tab.2 The simulative results of feeder fault in power traction system with series compensation(10 km)

$\theta_0/(^\circ)$	仿真结果	R/Ω (前 10km)				R/Ω (后 10km)			
		0	10	50	100	0	10	50	100
0	吻合度/%	0	0	6	14	98	94	70	40
	判别结果	前	前	前	前	后	后	后	后
45	吻合度/%	0	0	0	4	98	94	92	80
	判别结果	前	前	前	前	后	后	后	后
90	吻合度/%	0	0	0	0	100	88	94	90
	判别结果	前	前	前	前	后	后	后	后
135	吻合度/%	0	2	0	2	98	80	84	56
	判别结果	前	前	前	前	后	后	后	后

4 结论

通过对含串补的电力牵引网故障模型的研究,建立微分方程模型识别方法,大量的 ATP 仿真和 Matlab 对数据的分析表明,该方法能够很好地判别出故障点相对电容的位置。对不同距离、不同过渡电阻、不同短路角的仿真结果表明方法用于判断故障位于区间串补电容前、后的能力很强。在电力牵引网实际应用中,采用故障发生半周期后的一个周期

的电压、电流采样值,根据变电所串补电容和区间串补电容的投入情况,确定参考电容作为比较判断定值,进而采用电抗分段距离法查表即可准确计算出故障点位置。

参考文献:

[1] 李一锋. 一种适用于串联电容补偿线路的微机距离保护算法[J]. 电力学报,2000,15(3):172-174.
LI Yi-feng. A distance protection algorithm based on computer applicable power transmission lines with series compensators[J]. **Journal of Electric Power**,2000,15(3):172-174.
[2] 索南加乐,陈福锋,王向兵. 基于单端量的串补线路故障点的模型识别 [A]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第 19 届学术年会论文集[C]. 成都:西南交通大学出版社,2003. 867-872.
SUONAN Jia-le,CHEN Fu-feng,WANG Xiang-bing. Model identification of transmission lines with series compensators based on one-terminal quality [A]. **Thesis Collection of the 19th Annual Academical Meeting of CSU-EPSCA**[C]. Chengdu:Southwest Jiaotong University Press, 2003. 867-872.
[3] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京:中国铁道出版社,1993.
[4] 杨奇逊. 微机继电保护基础[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
[5] 薛定宇,陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:



林国松

林国松(1974-),男,广西荔浦人,讲师,博士研究生,研究方向为变电站综合自动化系统和故障测距 (E-mail:lin_guosong@263.sina.com);

陈小川(1963-),男,四川合江人,教授,研究方向为变电站综合自动化系统和故障测距。

Research on fault locating of power traction system with series compensation

LIN Guo-song,CHEN Xiao-chuan

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

Abstract: Reactance method is commonly adopted in fault locating of power traction system. However, the monotone relation between reactance and distance is broken in power traction system with series compensation. Based on $R-L-C$ model, whether the fault location is before or after the compensatory capacitor is detected by analyzing and calculating its differential equation. The simulation with alternative transient program and Matlab shows its effectiveness for cases with different fault anagles and different transitional resistances. After knowing the fault location is before or after the compensatory capacitor, the reactance method can be used to locate the fault.

Key words: fault locating; series compensation; analytic method based on differential equation