

带并联电抗器输电线路永久性故障判别的研究

眭肖钰¹, 赵宏²

(1. 西北电力职工培训中心, 陕西 西安 710054; 2. 西安华瑞能源设计咨询有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要: 以瞬时性故障模型为参考模型, 根据已知量求取并联电抗器故障相电流, 利用该求取电流与并联电抗器故障相实际测量电流之差同中性点小电抗器电流幅值比来实现永久性故障的判别。通过利用 ATP 仿真实验验证和西北电网 330kV 系统的故障数据验证, 结果表明该方法可准确判别瞬时和永久性故障。

关键词: 继电保护; 输电线路; 并联电抗器; 自适应重合闸

Study on identification of permanent fault for transmission lines with shunt reactors

SUI Xiao-yu¹, ZHAO Hong²(1. Electric Engineering Department, Northwest Electric Power Staff Training Center, Xi'an 710054, China
(2. Xi'an HUARUI Energy Sources Design Consulting Ltd, Xi'an 710032, China)

Abstract: The method is to first use transient fault model as reference model to calculate the fault phase current in shunt reactor, and then to employ amplitude ratio of the differential current and the measured current in the neutral reactor to determine the nature of the fault. ATP simulations and recored fault data from 330kV line in Northwest Power System show that two methods both can identify transient and permanent fault correctly and reliably under high-resistance grounding fault conditions.

Key words: relaying protection; transmission line; shunt reactor; adaptive reclosing

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)18-0043-04

0 引言

输电线路是电力系统中的重要环节, 其故障以单相接地故障为主要形式, 并且单相接地故障中绝大多数为瞬时性故障。因此采用单相自动重合闸技术在瞬时性故障时能够快速恢复供电, 对于电力系统经济运行具有重要意义。

目前的单相自适应重合闸方法^[1-3]都是基于电压量的, 易受到 PT 二次回路不可靠的影响和测量精度的影响, 且对于带并联电抗器线路由于恢复电压低且存在幅值与工频成分接近的低频分量, 导致当前的方法难以用于带并联电抗器的输电线路。

考虑到带并联电抗器的输电线路上都安装有专门的电抗器保护^[4,5], 以补偿线路运行中的容性充电功率, 稳定系统运行电压。对于并联电抗器这种元件, 利用安装于并联电抗器上 CT 测量电流作为断开相端电流具有很高的精度。并联电抗器 CT 最大工作电流是按正常状态电流整定 (通常有数百安培), 变比较小, 小电流时测量误差小, 能够准确测量几安培的小电流; 断开相电流一般有几十安培, 采用并联电抗器侧 CT 很容易准确测量。为此, 本

文在分析基于电压量的判别方法的基础之上, 探讨了一种利用电流量的永久性故障判别方法并进行分析验证, 以期能够适用于实际线路系统。

1 永久性故障判别原理及方法

在线路发生单相接地故障时, 无论发生瞬时性故障还是永久性故障, 都以瞬时性故障为参考模型, 在已知 N 侧中性点小电抗器电流 i_{n0} 和健全相电压 \dot{U}_{nb} 、 \dot{U}_{nc} 的情况下求取并联电抗器故障相电流 \hat{i}_{nax} 。通过求取电流 \hat{i}_{nax} 和实际测量电流 i_{nax} 的比较来区分瞬时性故障和永久性故障。

瞬时性故障时, 故障模型和参考模型一致, 此时并联电抗器故障相求取电流 \hat{i}_{nax} 应与实际测量电流 i_{nax} 相等。即:

$$\hat{i}_{nax} - i_{nax} = 0 \quad (1)$$

永久性故障时, 故障模型和参考模型不一致, 此时并联电抗器故障相求取电流 \hat{i}_{nax} 应与实际测量电流 i_{nax} 不相等。即:

$$\hat{i}_{\text{max}} - i_{\text{max}} \neq 0 \quad (2)$$

据此可以有效地区分瞬时性故障和永久性故障。

实际上,发生瞬时性故障时,由于各种误差的影响, $\hat{i}_{\text{max}} - i_{\text{max}} \neq 0$, 将有一不平衡电流产生。为了提高重合闸动作的成功率,判据的整定应能保证永久性故障判别的可靠性。

考虑到并联电抗器故障相电流 i_{max} 很小,中性点小电抗器电流 i_{n0} 主要由健全相电流决定,即 $i_{\text{n0}} \approx i_{\text{nbx}} + i_{\text{ncx}}$ 。因此在瞬时性故障和永久性故障情况下 i_{n0} 的幅值变化很小。

根据前面分析,可以给出如下形式的判据:

$$\left| \hat{i}_{\text{max}} - i_{\text{max}} \right| \geq K_k \left| i_{\text{n0}} \right| \quad (3)$$

其中: K_k 为常数。式(3)成立时,即判为永久性故障,重合闸不动作;式(3)不成立时,即判为瞬时性故障,重合闸进行合闸动作。

2 仿真结果

宝鸡雍城至天水陇西 330 kV 线路全长 292.806 km, 等效双电源系统如图 1 所示。

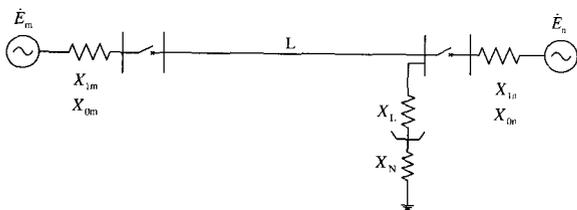


图1 一端带并联电抗器线路系统等效图

Fig.1 Transmission line with one shunt reactors

两侧系统阻抗:

$$X_{lm} = 29.8872 \Omega, \quad X_{om} = 47.1577 \Omega,$$

$$X_{ln} = 12.5095 \Omega, \quad X_{on} = 15.1757 \Omega,$$

线路参数:

$$Z_{l1} = 0.05084 + 0.35362 \Omega/\text{km}$$

$$Z_{l0} = 0.27319 + 1.05449 \Omega/\text{km}$$

$$\omega c_1 = 3.6155 \times 10^{-6} \text{ S/km}$$

$$\omega c_0 = 2.3905 \times 10^{-6} \text{ S/km}$$

并联电抗器参数:

$$X_L = 1488 \Omega, \quad X_N = 433.9 \Omega.$$

为了验证上述原理,利用 ATP 进行上述线路模型在不同故障情况下的仿真。假定 A 相为故障相,故障发生 300 ms 后开始计算,断路器在 130 ms 跳开,采样频率为 2000 Hz,即每周波 40 点。经过不

同过渡电阻接地时,仿真结果如表 1。

表 1 仿真结果示例 ($K_k=0.08$)

Tab.1 The results of simulations

故障位置 / (%)	电源相角差 / (°)	过渡电阻 / Ω	瞬时性故障		永久性故障	
			$\left \hat{i}_{\text{max}} - i_{\text{max}} \right / \left i_{\text{n0}} \right $	判别结果	$\left \hat{i}_{\text{max}} - i_{\text{max}} \right / \left i_{\text{n0}} \right $	判别结果
0	10	0	0.0236	瞬时	0.0916	永久
		100	0.0227	瞬时	0.0914	永久
		300	0.0223	瞬时	0.0907	永久
	30	0	0.0276	瞬时	0.1032	永久
		100	0.0293	瞬时	0.1030	永久
		300	0.0287	瞬时	0.1020	永久
50	60	0	0.0365	瞬时	0.1292	永久
		100	0.0379	瞬时	0.1287	永久
		300	0.0374	瞬时	0.1273	永久
	10	0	0.0224	瞬时	0.0864	永久
		100	0.0223	瞬时	0.0866	永久
		300	0.0214	瞬时	0.0864	永久
100	30	0	0.0290	瞬时	0.1138	永久
		100	0.0289	瞬时	0.1148	永久
		300	0.0267	瞬时	0.1158	永久
	60	0	0.0356	瞬时	0.1879	永久
		100	0.0361	瞬时	0.1886	永久
		300	0.0369	瞬时	0.1893	永久
300	10	0	0.0245	瞬时	0.0924	永久
		100	0.0252	瞬时	0.0930	永久
		300	0.0217	瞬时	0.0937	永久
	60	0	0.0310	瞬时	0.2545	永久
		100	0.0274	瞬时	0.2543	永久
		300	0.0286	瞬时	0.2525	永久
300	0	0.0408	瞬时	0.5122	永久	
	60	0.0404	瞬时	0.5090	永久	
300	0.0402	瞬时	0.5000	永久		

为了分析方便,将判据 $\left| \hat{i}_{\text{max}} - i_{\text{max}} \right| \geq K_k \left| i_{\text{n0}} \right|$ 变形

为 $\left| \hat{i}_{\text{max}} - i_{\text{max}} \right| / \left| i_{\text{n0}} \right| \geq K_k$ 进行误差分析。取

$\left| \hat{i}_{\text{max}} - i_{\text{max}} \right| / \left| i_{\text{n0}} \right|$ 为动作量, K_k 为制动量。根据线路模型要求, K_k 取值 0.08。

由表 1 的误差分析结果可知:

(1) 对一端带并联电抗器线路来说,发生瞬时性故障时判据 $\left| \hat{i}_{\text{max}} - i_{\text{max}} \right| / \left| i_{\text{n0}} \right|$ 值接近 0,而发生永久性故障时 $\left| \hat{i}_{\text{max}} - i_{\text{max}} \right| / \left| i_{\text{n0}} \right|$ 值最小都在 0.08 以上,

永久性故障时明显大于瞬时性故障, 能够可靠判别永久性故障。

(2) 判据 $\left| \hat{i}_{\max} - i_{\max} \right| / |i_{n0}|$ 受过渡电阻的影响很小, 其耐过渡电阻能力强; 在金属性接地和经 500Ω 过渡电阻接地时, $\left| \hat{i}_{\max} - i_{\max} \right| / |i_{n0}|$ 值变化很小, 并且经 500Ω 过渡电阻接地时判据仍能可靠识别永久性故障。

(3) 负荷电流大小 (电源相角差大小) 对一端带并联电抗器的线路有一定的影响, 随着负荷电流的增大, 瞬时性故障的判据误差也增大; 但是 $\left| \hat{i}_{\max} - i_{\max} \right| / |i_{n0}|$ 值在瞬时性故障与永久性故障时的差异依旧明显。

(4) 在线路不同位置发生故障时, 瞬时性故障和永久性故障依旧差异很大, 判别方法仍具有较高的灵敏性。

3 实例分析

本文取用的现场录波数据为西北电网朱榆线榆林站某次故障的录波数据。

朱榆线 330 kV 系统参数: 线路全长 229.1 km, 线路参数为 $Z_{01} = 0.05 + j0.06126 \Omega/\text{km}$, $Z_{02} = 0.321 + j0.1838 \Omega/\text{km}$, $\omega_{c1} = 3.4557 \times 10^{-6} \text{ S/km}$, $\omega_{c0} = 2.9205 \times 10^{-6} \text{ S/km}$, 并联电抗器参数 $X_L = 2260.54 \Omega$; $X_N = 300 \Omega$ 。

朱榆线在 2007 年 07 月 11 日 04 时 19 分 40 秒发生单相接地故障, 榆林站记录的母线电压及相电流录波图如图 2、图 3 所示。其中采样频率为 1200 Hz。

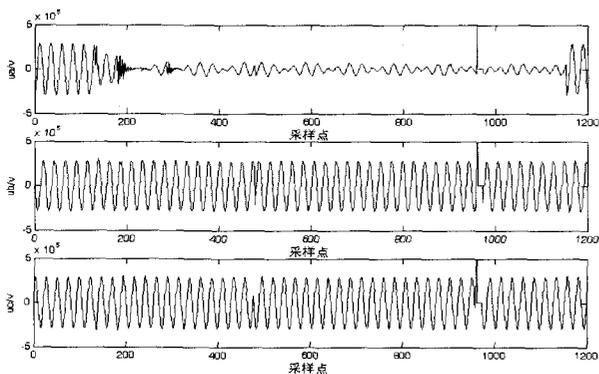


图2 电压录波图

Fig.2 The voltage in power system fault recorder

由录波图可以看出, A相发生瞬时性接地故障, 对应的故障相电压具有明显的拍频现象, 且恢复阶

段的故障相电压幅值小。

利用上述录波数据求取的并联电抗器故障相电流与实测电流对比结果如图4所示。

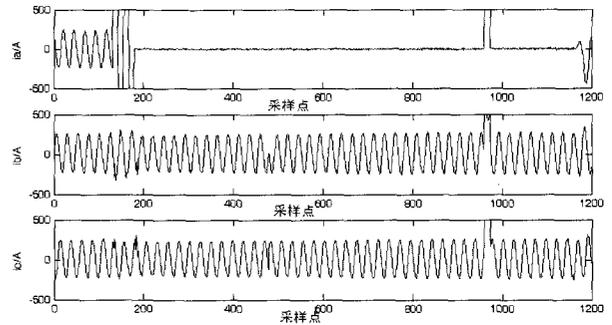


图3 电流录波图

Fig.3 The current in power system fault recorder

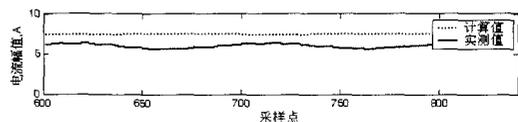


图4 故障相计算电流与实测电流对比结果

Fig.4 Calculated current and the measured current of fault phase

取判据 $\left| \hat{i}_{\max} - i_{\max} \right| / |i_{n0}| \geq K_k$ 中 K_k 取值 0.08。图 5、图 6 给出了故障相计算电流与实际电流的差电流幅值及相应的误差分析结果。

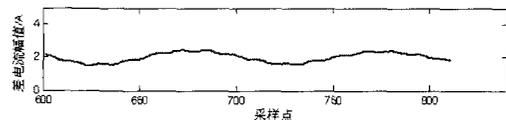


图5 故障相差电流幅值结果

Fig.5 The differential current amplitude of fault phase

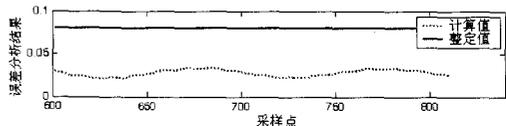


图6 误差分析结果

Fig.6 The analysis of errors

由图 5、图 6 可知: 仿真结果表明, 在瞬时性故障时并联电抗器故障相电流的计算值与实测值十分接近, 对应的差电流幅值也较小, 有力地证明了本文所分析的基于电流量的永久性故障判别方法的有效性。

4 结论

本文利用带并联电抗器线路电流易准确获取的

特点,分析了一种新的利用电流量的永久性故障判别方法。该方法以瞬时性故障模型为计算模型,据单端已知电气量求取故障相并联电抗器电流,利用该求取电流与实际测量电流的差电流同中性点小电抗的电流幅值比来实现永久性故障的判别。通过在不同条件下大量的 ATP 仿真和 Matlab 计算验证,不但仿真结果理想,而且应用于超高压线路故障实例数据时故障判定正确,证明了该算法的实际应用性好。

参考文献

- [1] 宋国兵, 索南加乐, 孙丹丹. 输电线路永久性故障判别方法综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 75-80.
SONG Guo-bing, SUONAN Jia-le, SUN Dan-dan. A Survey on Methods to Distinguish Permanent Faults from Instantaneous Faults in Transmission Lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 75-80.
- [2] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时性故障和永久性故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23-32.
GE Yao-zhong. Identification of Temporary Fault and Permanent Fault for Single-phase Reclosure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(2): 23-32.
- [3] GE Yao-zhong, SUI Feng-hai, XIAO Yuan. Prediction Methods for Preventing Single-phase Re-closing on Permanent Fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.
- [4] 牛小明, 王小彤, 施围, 等. 超高压串联补偿输电线路的潜供电流和恢复电压[J]. 电网技术, 1998, 22(9): 9-16.

NIU Xiao-ming, WANG Xiao-tong, SHU Wei, et al. Secondary Arc Current and Recovery Voltage of Series Compensated EHV Transmission Line[J]. Power System Technology, 1998, 22(9): 9-16.

- [5] 索南加乐, 张怪宁, 齐军, 等. II 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 12-18.
SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Study of Differential Protection Using Time-domain Capacitive Current Compensating Algorithm on II-model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18.
- [6] 索南加乐, 宋国兵, 许庆强, 等. 任意长度数据窗幅频特性一致的正交相量滤波器设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 45-49.
SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, XU Qing-qiang, et al. The Design of Orthogonal Phasor Filter with Identical Magnitude-Frequency Characteristics and Optional Data-Window[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 45-49.
- [7] 伍叶凯, 邹东霞. 电容电流对差动保护的影响及补偿方案[J]. 继电器, 1997, 25(4): 4-8.
WU Ye-kai, ZOU Dong-xia. The Influence of Capacitance Current to Differential Protection and Its Compensation Scheme[J]. Relay, 1997, 25(4): 4-8.

收稿日期: 2007-12-17; 修回日期: 2008-01-10

作者简介:

陆肖钰 (1975-), 女, 讲师, 从事供用电管理, 故障判别的研 究、教学; E-mail: sxy_20032003@126.com
赵 宏 (1972-), 男, 工程师, 从事电力工程设计。

(上接第 9 页 continued from page 9)

- GAO Juan. Artificial Neural Network Theory and Emulation Example[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [10] 陈伟, 冯斌. 基于 QPSO 算法的 RBF 神经网络参数优化仿真研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(8): 1928-1930.
CHEN Wei, FENG Bin. Simulation Study on the Parameters Optimization of Radial Basis Function Neural Network Based on QPSO Algorithm[J]. Computer Application, 2006, 26(8): 1928-1930.
- [11] 程其云, 王有元, 陈伟根. 基于改进主成分分析的短期负荷预测方法[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 64-67.
CHENG Qi-yun, WANG You-yuan, CHEN Wei-gen. Modified Principal Component Analysis Based Short-term Load Forecasting[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 64-67.
- [12] 姚李孝, 宋玲芳, 李庆宇. 基于模糊聚类分析与 BP 网络的电力系统短期负荷预测[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 20-23.
YAO Li-xiao, SONG Ling-fang, LI Qing-yu. Power System Short-term Load Forecasting Based on Fuzzy Clustering Analysis and BP Neuralnet Work[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 20-23.

- [13] 张涛, 赵登福, 周琳, 等. 基于 RBF 神经网络和专家系统的短期负荷预测方法[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(4): 3-6.
ZHANG Tao, ZHAO Deng-fu, ZHOU Lin, et al. Short Term Load Forecasting Using Radial Basis Function Networks and Expert System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(4): 3-6.
- [14] 王平, 张亮, 陈星莺. 基于模糊聚类与 RBF 网络的短期负荷预测[J]. 继电器, 2006, 34(10): 64-67.
WANG Ping, ZHANG Liang, CHEN Xing-ying. Short Term Load Forecasting Using Radial Basis Function Networks and Fuzzy Clustering[J]. Relay, 2006, 34(10): 64-67.

收稿日期: 2007-12-05; 修回日期: 2008-01-09

作者简介:

田 书 (1963-), 女, 副教授, 从事电力系统综合自动化、微机继电保护的应用和研究;
刘团结 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能控制与信息处理技术; E-mail: liutuanjie0107@163.com
胡艳丽 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程。