

# 配电网中接地故障检测新思路

王 智

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘 要:**提出一种新的适用于中性点不接地或非直接接地配电系统的接地故障检测算法。该方法是基于故障时由暂态电压和暂态电流计算而得到的暂态阻抗,然后根据暂态阻抗计算出的接地电容来实现接地故障的检测。利用 Matlab/Simulink 仿真,模拟了 3 种不同故障条件下的仿真过程,验证了该方法的可行性。最后阐述了测量误差减小的方法以及判定故障整定值的确定。

**关键词:**配电系统;暂态阻抗;接地电容;接地故障

**Abstract:** A new algorithm of earth fault detection is proposed which is suitable for neutral point unearthed or indirectly earthed distribution system. This method is based on transient impedance which is calculated by transient voltage and transient current. Then the detection of earth fault is realized using earth capacitance calculated based on transient impedance. The simulation process is under three different fault conditions by using Matlab/Simulink. The results prove that the method is feasible. At last, a method is proposed to overcome the errors and the setting is determined if the feeder is faulted or not.

**Key words:** distribution system; transient impedance; earth capacitance; earth fault

**中图分类号:** TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0046-03

在配电网系统中单相接地故障发生的概率很高,当中性点不接地系统中发生单相接地时,故障相的对地电容被短路,故障点流过全系统对地电容电流<sup>[1]</sup>,单相接地故障的电流值主要取决于接地电容的大小。当发生单相接地后,故障相对地电压降低,非故障相对地电压升高,暂态电容电流由两部分组成:故障相放电电容电流和非故障相充电电容电流。前者衰减很快,其振荡频率可高达数千赫兹。后者衰减较慢,其振荡频率也较低,仅数百赫兹。前者的幅值很小,仅为后者幅值的 5%~10%<sup>[2-3]</sup>。当中性点不接地系统中发生单相接地时,故障电流很小,可能会减小传统继电器的灵敏度。然而暂态电容电流提供了可能的故障信息,可以被用来作为基于暂态信息的故障检测。因此,通过测量暂态电容的值可以判断线路是否发生了接地故障。单相接地暂态电流的分布如图 1 所示。

换等<sup>[4,5]</sup>。通过上述变换都可以变换为:零模量、第 1 模量、第 2 模量。这 3 种模变换的零模量都是相同的,其零模量变换的表达式如下。

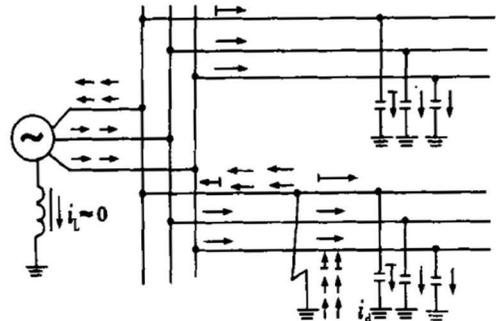


图 1 单相接地暂态电流分布图

$$v(t)_0 = \frac{1}{3} [v_a(t) + v_b(t) + v_c(t)] \quad (1)$$

$$i(t)_0 = \frac{1}{3} [i_a(t) + i_b(t) + i_c(t)] \quad (2)$$

当线路正常运行时,电压和电流的零模量值为零。反之,线路发生接地故障时,电压和电流的零模量值不再为零,因而可以利用其作为接地故障的判断依据。

## 1.2 仿真模型的建立

为了验证该方法的可行性,采用图 2 所示系统仿真模型进行仿真说明。用 Simulink 对图 2 所示的配电网进行仿真,并用 Matlab 进行算法的验证。

## 1 基于暂态阻抗的接地故障检测

### 1.1 相模变换在暂态保护中的应用

在电力系统中三相线路之间存在着复杂的电磁耦合关系,为了简化计算可以利用相模变换技术等等效成 3 个独立的模量计算。目前在继电保护中常采用的变换有:Clark 变换、Karrenbauer 变换、W edepohl 变

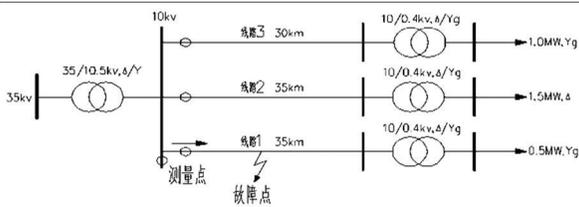
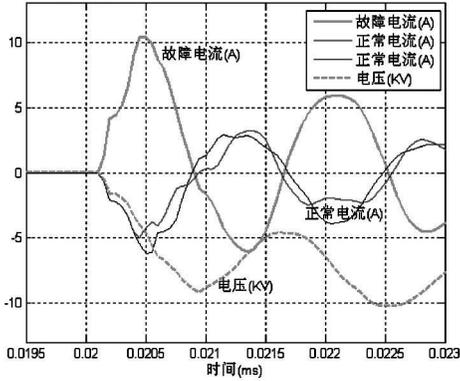


图 2 仿真的配电网



(故障时刻 20 ms 1 Ω 故障电阻, 42.9% 故障距离)

图 3 测量点电压和电流零模量的波形

通过 Simulink 对图 2 所示的配电网进行仿真后得到测量点的电压和电流的零模量波形如图 3 所示。由图 3 可知,所有的非故障线路的电流零模量波形基本上是相同的,但是故障线路的电流零模量波形就完全不同了。线路发生接地故障后,暂态发生在其随后的几个毫秒内。在所有不同的故障条件下(不同的故障时间、故障电阻和故障距离),通过仿真的结果观察可以得到:一个 8 ms 的暂态窗口足可以提取出暂态频率。由 powergui 模块中的 FFT(快速傅里叶变换)分析可知,暂态主频为 625 Hz 即暂态的主周期为 1.6 ms。在此周期内,计算电压和电流的零模量值,并由电压和故障电流的零模量比值计算出暂态阻抗。由于正弦信号波形的平均值为零,所以采用信号的平均值以消除更高频率信号的影响。为了确保极性相同,在这里只计算信号在此周期内前半周期的平均值<sup>[6]</sup>,其平均电压、平均电流、平均阻抗的计算公式如下所示。

$$V_0 = \frac{\sum_{k=1}^N v_{0,k}}{N} \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{\sum_{k=1}^N i_{0,k}}{N} \quad (4)$$

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (5)$$

其中,  $v_{0,k}$  为采样时刻  $k$  时的瞬时电压零模量值,由式 (1) 计算可得,  $i_{0,k}$  为采样时刻  $k$  时的瞬时电流零

模量值,由式 (2) 计算可得,  $N$  为前半周期的采样个数,仿真中的离散采样周期为  $50 \mu s$ 。

由于故障电流是由流过其他未发生接地故障的并联线路的接地电容电流组成,所以计算暂态阻抗的大小主要取决于其他未发生接地故障的并联线路的接地电容<sup>[6]</sup>,接地电容的大小取决于线路的类型和长度。网络中的其他阻抗比接地电容小得多,因而可以被忽略。

因此,对于故障线路,计算阻抗就等于其他未发生接地故障的并联线路的容抗;而对于正常线路,计算阻抗就等于其线路本身的接地电容的容抗。根据图 1 和图 2 可知,由于故障电流的方向和测量的方向相反,所以故障线路的计算阻抗为负值,这也验证了方向性技术。

所提出的算法是基于接地电容的计算,根据暂态主频和计算阻抗,由式 (6) 可以计算出接地电容。

$$C_0 = \frac{1}{2\pi f Z_0} \quad (6)$$

其中,  $f$  为暂态主频;  $Z_0$  为由式 (5) 计算出的平均阻抗。

对于图 3 所示的仿真波形,其各计算值见表 1 (暂态主频  $f = 625 \text{ Hz}$  电压  $V_0 = -4.937 \text{ kV}$ )。

表 1 各条线路各电气量计算值

	故障线路 1	正常线路 2	正常线路 3
电流 /A	5.923	-3.294	-2.624
阻抗 /kΩ	-0.834	1.499	1.882
电容 /μF	-0.306	0.170	0.135

由于该算法存在一些误差,比如:忽略了网络的其他阻抗、采样频率的影响、放电暂态频率的影响,所以计算出的电容并不是很精确。为了减小这些误差,提出了使用计算电容和线路总电容的比值作为线路是否发生故障的判据,其计算式如下。

$$K = \frac{C_{0,f}}{C_{0,z}} \quad (7)$$

电容是和线路的长度成正比的。本仿真模型中,各线路的长度分别为 35 km、35 km、30 km,总长度为 100 km,因此,可以算出各线路分别在正常和故障条件下的比值  $K$  (见表 2)。

表 2 各线路在正常和故障条件下的比值  $K$

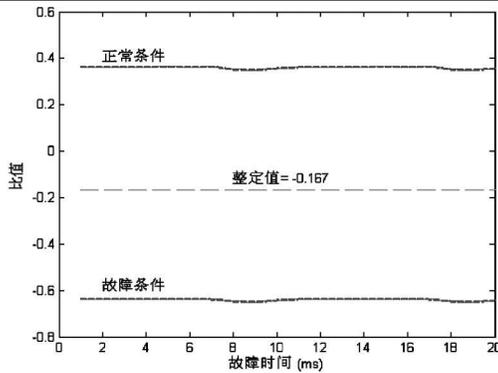
	线路 1	线路 2	线路 3
正常条件	0.35	0.35	0.30
故障条件	-0.65	-0.65	-0.70

对于同一线路而言,正常条件下和故障条件下比

值的模之和等于 1。本仿真模型中,由计算可知线路的总电容为  $0.475 \mu\text{F}$ ,通过该算法可以计算出线路 1 在正常条件下的比值为 0.358 在故障条件下的比值为  $-0.643$ 。由上述各线路分别在正常和故障条件下的比值  $K$  可得,正常条件下的平均比值为 0.333,故障条件下的平均比值为  $-0.667$ 。对于中性点非直接接地的情况,暂态情况基本上和中性点不接地的情况一样。

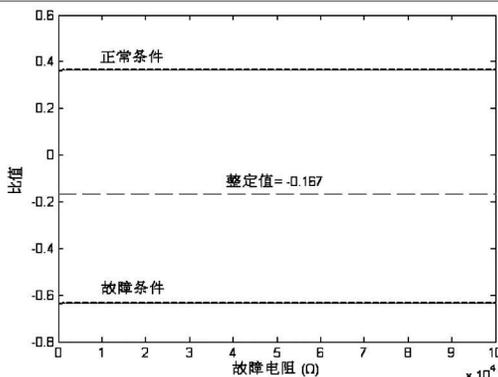
## 2 结果分析和整定值的确定

图 4 为线路 1 在正常和故障条件下的比值随故障时刻变化的波形,图 5 为比值随故障电阻变化的波形,图 6 为比值随故障距离变化的波形。



( $1 \Omega$  故障电阻, 42.9% 故障距离)

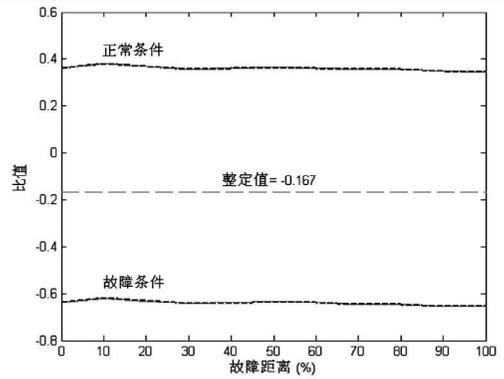
图 4 比值随故障时刻的变化



(故障时刻 20 ms 42.9% 故障距离)

图 5 比值随故障电阻的变化

对于中性点非直接接地的系统,正常和故障条件下的比值变化波形几乎和上面的变化波形是一样的。比值的整定值就取介于正常和故障条件下比值的中间值,正常和故障条件下的比值分别为 0.333、 $-0.667$ ,所以整定值为  $-0.167$ 。整定值的极限值为 0 和  $-0.5$ ,前者对应于网络只有两条线路的情况,后者对应于网络有很多条线路的情况。所以,整定值总是为负数。



(故障时刻 20 ms  $1 \Omega$  故障电阻)

图 6 比值随故障距离的变化

由图 4、5、6 可知,正常和故障条件下的比值之间还有很大的间隙,这个间隙足够可以包括其他的误差原因引起不正确的更大或更小的比值,因而本算法可以有效地使用。

在本仿真系统中,故障条件下平均比值的模是正常条件下平均比值的模的 2 倍,这和网络的线路条数相关。在故障条件下,有 1 条故障线路和 2 条正常线路,所以平均值的模值之间存在一个因子 2。当选择一个合适的整定值时,该算法就不会受网络中线路数目的多少而影响。整定值取为  $-0.25$  时,就可以适用于不同的配电网结构中。

## 3 结 语

提出了一种新的基于暂态阻抗的接地故障检测方法,它适用于中性点不接地或非直接接地系统中。该算法是基于暂态主频的确定,在暂态主周期内计算暂态容抗,从而可以算出接地电容。在故障条件下,故障线路中计算出的接地电容等于其他与之并联的所有非故障线路的接地电容之和;在正常条件下,其计算出的接地电容就等于线路本身的接地电容。本算法通过 Simulink 建立仿真模型,并由 Matlab 计算了在各种故障条件下的可行性。为了减小误差的影响,提出使用计算电容和线路总电容的比值作为线路是否发生故障的判据。正常和故障条件下的比值之间还有很大的间隙,这个间隙足够可以包括其他的误差原因引起不正确的更大或更小的比值。整定值的极限值为 0 和  $-0.5$ ,取其平均值  $-0.25$ ,则可以适用于不同的配电网结构中。

### 参考文献

(下转第 55 页)

表 1 净化处理前六氟化硫分析结果

检测项目	回收单位	成都电业局	二台山变电站	古城变电站	标准值
六氟化硫质量分数 /%		99.8953	99.8913	99.8918	$\geq 99.9$
空气质量分数 /%		0.0724	0.0825	0.0711	$\leq 0.04$
四氟化碳质量分数 /%		0.0316	0.0253	0.0365	$\leq 0.04$
水分质量分数 / (mg/kg)		3.2	4.6	2.8	$\leq 5$
酸度 (以 HF 计) 质量分数 / (mg/kg)		0.13	0.15	0.15	$\leq 0.2$
可水解氟化物 (以 HF 计) / (mg/kg)		0.8	0.8	0.6	$\leq 1.0$
矿物油质量分数 / (mg/kg)		2.5	3.4	2.1	$\leq 4$

表 2 净化处理后六氟化硫分析结果

检测项目	回收单位	成都电业局	二台山变电站	古城变电站	标准值
六氟化硫质量分数 /%		99.9925	99.9816	99.9870	$\geq 99.9$
空气质量分数 /%		0.0038	0.0169	0.0071	$\leq 0.04$
四氟化碳质量分数 /%		0.0027	0.0007	0.0056	$\leq 0.04$
水分质量分数 / (mg/kg)		2.0	4.1	2.1	$\leq 5$
酸度 (以 HF 计) 质量分数 / (mg/kg)		0.08	0.11	0.08	$\leq 0.2$
可水解氟化物 (以 HF 计) / (mg/kg)		0.3	0.7	0.3	$\leq 1.0$
矿物油质量分数 / (mg/kg)		0.6	2.9	0.6	$\leq 4$

## 4 结论

六氟化硫气体回收净化处理工作,应综合考虑工作安全、是否符合国家相关规定、运行成本与工期要求等诸多问题。

四川省电力公司六氟化硫气体净化处理系统,可使运行过的六氟化硫气体处理达到《工业六氟化硫》(GB/T 12022-2006)要求,配合专业的六氟化硫回收回充设备和六氟化硫辅助回收回充设备,可以高效安全地完成六氟化硫回收回充工作,具有良好的经济效益和社会效益。

四川省电力公司在六氟化硫回收净化处理工作中形成了“分散回收、集中处理”的管理模式。即检修前回收气体,回收后的气体集中由处理中心处理,经检验达标后回充使用。通过“分散回收、集中处理”的管理,可以实现四川省电力公司六氟化硫设备检修气体的全面回收、全面处理和全面回用。既保证设备检修后的气体质量,又节约大量成本,同时保护本地区环境。

## 参考文献

- [1] 孟玉婵,朱芳菲. 电气设备用六氟化硫的检测与监督 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 李建基. 高压开关设备使用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] 刘英卫,钟世强,祁炯,等. 六氟化硫气体回收处理技术及设备 [J]. 电力设备, 2008, 9(8): 14-17.

(收稿日期: 2010-12-01)

(上接第 48 页)

- [1] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] M. Lehtonen and T. Hakola. Neutral Earthing and Power System Protection—Earthing Solutions and Protective Relaying in Medium Voltage Distribution Networks [M]. Vassa Finland: ABB Transmitt Oy, 1996.
- [3] S. Hanninen, M. Lehtonen, T. Hakola, E. Antila, J. Strm and S. Ingman. Characteristics of Earth Faults in Power Systems with a Compensated or an Unearthed Neutral [J]. CIGRE, June 1997, 2161-2165.

- [4] 王安定,葛耀中. 模量变换技术在反应故障分量的微机保护中的应用研究 [J]. 电力系统自动化, 1988, 12(3): 15-25.
- [5] 和敬涵,范瑜,薄志谦,等. 基于对称分量变换的暂态电流极性方向比较保护算法 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 115-120.
- [6] R. Kaczmarek, W.-Y. Huang and P. Bastard. Equivalent Circuit Application to a Phase to Ground Fault Detection in Distribution Networks Without Voltage Measurements [J]. SUPELEC, France, 2004, 481-485.

(收稿日期: 2010-09-15)