

在单相自动重合闸中检测电弧故障的新方法

范越, 施围

(西安交通大学, 陕西 西安 710049)

【摘要】 电弧的非线性特性, 将使弧道上的电压有高次谐波分量, 从而使母线电压同样含有高次谐波分量, 文章用 EMTP 中分段线性化的电阻模拟电弧, 计算了一个电弧接地的系统的母线电压, 对故障前和故障后对母线电压进行了傅立叶变换, 通过检测高次谐波分量的变化情况来检测“瞬时性”故障。

【关键词】 单相自动重合闸; 电弧; 谐波

1 引言

超高压输电线路故障中, 90%以上为单相接地故障, 而单相接地故障中约有80%为“瞬时性”故障, 因此, 采用单相自动重合闸, 能提高系统的暂态稳定性及供电的可靠性, 但若重合于永久性故障, 将对系统及设备带来危害, 如能正确区分“瞬时性”和“永久性”故障, 则对系统正常运行和设备安全都是大有好处的。

文^[1]用断开相感应电压的幅值, 对“永久性”与“瞬时性”故障进行区分, 但该方法受系统运行方式、接地电阻阻值等的影响; 文^[2]通过分析了故障后母线电压的特征频率, 其采集母线电压波形的时间为故障前至二次电弧熄弧后的一段时间, 由于两种故障波形有相似性: 如故障产生的暂态过程及开关操作的暂态过程等, 因此其母线电压频率有相同之处, 需要用神经网络来区分两种故障, 方法较为复杂。

本文分析了电弧的非线性产生的谐波使母线电压畸变, 通过对母线电压的傅立叶变换, 得到母线电压的谐波含量, 检测电弧故障的有无, 为避免故障暂态过程及二次电弧对母线电压的频率分量的影响, 母线电压的取样时间为开关断开前的一个周波。

2 一次电弧模型

一次电弧中流过的是较大的短路电流, 电弧的长度较稳定, 电弧的压降主要是在弧柱上, 弧角上的压降可以忽略, 空气中的长弧与开关中的电弧有一定的相似性。电弧的动态特性可用电弧方程表示:

$$\frac{dg}{dt} = f(g, u, i, t)$$

其中, g 为电弧的电导, u 和 i 为电弧的电压和电流, 要精确描述电弧的动态特性, 需要通过实验得到电弧的参数, 而另一方面, 实验表明, 电弧电压在

一个周期中的多数时间保持不变, 文^[3]指出: 在 1.4 ~ 24kA 电流范围内, 电弧的电位梯度为 15V/cm, Strom^[3]通过实验方法得到电弧的伏-安特性如图 1 所示。可见, 由于“瞬时性”故障绝大部分为绝缘子串的闪络, 因此, “瞬时性”故障, 电弧最高电压决定于绝缘子串的闪络长度。而“永久性”故障是由于线路倒杆、断线、绝缘子击穿或损坏等, 即使有电弧, 其电弧的长度也是很小的, 电弧的压降可忽略, 因此, 可以认为: “瞬时性”故障时, 故障点有电弧电压, “永久性”故障时, 故障点没有电弧电压, 另外, 从图上可以看出, 可以近似用分段线性的伏-安特性来模拟电弧。

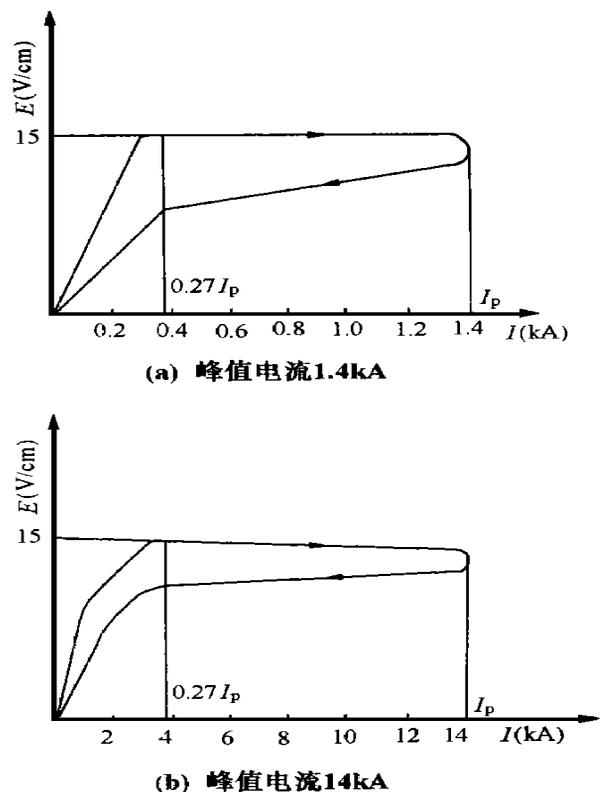


图1 电弧伏-安特性曲线

下面分析电弧电流^[4]。

线路用 $R、L$ 集中参数表示, 电源为 $E = E_m \cos t$, 电弧电阻为 R_f , 则有如图 2 所示的电路。电路方程为:

$$L \frac{di}{dt} + iR + u_h = E_m \cos t \quad (1)$$

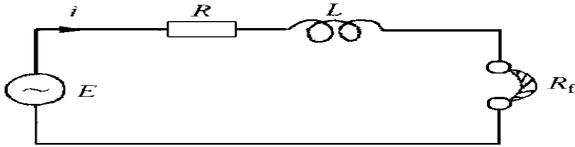


图 2 含有电弧的交流电路

为考察电弧的影响, 作如下假设: (1) 电阻 R 与 L 相比很小, 可将 R 略去; (2) 电流过零为计时起点, 此时电源电压为最大值; (3) $t = /$ 时电弧燃烧, 为起弧角; (4) 电弧电压为常数 u_h , 并随电流改变正负号, 式(1)可写为:

$$di = \frac{E_m}{L} (\cos t - \frac{u_h}{E_m}) dt \quad (2)$$

在电流正半周内将上式积分, 有:

$$i = \frac{E_m}{L} \int_0^t (\cos(\tau) - \frac{u_h}{E_m}) d(\tau) = \frac{E_m}{L} [\sin t - \frac{u_h}{E_m} (t -)] \quad (3)$$

同样, 可求得负半周时的电流, 从式(3)可以看出, 电弧电流由工频电流分量和受电弧电压影响的另一个分量组成, 由于电弧电压较小, 故电流的畸变较小, 即电流主要为基频。

3 母线电压的高次谐波

非线性电阻的存在将使电压、电流产生畸变, 即非线性电阻电压、电流有谐波分量存在, 从而母线上电压、电流也有谐波存在。电弧电压与母线电压的关系如图 3 所示, $u_k、i_k$ 为电弧点的电压与电流, k 代表 k 次谐波, z_k 为线路在 k 次谐波下的阻抗。

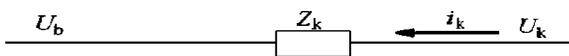


图 3 等值电路图

发生单相短路时, 将电路分为正序、负序、零序, 有下式成立。

$$u_{bkp} = u_{akp} - i_{kp} Z_{kp} \quad (4)$$

$$u_{bk n} = u_{ak n} - i_{k n} Z_{k n} \quad (5)$$

$$u_{bk 0} = u_{ak 0} - i_{k 0} Z_{k 0} \quad (6)$$

其中, k 表示 k 次谐波, p 表示正序, n 表示负序, 0 表示零序。

$$i_{k 0} = i_{k p} = i_{k n} = \frac{1}{3} i_k$$

(4) + (5) + (6) 得:

$$u_{bk} = u_{ak} - (i_{kp} Z_{kp} + i_{kn} Z_{kn} + i_{k0} Z_{k0}) = u_{ak} - \frac{1}{3} i_k (Z_{kp} + Z_{kn} + Z_{k0}) \quad (7)$$

由此可见, 在发生“瞬时性”故障时, 由于非线性电弧的存在, 将使母线电压出现高次谐波。

4 EMTP 真

系统模型如图 4 所示, 线路长度为 150km, 线路采用集中参数模型, 不考虑线路的分布电容, 在线路上设置离 S 点距离 (即本文的短路距离) 为 30km、60km、75km、90km、120km 的五个点为单相短路点, 电弧用一个分段线性的电阻来模拟, 单相短路后, 考察母线 S 及电弧电压的频谱特性。其它参数如下。

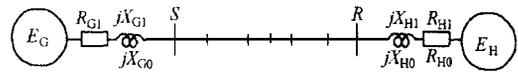


图 4 系统接线图

首端电源: $E_G = 335 \quad 0 \text{ kV}$, $R_{G1} + j X_{G1} = 6.139 + j 529.8$, $j X_{G0} = 130.6$

末端电源: $E_H = 268.5 - 25 \text{ kV}$, $R_{H1} + j X_{H1} = 17.56 + j 46.11$, $R_{H0} + j X_{H0} = 1.6 + j 65.13$

500kV 线路:

$$R_1 = 0.0279 / \text{km} \quad R_0 = 0.253 / \text{km}$$

$$L_1 = 0.882 \text{mH} / \text{km} \quad L_0 = 2.33 \text{mH} / \text{km}$$

故障点电弧电压、电流波形如图 5 所示, 电弧电压的频谱如图 6 所示。

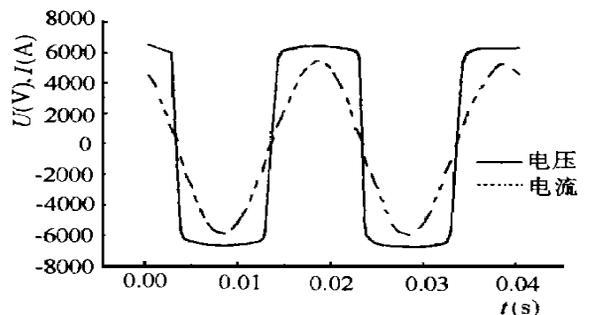


图 5 故障点电弧电压、电流波形

从图上可以看出, 电弧电压类似于方波, 而电弧电流基本上还是正弦, 电弧电压除了有基波外, 还有

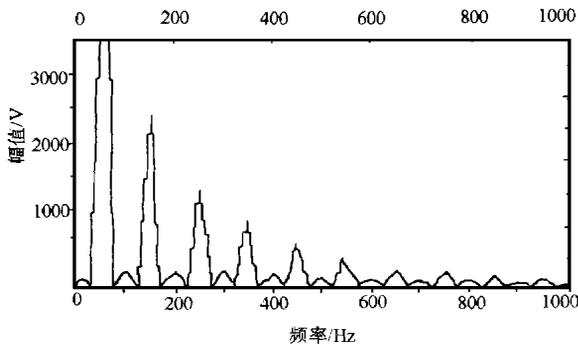


图6 电弧电压频谱图

较大的3、5、7、9次谐波,这些谐波将通过式(7),反映在母线上,以下是不同短路点时,母线及电弧电压的基波及谐波分量的幅值如表1所示。

表1 母线电压及电弧电压的谐波分量

故障点 距离(km)	谐波电压 (V)	谐波次数				
		1	3	5	7	9
S = 30	电弧电压	8178	2447	1329	819	527
	母线电压	70994	2187	1280	787	461
S = 60	电弧电压	8169	2437	1380	866	567
	母线电压	86773	2052	1251	790	470
S = 75	电弧电压	8203	2482	1376	874	548
	母线电压	94716	2037	1214	777	473
S = 90	电弧电压	8236	2436	1412	903	609
	母线电压	102376	1950	1212	785	484
S = 120	电弧电压	8368	2414	1449	940	656
	母线电压	116628	1857	1184	784	505

从以上计算可以看出:母线电压同样含有3、5、7、9等高次谐波,母线电压与电弧电压的基波相差较大,而母线电压与电弧电压的高次谐波相差不大,这也说明了,电弧电流主要是基频电流。

当然,系统本身可能含有高次谐波,在这种情况下,可以先检测出系统谐波的次数,选择由电弧产生的系统不含有的谐波作为电弧故障的特征谐波,如果系统谐波与电弧谐波相同,则可以通过故障前后的谐波幅值变化情况来区分电弧故障,如对于 k 次谐波,设系统固有谐波电压幅值为 U_{kg} ,电弧故障

时,引起的谐波电压幅值为 U_{kh} ,则故障后的谐波幅值 U_{kz} 为:

$$U_{kz} = U_{kg} + U_{kh} = \sqrt{U_{kg}^2 + U_{kh}^2 + 2U_{kg}U_{kh}\cos\theta}$$

为两谐波电压间的夹角。

因此,可用下述方法检测出“瞬时性”故障:1) 检测故障前母线电压谐波;2) 检测故障后母线电压的谐波;3) 比较两者的差异,如有差异,表示有电弧存在(“瞬时性”故障);如无差异,表示没有电弧存在(“永久性”故障)。

5 结论

“瞬时性”故障有较大的电弧电压存在,而“永久性”故障的电弧电压可忽略,电弧电压由于电弧电阻的非线性而产生畸变,使电弧电压有高次谐波存在,同样,在母线上也有高次谐波,因此,在母线上检测高次谐波分量的有无或变化情况,可以区分“瞬时性”与“永久性”故障。

[参考文献]

- [1] 葛耀中. 在单相自动重合闸中判别瞬时故障和永久故障的方法. 西安交通大学学报, 1984, 4.
- [2] Aggarwal R K, Johns A T, Song Y H, Dunn R W, Fitton D S. Neural-network Based Adaptive Single-pole Autoreclosure Technique for EHV Transmission System, IEE Proc. 1994, 141(2).
- [3] Johns A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved Techniques for Modelling Fault Arcs on Faulted EHV Transmission Systems. IEE Proc-Gener Transm Distrib. 1994, 141(2).
- [4] 陈慈萱, 马志瀛. 高压电器. 水利电力出版社, 1987, 6.
- [5] 施围. 电力系统过电压计算. 西安交通大学出版社, 1988, 12.

收稿日期: 1999-06-07

作者简介: 范越(1970-), 男, 在读博士, 主要从事电力系统数字仿真研究; 施围(1942-), 男, 博导, 教授, 主要从事电力系统数字仿真研究。

A NEW METHOD TO DETECT ARC FAULT IN SINGLE PHASE AUTOMATIC RECLOSING

FAN Yue, SHI Wei

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Based on the nonlinearity of the arc, the arc voltage contains high order harmonics, so does the bus voltage, in this paper, a piecewise linear resistance by EMIP is used to simulate arc resistance, the bus voltage of a system occurring single-pole-to-earth through arc fault is calculated, the amplitude-frequency characteristic was studied, the result shows that one can affirm transient fault by detecting the high order harmonics of voltage.

Keywords single-pole autoreclosure; arc; harmonic