

过渡电阻对故障暂态分量的影响分析

王兴国¹, 黄少锋^{1,2}

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 线路故障后产生大量的暂态分量, 会影响常规保护的動作性能。利用分布参数等值超高压长距离输电线路, 重点分析了过渡电阻对暂态高频分量的影响, 分别讨论了相间短路和接地故障时, 暂态高频分量与过渡电阻之间的关系。理论分析表明: 故障暂态高频分量在频域上表现为一系列固有频率的形式, 固有频率受过渡电阻的影响, 固有频率的衰减系数与过渡电阻成反比, 接地故障时, 暂态高频分量中频率最低者与过渡电阻无关, 只与电源侧反射系数和线路长度有关。利用 PSCAD 进行了仿真验证, 仿真结果与理论分析相符。

关键词: 继电保护; 过渡电阻; 暂态分量; 固有频率

Impact of fault resistance for fault transient component

WANG Xing-guo¹, HUANG Shao-feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: The transient component generated by faults of transmission line affects the performance of protection. Distributed parameter model is used to express EHV transmission lines and impact of fault resistance for transient component is analyzed. The relation between transient component and fault resistance is discussed. Theory analysis shows that the fault component is a series of natural frequencies in frequency domain, when grounding fault occurred, the lowest one of natural frequencies does not impact by fault resistance and the attenuation coefficient increase with fault resistance. Simulation is carried out on PSCAD system with 1000kV power system.

Key words: relay protection; fault resistance; transient component; nature frequency

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)02-0018-04

0 引言

随着电力负荷的增长, 电力系统规模越来越大, 超高压长距离输电线路也在相应的增加, 和中短线不同, 长距离输电线路分布电容较大, 衰减时间常数较大, 使得故障暂态过程持续时间较长^[1-2]。在超高压输电电路上, 为了能够快速切除故障, 保证电力系统的安全稳定运行, 继电保护的動作时间一般要求在20~40 ms以内, 由於動作时间很短, 常规保护将不可避免的要承受暂态电流的影响^[3]。线路发生故障之后产生的暂态分量可以分为两部分, 一部分是衰减的非周期分量, 另一部分是衰减的暂态高频分量, 对于前者, 目前采用差分算法来减小其对工频量保护的影响, 对于后者, 一般采用低通滤波器将其滤除。

根据各种故障的统计分析, 在短路故障中, 单

相接地故障的次数几乎占有所有故障类型的90%, 并且从录波分析中发现, 在相间故障中, 相当一部分是由单相接地发展而来, 一般单相接地故障都是经过渡电阻接地^[4]。

本文目的是通过分析过渡电阻对暂态高频分量的影响, 为设计低通滤波器提供理论依据。首先利用分布参数网络等值超高压长距离输电线路, 分析了暂态高频分量在频域的特点、讨论了过渡电阻对暂态高频分量的影响。理论分析表明: 故障高频暂态分量在频域上表现为一系列固有频率的形式, 接地故障时, 线路两侧包含三种暂态高频分量, 它们分别是行波在故障线路本侧、对侧和健全相上产生的暂态高频分量, 固有频率中频率最低的分量大小与过渡电阻无关, 固有频率分量的衰减系数与过渡电阻成正比, 固有频率分量的幅值与过渡电阻成反比。最后利用 PSCAD 对一 1 000 kV 系统进行了仿

真验证, 仿真结果与理论分析一致。

1 过渡电阻对暂态分量的影响

1.1 固有频率的产生机理

超高压长距离输电线路可以用分布参数网络表示, 也可以用集中参数组成的等效 Π 或等效 T 型网络表示, 前者可以给出较为精确的解答; 后者所得计算结果与所取 Π 型或 T 型网络的数目有关, 在用较少的等效 Π 型或 T 型网络代表线路时, 所得暂态分量与实际出入较大; 当用较多 Π 型或 T 型网络表示时, 计算工作很复杂^[5-6]。本文利用分布参数网络表示输电线路。

图 1 给出了利用分布参数网络表示的双电源系统线路发生故障时的故障附加网络, Z_M , Z_N 分别为线路两侧电源阻抗, Z_C 为线路的波阻抗, U 为故障前 F 点处电压, d 为故障点 F 到电源 M 的距离, F 为故障点, r 为过渡电阻, l 为线路全长。

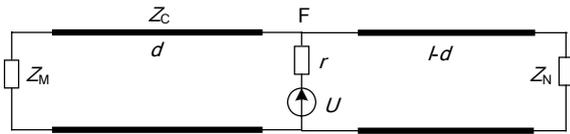


图 1 故障线路 M 侧故障网络示意图

Fig.1 Fault network sketch of M side in fault line

对于电源 M 侧的暂态高频分量, 它是故障产生的初始行波沿线路向电源方向 M 传播, 然后在 Z_M 处和故障点 F 处发生多次反射形成的, 固有频率大小可表示为^[7]:

$$f_k = \frac{\text{imag}(\omega)}{2\pi} = \frac{\theta_M + \theta_F + 2k\pi}{2\tau \times 2\pi} \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots (1)$$

衰减系数为

$$\alpha = \frac{1}{\tau} \ln(\sqrt{A_M A_F}) \quad (2)$$

其中: $A_M = |(Z_M - Z_C)/(Z_M + Z_C)|$;

$$A_F = |(r//Z_C - Z_C)/(r//Z_C + Z_C)|;$$

$$\theta_M = \text{angle}((Z_M - Z_C)/(Z_M + Z_C));$$

$$\theta_F = \text{angle}((r//Z_C - Z_C)/(r//Z_C + Z_C));$$

$\tau = d/c$, c 为行波传播速度。

从式(1)可以看出, 固有频率是行波在有限长度

输电线路传播, 并在电源侧和故障点多次反射形成的, 所以固有频率的大小与线路的长度、电源侧和故障点处的反射系数有关。

所有固有频率中, 当 $k=0$ 时对应的固有频率 f_0 与工频最接近, 对工频量保护影响最大。下面主要分析 f_0 的特征。

令 $k=0$, 由式(1)可得

$$f_0 = \frac{\theta_M + \theta_F}{2\tau \times 2\pi} \quad (3)$$

系统运行方式和过渡电阻共同影响固有频率的大小。对于 θ_M , 它是电源侧反射系数角, 当系统阻抗趋于 0 时,

$$\theta_M = \text{angle}(\lim_{Z_M \rightarrow 0} \frac{Z_M - Z_C}{Z_M + Z_C}) = \pi$$

当系统阻抗为无穷大时,

$$\theta_M = \text{angle}(\lim_{Z_M \rightarrow \infty} \frac{Z_M - Z_C}{Z_M + Z_C}) = 0$$

所以随着系统运行方式的不同, θ_M 变化范围介于 $(0, \pi)$ 之间。

过渡电阻 r 会影响故障点处反射角 θ_F 的大小, r 和 θ_F 之间满足如下关系:

$$\theta_F = \text{angle}((r//Z_C - Z_C)/(r//Z_C + Z_C)) = \text{angle}(-Z_C/(2r + Z_C)) \quad (4)$$

1.2 相间短路时过渡电阻对固有频率大小的影响

线路波阻抗受 ω 的影响, 当固有频率较大时, Z_C 趋于常数。

对于相间短路, 故障暂态分量的传播路径是相一相, 线路正序波阻抗可以表示为:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_{C1}(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} = \sqrt{L_1/C_1} \quad (5)$$

其中: R_1 , L_1 , G_1 , C_1 分别为输电线路单位长度的正序电阻、正序电感、正序电导和正序电容。

相间短路时, 过渡电阻比较小, 介于 $(0, r)$ 之间, 由式(4)可得, θ_F 介于 $(\pi, \text{angle}(-Z_C/(2r + Z_C)))$ 之间。

当 M 侧系统阻抗趋于 0 时, f_0 介于 $(1/2\tau, (\pi + \text{angle}(-Z_C/(2r + Z_C))))$; 当 M 侧系统阻抗趋于无穷大时, f_0 介于 $(1/4\tau, \text{angle}(-Z_C/(2r + Z_C)))$ 之间。

N 侧暂态分量特征与 M 侧类似。

由于故障电阻的存在, 故障点一侧的暂态分量会通过故障点折射到故障点另一侧。对于两相短路, 由于两故障相上的暂态分量大小相等, 方向相反, 所以感应到非故障相上的高频暂态分量几乎为 0。

1.3 接地故障时过渡电阻对固有频率大小的影响

线路发生接地故障时，故障暂态分量的传播路径由相—相变为相—地，对应线路零序波阻抗表示为：

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_{C0}(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = \sqrt{L_0 / C_0} \quad (6)$$

其中： R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 分别为输电线路单位长度的零序电阻、零序电感、零序电导和零序电容。

一般情况下，线路的零序波阻抗大于正序波阻抗，所以接地时行波传播速度小于相间故障时行波的传播速度^[8]。反映在暂态高频分量上，接地故障的固有频率小于对应相间短路时的固有频率。

接地故障时，过渡电阻较大，介于 $(0, \infty)$ 之间，由式 (4) 可得， θ_F 介于 π 和 0 之间。

当 M 侧系统阻抗趋于 0 时， f_0 介于 $(1/4\tau, 1/2\tau)$ ；当 M 侧系统阻抗为无穷大时， f_0 介于 $(1/4\tau, 0)$ 之间。

N 侧暂态分量特征与 M 侧类似。

对于三相输电线路，接地故障时故障点一侧的暂态分量通过故障电阻折射到故障点另一侧，同时，由于线路之间互感的存在，故障行波在健全相上传播时也会产生暂态高频分量，其固有角频率可以表示为：

$$\omega' = \frac{1}{\tau'} \ln(\sqrt{A_M A_N}) + i \left(\frac{\theta_M + \theta_N + 2k\pi}{2\tau'} \right) \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

式中： $A_N = |\Gamma_N| = |(Z_N - Z_C) / (Z_N + Z_C)|$ ； $\theta_N = \text{angle}(\Gamma_N) = \text{angle}((Z_N - Z_C) / (Z_N + Z_C))$ ； $\tau' = l / c$ ， l 为线路全长。

$$f'_k = \frac{\text{imag}(\omega')}{2\pi} = \frac{\theta_M + \theta_N + 2k\pi}{2\tau' \times 2\pi} \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$

当 $k=0$ 时，

$$f'_0 = \frac{\theta_M + \theta_N}{2\tau' \times 2\pi} \quad (9)$$

当 M 侧系统阻抗趋于 0 时， f'_0 介于 $(1/4\tau', 1/2\tau')$ ；当 M 侧系统阻抗为无穷大时， f'_0 介于 $(1/4\tau', 0)$ 之间。

f'_0 不受过渡电阻的影响，只与两侧电源的反射系数有关。

由于线路之间存在耦合，发生接地故障时，故障线路一侧的暂态分量经过互感传到健全线路，同时行波在健全线路上传播产生的暂态分量也会通过互感传到故障线路两侧。所以故障线路两侧同时包含三种暂态高频分量，分别是行波在故障线路两侧

产生的固有频率分量和行波在健全线路产生的固有频率分量，所有固有频率中， f'_0 最接近工频，对工频量保护影响最大。

1.4 过渡电阻对固有频率分量幅值的影响

以 M 侧为例，由式 (2) 可得

$$\alpha = \frac{1}{\tau} \ln(\sqrt{A_M A_F}) = \frac{c}{d} \ln\left(\left| \frac{(Z_M - Z_C)}{(Z_M + Z_C)} \right| \left| \frac{Z_C}{(2r + Z_C)} \right| \right) \quad (10)$$

由式(10)可得，衰减系数 α 与 Z_C 、 r 、 Z_M 有关。当 Z_C 、 Z_M 一定时，衰减系数与过渡电阻 r 成正比，过渡电阻越大，暂态高频分量衰减越严重。

同时随着过渡电阻的增大，暂态高频分量对应的幅值也相应的减小，所以线路发生经高阻接地时，暂态高频分量幅值很小。

由式(10)还可得，衰减系数与故障距离成反比。故障距离较短时，固有频率很高，衰减系数很大，衰减很严重，随着故障距离的增大，固有频率会降低，衰减系数逐渐减小，零序固有频率分量衰减大于正序固有频率分量。

以上主要分析了故障相 M 侧暂态分量的特点，故障线路 N 侧暂态分量的特点与 M 侧类似，这里不再赘述。

2 PSCAD 仿真验证

为了验证以上分析的正确性，在 PSCAD 上搭建了 1 000 kV 系统模型(如图 2 所示)，系统参数采用我国第一条交流特高压线路(晋东南-南阳-荆门)的参数， $R_1=0.00758 \Omega/\text{km}$ ， $X_1=0.26365 \Omega/\text{km}$ ， $C_1=0.01397 \mu\text{F}/\text{km}$ ， $R_0=0.15421 \Omega/\text{km}$ ， $X_0=0.8306 \Omega/\text{km}$ ， $C_0=0.009296 \mu\text{F}/\text{km}$ ， $R_{M1}=0.83 \Omega$ ， $X_{M1}=9.096 \Omega$ ， $R_{M0}=3.86 \Omega$ ， $X_{M0}=18.19 \Omega$ ， $R_{N1}=0.80 \Omega$ ， $X_{N1}=9.79 \Omega$ ， $R_{N0}=0.86 \Omega$ ， $X_{N0}=15.44 \Omega$ ，线路全长 $L=300 \text{ km}$ ，采样频率 100 kHz，F 为故障点，距离 M 母线 100 km。

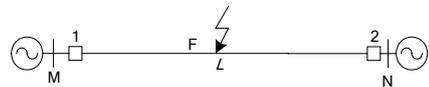


图 2 仿真系统图

Fig.2 Power system of simulation

利用 FFT 计算一个周波数据窗的电流频谱，为了消除非周期分量的影响，在进行 FFT 前，先进行了差分运算，虽然差分运算会放大高频分量，但是不会改变固有频率的相对大小。

图 3 给出了 F 点发生单相接地时故障点两侧及非故障线路的电流频谱。

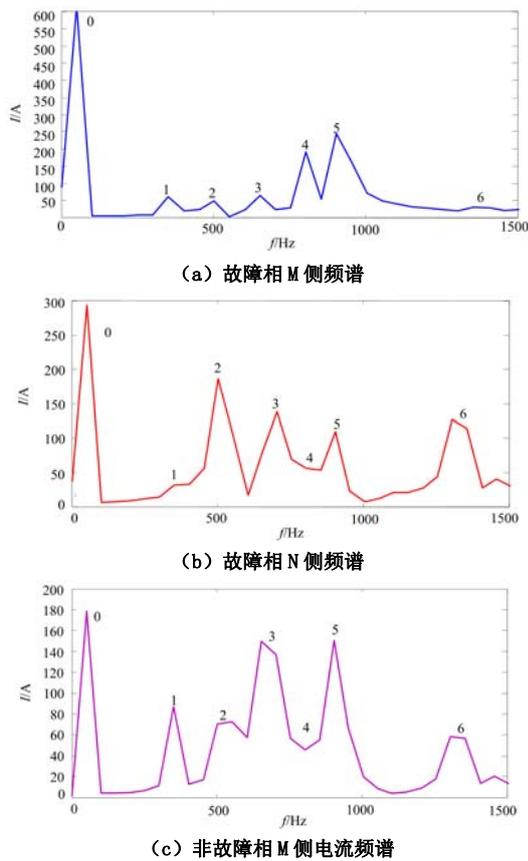


图 3 F 点故障电流频谱图

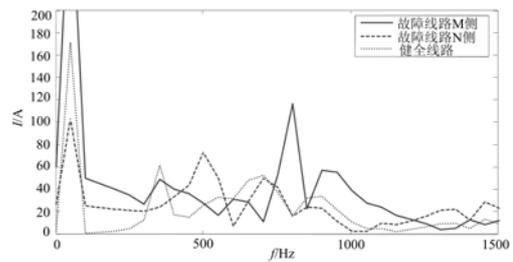
Fig.3 Spectra of current when faults in F2

图 3 中 0~6 为暂态电流中的固有频率成分, 其中 0 对应 50 Hz 工频分量, 通过比较各频率成分的幅值, 可以得出, 1、3 点对应的是行波在健全相产生固有频率, 2、6 点对应的是行波在故障线路 N 侧电产生的固有频率, 4、5 点对应的是行波在故障线路 M 侧产生的固有频率。从中可以看出, 2、6 对应的固有频率幅值在故障线路 N 侧最大, 其次是健全线路, 幅值最小的是故障线路 M 侧, 这是因为 2、6 对应的固有频率是行波在故障点与电源 N 之间传播产生的, 通过互感传到健全线路, 再由健全线路传到故障线路的 M 侧, 通过互感传播时, 能量会相应的减小。由于故障点 F 距离母线 M 较近, 所以 M 侧的固有频率大于 N 侧的固有频率, 而所有暂态固有频率中固有频率最低的分量是行波在健全线路上产生的, 因为它传播的距离最长(线路全长)。

图 4 给出了 F 点经 100Ω 过渡电阻单相接地时的电流频谱。从图中可以发现, 行波在健全相上产生的谐波频率与过渡电阻无关。过渡电阻不影响各固有频率成分之间相对大小关系。

3 结论

超高压长距离输电线路发生故障产生的暂态高

图 4 F 点经 100Ω 过渡电阻接地时故障电流频谱图Fig.4 Spectra of current when fault with 100Ω resistance in F

频分量是离散的, 在频域上表现为一系列固有频率的形式; 故障线路的固有频率与故障点和电源侧反射系数有关, 与故障距离成反比关系。固有频率分量的衰减系数受线路波阻抗、过渡电阻和电源阻抗影响, 固有频率的衰减系数与过渡电阻成正比, 固有频率分量的幅值与过渡电阻成反比; 线路发生接地故障时, 线路两侧包含三种暂态高频分量, 它们分别是行波在故障线路本侧、对侧和健全相上产生的, 固有频率中频率最低分量与过渡电阻无关, 只与两侧电源的反射系数有关。为消除暂态高频分量对工频量保护的影响, 设计低通滤波器时应考虑固有频率的最低频率成分。

参考文献

- [1] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 高中德. 超高压电网继电保护专题分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [3] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [4] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [5] 斯拉麦卡 E, 瓦特西 W. 高低压电网中的暂态过程计算原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [6] 唐勇, 陈珩, 戴方涛. 行波保护中输电模型的选择[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(4): 269-273. TANG Yong, CHEN Heng, DAI Fang-tao. Selection of Transmission Line Models for Traveling-wave Protection Studies[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(4): 269-273.
- [7] Giovanni Miano. Transmission Lines and Lumped Circuits [M]. San Diego: USA Academic Press, 2001.
- [8] Swift G W. The Spectra of Fault Induced Transient[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(3).

收稿日期: 2009-02-23; 修回日期: 2009-04-14

作者简介:

王兴国 (1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统暂态保护; E-mail: xigua1852@163.com

黄少锋 (1958-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机保护。