输电线的圆图法故障诊断

张晓友 曹洪奇 王立欣 许承斌 哈尔滨工业大学(150001)

【摘要】 本文根据分布参数电路理论建立了输电线的故障诊断方程,用改变
方法区分真故障和伪故障,制定了相应的算法。经仿真证明,该方法是有效的。

【关键词】 输电线 圆图 故障诊断

引言

输电线的故障诊断从采用的数学模型上可分为两类:一类是采用集中参数电
类是采用分布参数电路模型。目前采用集中参数电路模型的诊断方法已提出很多
分布参数电路模型的诊断方法较少,但是当线路较长时,分布参数的影响又不容
文采用分布参数电路模型,建立了输电线的故障诊断方程。这种输电线具有三种

(1) 输电线任意处短路,短路点线间具有任意量值的接触电阻。

(2) 输电线任意处断线,断线点线间具有任意量值的接触电阻。

(3) 输电线终端负载故障,负载参数为任意值。

因此,本文解决的问题是鉴别故障类型和确定表征故障的量值。

1 诊断原理和诊断方程

设输电线的长度为 L,单位线长的电阻、漏电导、电感和电容分别为 R_0、G_0、L_0
载阻抗为 Z_2。无论诊断何种故障,只需在输电线起端经电阻 R_1 施以正弦电压 $\dot{U}_S$(
当选取电源频率,使其波长与线长可比,且大于二倍线长,输电线可视为分布参
时,只需测量电源电压 $\dot{U}_S$、起端电压 U_1 以及它们的相位差(以复数量表示为 $\dot{U}_S$ 和

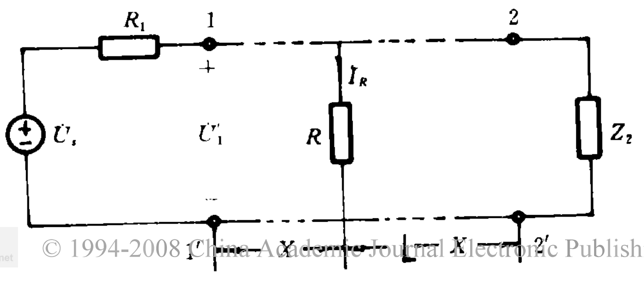

图1

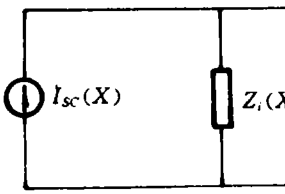

图2

故障时所测得的是起端电压 $\dot{U}_1'$，$\dot{U}_1'$ 和 $\dot{I}_R$ 有如下关系：

$$\dot{U}_1' = a + b\dot{I}_R$$

式中a和b为常数。若无故障，即 $R \to \infty$，$\dot{I}_R = 0$，则 $a = \dot{U}_1$，$\dot{U}_1$ 是无故障时起端
算求得。若 x 处完全短路，即 $R = 0$，$\dot{I}_R = \dot{I}_{SC}(X)$，此时的起端电压以 $\dot{U}_{1SC}(X)$ 表

$$b = [\dot{U}_{1SC}(X) - \dot{U}_1]/\dot{I}_{SC}(X)$$

将a、b和式1代入式2得：

$$\dot{U}_1' = \dot{U}_1 + \frac{\dot{U}_{1SC}(X) - \dot{U}_1}{1 + R/Z_i(X)}$$

故障起端电压偏差的相对值为

$$\frac{\Delta\dot{U}_1}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{U}_1' - \dot{U}_1}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{U}_{1SC}(X)/\dot{U}_1 - 1}{1 + R/Z_i(X)} \quad (3)$$

输电线 x 处短路时，式3中 $\dot{U}_{1SC}(X)$ 和 $Z_i(X)$ 均为常量，根据正弦电路中圆图的概念可知，当电阻 R 取不同的量值时，在复平面上相量 $\Delta\dot{U}_1/\dot{U}_1$ 的终端轨迹为一段圆弧。例如对某一输电线，取电源电压波长 λ 为线长 L 的4倍，

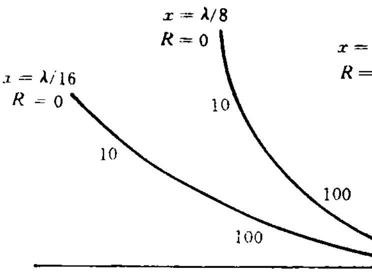

图 3

设 $x = \lambda/16$、$\lambda/8$ 和 $3\lambda/16$ 处分别发生短路，并设接触电阻 $R = 0\Omega$、10Ω、100Ω，经
图如图3所示。可见，接触电阻 R 和故障位置 x 对起端电压 $\dot{U}_1'$ 的影响是不同的
相量 $\Delta\dot{U}_1/\dot{U}_1$ 的终端沿某一段圆弧移动，若 x 改变，则不论 R 为何值，$\Delta\dot{U}_1/\dot{U}_1$ 的
同的圆弧上。因此，可由 $\Delta\dot{U}_1/\dot{U}_1$ 所满足的圆的方程确定故障点位置 x，由式3得

$$R = \left[\frac{\dot{U}_{1SC}(X)/\dot{U}_1 - 1}{\Delta\dot{U}_1/\dot{U}_1} - 1\right]Z_i(X)$$

式4两端取共轭，因为 $R = \overline{R}$，将得到[3]：

$$\frac{\Delta\dot{U}_1}{\dot{U}_1}\left(\overline{\frac{\Delta\dot{U}_1}{\dot{U}_1}}\right) + A(X)\frac{\Delta\dot{U}_1}{\dot{U}_1} + \overline{A}(X)\left(\overline{\frac{\Delta\dot{U}_1'}{\dot{U}_1}}\right) = 0$$

$$A(X) = \frac{\overline{Z}_i(X)}{Z_i(X) - \overline{Z}_i(X)}\left[\frac{\dot{U}_{1SC}(X)}{\dot{U}_1} - 1\right]$$

式中 $Z_i(X)$、$\dot{U}_{1SC}(X)$ 和 $\dot{U}_1$ 可根据分布参数电路理论求得。

当输电线短路时，由计算和测量分别求得 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_1'$，再计算 $\Delta\dot{U}_1/\dot{U}_1$，将 $\Delta\dot{U}$
5，可以求解出 x，实现故障定位，所以方程5就是输电线短路点定位的诊断方程
可求得 R，实现接触电阻定值。

2.2　输电线断线

R_1　　1

$$B(X)=[(\frac{\overline{\dot U_{1SC}(X)}}{\dot U_1})-1]\frac{\bar Z_i(X)}{Z_i(X)-\bar Z_i(X)}-[(\frac{\overline{\dot U_{10C}(X)}}{\dot U_1}-1]\frac{\bar Z_i(X)}{Z_i(X)-\bar Z}$$

$$C(X)=[(\frac{\dot U_{1SC}(X)}{\dot U_1})-\frac{\overline{\dot U_{10C}(X)}}{\dot U_1}\frac{\dot U_{1SC}(X)}{\dot U_1}-(\frac{\overline{\dot U_{10C}(X)}}{\dot U_1})+1]\frac{\bar Z_i(X)}{Z_i(X)-}$$

式中 $\dot U_{10C}(X)$ 为 x 处完全断线($R\to\infty$)时的起端电压。

2.3 终端负载故障

设负载故障,即阻抗 Z_2 变为 Z_2'。可以证明[3],故障阻抗 Z_2' 与输电线起端电

关系:

$$Z_2'=\frac{\dot U_{1SC}(L)-\dot U_1}{\dot U_1'-\dot U_{10C}(L)}Z_i(L)$$

2.4 鉴别真故障和伪故障

以上针对三类故障建立了三种诊断方程。当发生某一种故障时,例如输电线

得的起端电压 $\dot U_1'$,由短路故障诊断方程[式 4 ~ 6],便能确定短路故障情况。但

不知道故障类型。若将此短路故障起端电压 $\dot U_1'$ 代入断线故障诊断方程或负载故

也能求得相应的断线故障或负载故障的情况。显然,这后两种故障都是伪故障,

才是真故障。下面的定理可用于区分真故障和伪故障。

定理:若选取两种频率的正弦电压激励,用上述方程诊断两次,则真故障的

相同,而伪故障的两次诊断结果不同。

2 仿真结果

取输电线线长为 10km,$U_S=10V$,$R_1=100\Omega$,$Z_2=100+j\omega\times10^{-3}\Omega$,当

5000Hz($\lambda=60km>2L$)时,输电线参数为 $Z_C=490.6-j40.6\Omega$,$r=0.003+$

断频率 $f=8000Hz$($\lambda=37.5km>2L$)时,输电线参数为 $Z_C=489.8-j53.2$,

$j0.024$。

为了便于比较,表 1 和表 2 给出了各种故障情况下的全部诊断结果(包括

障)。

表 1 $f=5000Hz$ 时的诊断结果

诊断方程 / 诊断结果 / 故障类型	终端负载故障		输电线短路故障		输电
	$R_2(\Omega)$	$L_2(H)$	$x(m)$	$R(\Omega)$	$x(m)$
终端负载故障 $R_2=10\Omega,L_2=0.1H$	9999.1	0.099	−49.6	88.6	9982.1
输电线短路					

IBM—PC 机计算,所需解方程时间和全部诊断时间都很短。

(3) 输电线参数的误差将影响诊断结果的精度。实用上可通过实验方法实测

表 2 $f = 8000\text{Hz}$ 时的诊断结果

诊断结果 / 诊断方程 / 故障类型	终端负载故障		输电线短路故障		输电线
	$R_2(\Omega)$	$L_2(\text{H})$	$x(\text{m})$	$R(\Omega)$	$x(\text{m})$
终端负载故障 $R_2 = 10^4\Omega, L_2 = 0.1\text{H}$	10002.1	0.101	3740.2	55.5	3388.6
输电线短路 $x = 3000\text{m}, R = 100\Omega$	251.7	0.007	3000.8	101.2	2298.4
输电线断线 $x = 3000\text{m}, R = 1000\Omega$	−36.4	−0.001	1513.2	−94.2	2998.9

参考文献

1 胡帆、刘沛、程时杰. 高压输电线路故障测距算法仿真研究. 中国电机工程学报. 1995,1

2 龚建平. 高压线路故障测距实用方法. 继电器,1993.4,PP 15 ~ 20

3 张晓友. 均匀线单一故障诊断. 哈尔滨工业大学硕士论文,1991

附录:定理的证明

"真故障的两次诊断结果相同"是显然的,因为上述三种故障方程对任何频

面证明"伪故障的两次诊断结果不同"。

设输电线短路或断线,负载无故障。将故障输电线用二端口网络等效代替,其传输参数 $A'(\omega)$、$B'(\omega)$、$C'(\omega)$ 和 $D'(\omega)$ 都是频率的函数,如图 5 所示。图 5 中 11′ 端口入端阻抗为

$$Z_i = \frac{A'(\omega)Z_2 + B'(\omega)}{C'(\omega)Z_2 + D'(\omega)} \tag{12}$$

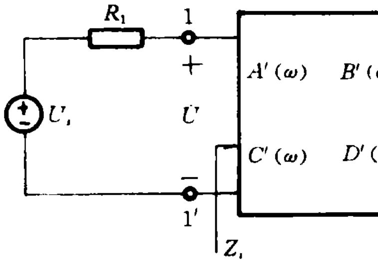

图 5

故障起端电压的实测值为

$$\dot{U}_1' = \frac{Z_i}{R_1 + Z_i}\dot{U}_s \tag{13}$$

如果将该电压代入式 11,按负载故障进行诊断,则相当于输电线正常,其等效二端

数为 $A(\omega)$、$B(\omega)$、$C(\omega)$ 和 $D(\omega)$,而终端阻抗变为 Z_2',此时 11′ 端口的入端阻抗

$$Z'_i = \frac{A(\omega)Z'_2 + B(\omega)}{C(\omega)Z'_2 + D(\omega)}$$