

树型电力网单一故障诊断 的零泛器替代法

那 文 波

(齐齐哈尔轻工学院机电系, 齐齐哈尔 161006)

许承斌 朱 翔

(哈尔滨工业大学电气工程系, 哈尔滨 150006)

摘要 本文研究树型电力网发生单一短路或断路故障, 且故障点线间具有任意量值的接触电阻时的故障诊断问题。提出了故障点定位和接触电阻定值的一种方法——零泛器替代法。论述了这种诊断方法的原理, 建立了诊断方程, 提出了算法。最后给出了具有 5 个分支的树型电力网短路和断路故障诊断的算例。

关键词 树型电力网; 故障诊断; 故障分支识别; 故障定位

一、引 言

树型电力网的单线示意图如图 1 所示, 其中连接两个相邻节点(包括终端节点)的传输线称为一个分支。这种树型网中的某一个分支可能发生短路、断路或断路兼短路故障。短路和断路兼短路时故障点线间可具有任意量值的接触电阻。因此这种树型网故障诊断的任务是: 识别故障分支、区分故障类型和确定故障位置。由于树型网连接方式复杂, 使得自动故障诊断较为困难, 目前提出的诊断方法^[1,2]仍需进一步完善。

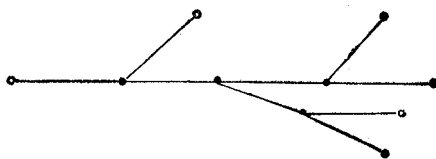


图 1

本文提出的诊断方法要求在树型网的起端加一正弦电压, 适当选取电源频率, 使得信号的半波长略大于线长。在这种频率下, 树型电力网成为分布参数电路, 每一分支则为一条均匀线。从这种意义上说, 本文所讨论的问题为树型分布参数电路单一故障的诊断方法。电路方程中含有反映距离的变量 x , 以便建立故障点定位的诊断方程。已知条件是

1992.05.08 收到 1992.10.22 定稿。

那文波 男, 1963 年生, 讲师, 从事电路、电子技术教学工作。主要研究方向为电路故障诊断理论和应用、神经网络理论和应用、电路的计算机仿真等。

许承斌 男, 1935 年生, 教授, 从事电工基础、非线性电路教学工作。主要研究领域有电路故障诊断理论及应用、非线性电路和系统、计算机辅助电路分析和设计等。

朱 翔 男, 1960 年生, 讲师, 从事电工基础教学工作。主要研究领域为电路故障诊断理论和应用, 神经网络理论和应用等。

无故障树型网的结构和参数,即各段传输线的长度 l 、波阻抗 Z_c 和传播常数 γ 。 Z_c 和 γ 要在诊断所选用的频率下测定。

电力网均为三相制,本文先通过双线分布参数电路模型研究故障诊断的原理。对三相传输线可分别在一线对地或两线间加正弦电压进行故障诊断。

二、故障后测试和故障分支识别

为了便于讨论故障诊断原理,又不失一般性,设树型网由 3 个分支组成,如图 2 所示。

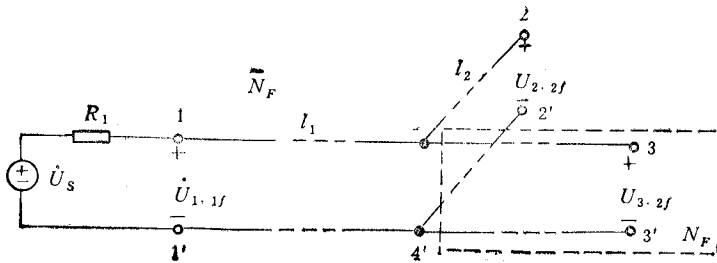


图 2 (图中 3' 线到 4' 点中间应标上 l_3)

诊断所用的正弦电压源 \dot{U}_s 经电阻 R_1 加在端口 11' 上。各终端端口 11'、2 2' 和 33' 为可测端口,各分支相互连接的端口 44' 为不可测端口。诊断时需要测量电源电压 U_s 和端口 11' 电压 $U_{1,1f}$ 及其相位差,可用电压相量 \dot{U}_s 和 $\dot{U}_{1,1f}$ 表示。这里的多下标变量,第 1 个下标表示分支号,第 2 个下标表示该分支起端(为 1)和末端(为 2), f 表示故障测试,下同。由于端口 22', 33' 与端口 11' 相距甚远,难于测量各电压间的相位差,所以只要求测量其电压有效值 $U_{2,2f}$ 和 $U_{3,2f}$ 。

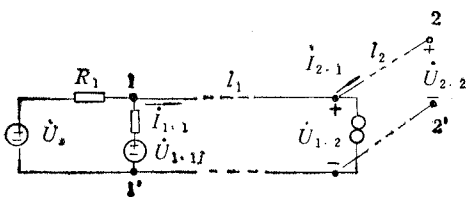


图 3

本文引用文献 [3] 提出的方法识别故障分支,这里只作简要介绍。

设发生故障的树型网为 N , 以某一不可测端口为界,例如图 2 中为端口 44', 将 N 分为有故障的子网 N_f 和无故障的子网 \bar{N}_f , 且 \bar{N}_f 应包含电压源 \dot{U}_s 。采用在数值上等于 $\dot{U}_{1,1f}$ 的一电压源,通过一零器将端口 11'

的电压锁定,用一泛器代替子网 N_f , 得一含有零泛器的网络如图 3 所示。其网络方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_s - \dot{U}_{1,1f} &= \dot{I}_{1,1} r_1 \\ \dot{U}_{1,2} &= \dot{U}_{1,1f} \text{ch} \gamma_1 l_1 - \dot{I}_{1,1} Z_{c1} \text{sh} \gamma_1 l_1 \\ \dot{U}_{2,2} &= \dot{U}_{1,2} \text{ch} \gamma_2 l_2 - \dot{I}_{2,1} Z_{c2} \text{sh} \gamma_2 l_2 \\ 0 &= \dot{I}_{2,1} \text{ch} \gamma_2 l_2 - (\dot{U}_{1,2} / Z_{c2}) \text{sh} \gamma_2 l_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由此解得 \bar{N}_f 中可测终端的电压,即 $U_{2,2}$, 由下面的定理可判断出假设的 \bar{N}_f 是否为非故障子网。

定理 在 \bar{N}_F 和 N_F 之间有不可测端口连接时, 判断 \bar{N}_F 无故障的必要条件是: (1) \bar{N}_F 中可测端口数大于 1; (2) 含有零泛器的网络有解; (3) 可测端口电压有效值的测试量与模拟量相等。

将 N 划分成不同的 \bar{N}_F 和 N_F , 并依据该定理进行判断, 经过有限次即可搜索到真的 N_F 且只包含一个分支, 该分支即为故障分支。

三、故障定位和定值原理

1. 短路故障定位和定值原理

仍以图 2 所示的由 3 个分支组成的树型网为讨论的模型。设分支 3 在距分支起点 x 处发生短路故障, 短路点线间接触电阻为 R , 如图 4 所示。已知条件和测量条件与前面的故障分支识别条件相同。

仍采用在数值上等于 $\dot{U}_{1,1f}$ 的一电压源, 通过一零器将端口 $11'$ 的电压锁定。经故障分支识别已确定分支 3 发生故障, 所以用一泛器在分支 3 的任意点 x 代替短路接触电阻 R , 得一含有零泛器的网络如图 5 所示。其网络方程如下:

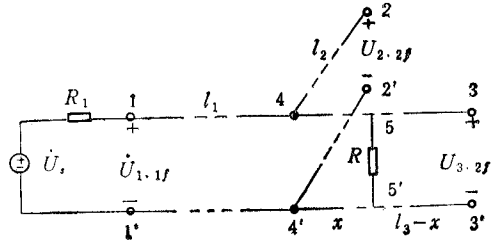


图 4

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{U}_0 - \dot{U}_{1,1f} &= \dot{I}_{1,1} R_1 \\
 \dot{U}_{1,2} &= \dot{U}_{1,1f} \operatorname{ch} \gamma_1 l_1 - \dot{I}_{1,1} Z_{c1} \operatorname{sh} \gamma_1 l_1 \\
 \dot{I}_{1,2} &= \dot{I}_{1,1} \operatorname{ch} \gamma_1 l_1 - (\dot{U}_{1,1f} / Z_{c1}) \operatorname{sh} \gamma_1 l_1 \\
 \dot{I}_{2,1} &= \dot{U}_{1,2} \operatorname{sh} \gamma_2 l_2 / (Z_{c2} \operatorname{ch} \gamma_2 l_2) \\
 \dot{U}_{2,2} &= \dot{U}_{1,2} \operatorname{ch} \gamma_2 l_2 - \dot{I}_{2,1} Z_{c2} \operatorname{sh} \gamma_2 l_2 \\
 \dot{I}_{3,1} &= \dot{I}_{1,2} - \dot{I}_{2,1} \\
 \dot{U}_0 &= \dot{U}_{1,2} \operatorname{ch} \gamma_3 x - \dot{I}_{3,1} Z_{c3} \operatorname{sh} \gamma_3 x \\
 \dot{I}_1 &= \dot{I}_{3,1} \operatorname{ch} \gamma_3 x - (\dot{U}_{1,2} / Z_{c3}) \operatorname{sh} \gamma_3 x \\
 \dot{I}_2 &= \dot{U}_0 \operatorname{sh} \gamma_3 (l_3 - x) / (Z_{c3} \operatorname{ch} \gamma_3 (l_3 - x)) \\
 \dot{U}_{i,2} &= \dot{U}_0 \operatorname{ch} \gamma_3 (l_3 - x) - \dot{I}_2 Z_{c3} \operatorname{sh} \gamma_3 (l_3 - x)
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在上述方程中任意给定 x , 可求得相应终端电压 $U_{i,2}(x)$, $i = 2, 3$ 。一般地, 它们不一定等于故障时测得的终端电压 $U_{i,2f}$, $i = 2, 3$ 。定义

$$y = \sum_{i=2}^3 [U_{i,2}(x) - U_{i,2f}]^2$$

设分支 3 的中点发生短路故障, 在 x 取不同值时, 求得 y 对 x 的变化曲线如图 6 所示。可见它为一单谷函数。理想情况下, y 的极小点(故障点)应为 0。

因此树型网短路故障定位问题可转化为典型的非线性最小二乘问题来解决, 目标函数 J 定义为使树型网各可测终端电压有效值的方差和极小, 约束条件(用符号 s.t. 表示)是诊断方程 (2) 式。

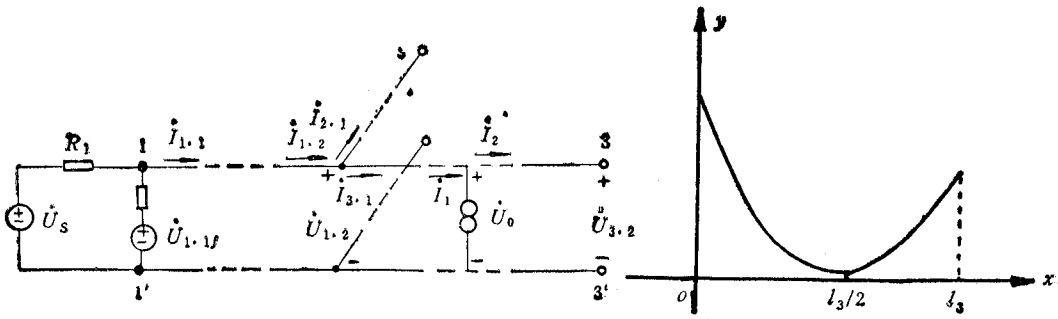


图 5

图 6

$$J = \min \sum_{i=2}^3 [U_{i,2}(x) - U_{i,1}]^2 \quad (3)$$

s.t. (2) 式

由此可求得故障点 x_0 ，随之即可实现故障定值：

$$R = \dot{U}_0(x_0) / [\dot{I}_1(x_0) - \dot{I}_2(x_0)] \quad (4)$$

2. 断路故障定位和定值原理

仍以图 2 所示的由 3 个分支组成的树型网为讨论的模型。设分支 3 在距分支起点 x 处发生断路故障，断路线间接触电阻为 R ，如图 7 所示。已知条件和测量条件同前。仍采用在数值上等于 $\dot{U}_{1,1f}$ 的一电压源，通过一零器将端口 $11'$ 的电压锁定，用一泛器代替断路线接触电阻 R ，得一含有零泛器的网络如图 8 所示。其网络方程如下：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}_{1,1f} &= \dot{I}_{1,1} R_1 \\ \dot{U}_{1,2} &= \dot{U}_{1,1f} \text{ch} \gamma_1 l_1 - Z_{e1} \dot{I}_{1,1} \text{sh} \gamma_1 l_1 \\ \dot{I}_{1,2} &= \dot{I}_{1,1} \text{ch} \gamma_1 l_1 - (\dot{U}_{1,1f} / Z_{e1}) \text{sh} \gamma_1 l_1 \\ 0 &= \dot{I}_{2,1} \text{ch} \gamma_2 l_2 - (\dot{U}_{1,2} / Z_{e2}) \text{sh} \gamma_2 l_2 \\ \dot{I}_{3,1} &= \dot{I}_{1,2} - \dot{I}_{2,1} \\ \dot{U}_0 &= \dot{U}_{1,2} \text{ch} \gamma_3 x - Z_{e3} \dot{I}_{3,1} \text{sh} \gamma_3 x \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{3,1} \text{ch} \gamma_3 x - (\dot{U}_{1,2} / Z_{e3}) \text{sh} \gamma_3 x \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

所以接触电阻 R 为

$$R = \dot{U}_0 / \dot{I}_1 = f(x) \quad (6)$$

(6) 式中 $f(x)$ 为由 (5) 式可推得的关于 x 的非线性表达式，(6) 式即为断路故障的接触电阻定值式。显见 $\text{Im}[R] = 0$ ，即

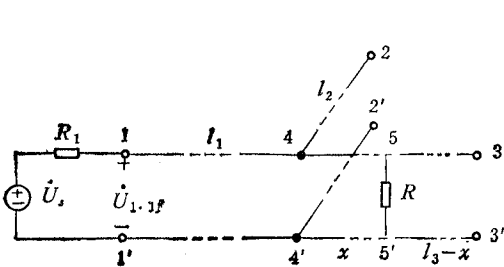


图 7

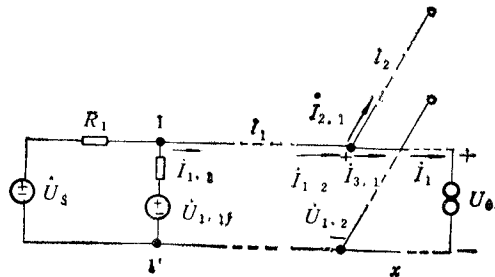


图 8

$$\operatorname{Im}[f(x)] = 0 \quad (7)$$

(7) 式即为断路故障的定位方程, 它是关于 x 的非线性方程。

设分支 3 的中点发生断路故障, 在 x 取不同值时, 求得 $\operatorname{Im}[f(x)]$ 对 x 的变化曲线如图 9 所示, 可见 $\operatorname{Im}[f(x)]$ 是 x 的单调函数, (7) 式有唯一解。

当分支 3 发生断路故障时, 将测得的 \dot{U}_i 和 $\dot{U}_{i,1}$ 代入 (7) 式, 解之即可实现断路故障定位。再将求得的 x 代入 (6) 式, 即可求得 R , 完成接触电阻定值。

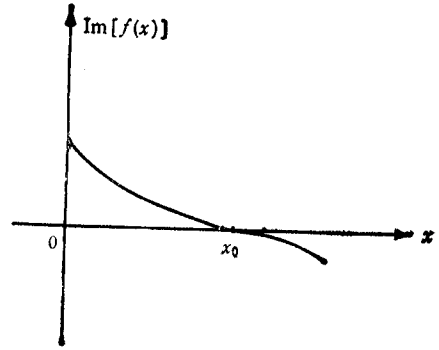


图 9

上面所得的短路、断路诊断方程是以分支 3 发生故障为例推得的, 其它分支的诊断方程可依同样原理推得。

四、故障类型的判定

根据加电压源后测出的各终端电压有效值, 可判定故障的类型。

若各终端电压均不为零, 说明发生的是接触电阻非零的短路故障。

若全部或部分终端电压为零, 说明发生的是断路故障或接触电阻为零的短路故障。

当发生接触电阻为零的短路故障时, 按短路或断路故障诊断, 均能实现正确的故障定位和定值。因此当发现终端电压为零时均按断路故障进行诊断。

五、诊断方法、算法和算例

1. 诊断方法

故障诊断可分为测前、测量和测后 3 个子过程。测前工作在正常的树型网上进行, 首先选取正弦电源的频率, 使信号半波长略大于从电源端到最远端的距离, 即略大于线长。在选定的频率下分别测定各条均匀线的波阻抗 Z_{0i} 和传播常数 γ_i , 并列各条均匀线的方程, 待诊断时使用。

发生故障后, 在起端加电压 \dot{U}_i (参见图 2)。测量 \dot{U}_i 和端口 11' 的电压相量 $\dot{U}_{i,1f}$, 同时测量其它可测端口的电压有效值 $\dot{U}_{i,2f}$ 。

测后工作是依据下面提出的算法进行诊断。

2. 诊断算法

步骤 1 采用二分法, 将 N 分成不同的 \bar{N}_F 和 N_F , 即对 N_F 在不可测端口处大致二等分取下次搜索的 N_F 。应用上面给出的定理识别故障分支。

步骤 2 故障类型判定。若终端电压的测量值 $U_{i,2f}$ 有为零的, 则转步骤 4; 否则执行步骤 3。

步骤 3 短路故障定位和定值。采用高斯-牛顿法解短路故障定位中的非线性最

小二乘问题(3)式,求得 x_0 实现故障定位. 将求得的 x_0 代入(4)式,完成接触电阻定值. 转步骤 5.

步骤 4 采用牛顿-拉夫逊算法解非线性方程(7)式,实现断路故障定位,求得的 x 代入(6)式,完成断路故障的接触电阻定值.

步骤 5 输出诊断结果.

在故障分支识别中,将 N 分成不同的 \bar{N}_F 和 N_F 时,由于采用二分法,应用上面给出的故障分支识别定理在不大于 $\text{int}(n/2)$ 次搜索次数内,即可搜索到真的 N_F 且只包含一个分支,该分支即为故障分支,这里 n 为树型网分支总数, $\text{int}(x)$ 是对 x 四舍五入取整函数.

3. 诊断算例

图 10 所示架空线树型电力网由 5 个分支组成,各分支的序号和线长均在图中标明. 设各分支的参数相同,当信号源频率取为 8000Hz 时,均匀线参数为 $R_0 = 1.27\Omega/\text{km}$,

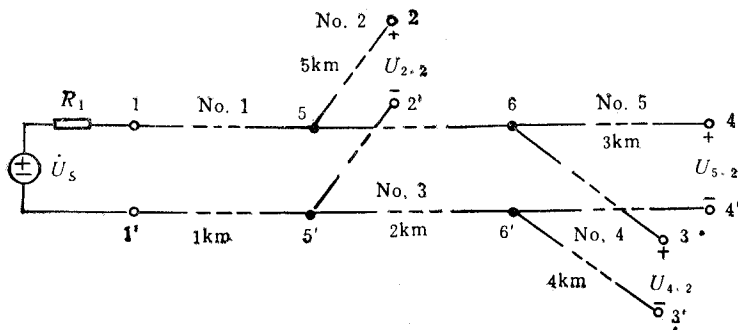


图 10

表 1 故障模拟和诊断结果

故障模拟				诊断结果			
故障分支	故障类型	故障点 $x(\text{m})$	接触电阻 $R(\Omega)$	故障分支	故障类型	故障点 $x(\text{m})$	接触电阻 $R(\Omega)$
3	短 路	500	0	3	短 路	500.01	0
			10^3			500.03	999.96
			10^6			500.45	999981.25
		1500	0			1500.02	0
			10^3			1500.04	999.84
			10^6			1500.32	999975.65
4	断 路	1000	0	4	断 路	1000.02	0
			10^4			1000.26	9999.83
			10^7			1001.42	9999986.24
		2000	0			2000.01	0
			10^4			2000.44	9999.69
			10^7			2003.01	9999965.21

$G_0 \approx 0, L_0 = 2.165 \times 10^{-3} \text{ H/km}, C_0 = 5.14 \times 10^{-9} \text{ F/km}$. 取电压源 $\dot{U}_r = 50 \angle 0^\circ \text{ V}$, 电阻 $R_i = 100 \Omega$. 表 1 给出了不同分支不同位置发生不同故障的故障模拟情况和诊断结果. 对不同分支数的树型电力网的不同分支、不同位置和短路或断路的不同故障情况, 采用本文所提出的诊断方法, 进行了多次模拟故障诊断. 用 IBM PC/XT 机, 对 5 个分支的树型电力网进行诊断, 故障分支识别时间不超过 3s, 故障类型判定和定位和定值时间不超过 8s. 故障分支的增加对诊断时间影响很小.

六、结 论

本文提出的树型电力网单一故障诊断的方法具有下列特点:

(1) 预先在正常的均匀线上测定诊断所需要的参数 Z_0 和 γ , 因此不存在一般模拟电路故障诊断中参数容差影响的问题.

(2) 要求检测电源电压相量和起端电压相量, 而其它各终端电压只需检测其有效值, 在工程上这种要求易于实现.

(3) 进行故障分支识别时, 由于起端电压 $\dot{U}_{1,if}$ 被锁定, 建立的线性方程组便可自前向后依次求解, 无需用数值方法求解联立方程组. 用高斯-牛顿法解短路故障点定位的非线性最小二乘问题, 一般迭代几次便可收敛. 用牛顿-拉夫逊法解断路诊断的非线性方程, 一般迭代 10~15 次便可收敛. 测后计算量较小, 诊断时间很短. 把故障定位问题转化为非线性最小二乘问题来求解, 可降低由测量误差引起的故障定位误差.

(4) 算例中计算机仿真结果表明, 本文所提诊断方法是可行的.

目前除提出了该诊断方法外, 已准备开始实用诊断系统的硬件实现.

参 考 文 献

- [1] Yuan-Yin Hsu et al., *IEEE Trans. on PD, PD-6* (1991)1, 366—372.
- [2] 侯自立, 彭兰芳, *电子科学学刊*, 12(1990)6, 641—645.
- [3] 那文波, 许承斌, *电子科学学刊*, 14(1992)3, 276—280.

A METHOD FOR SINGLE FAULT DIAGNOSIS OF TREE-TYPE POWER NETWORK BASED ON NULLOR SUBSTITUTION

Na Wenbo

Xu Chengbin, Zhu Xiang

(Qiqihar Institute of Light Industry, Qiqihar 161006)

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

Abstract The problem of fault diagnosis of a tree-type power network with a short-circuit or an open-circuit and a contact resistance of arbitrary value between lines is studied. Based on nullor substitution, the method presented here is suitable for fault locating and contact resistance evaluating. Principles of diagnosis are discussed, diagnosis equations are established, and diagnosis algorithms are presented. Finally, examples for diagnosing a five-branches tree-type power network with a short-circuit or an open-circuit are given.

Key words Tree-type power network; Fault diagnosis; Fault branch identification; Fault location