

电抗型 电力线路故障探测仪

72

张珂 编

DIANKANGXING
DIANLI XIANLU GUZHANG TANCEYI

中国铁道出版社

电抗型电力线路故障检测仪

张 珂 编

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 8 4 年 · 北 京

09204
PM72
1

电抗型电力线路故障探测仪

张 珂 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 张余昌

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 1/32 印张: 4.375 插页: 1 字数: 96千

1984年2月 第1版 1984年2月 第1次印刷

印数: 0001—5,000册 定价: 0.50元

内 容 提 要

本书介绍一种应用电抗法进行故障定位的新型电力线路故障探测仪。这种仪器已在铁路10千伏自动闭塞电力线路中和110千伏输电线路中采用。书中较详细地介绍了这种仪器的测量原理、电路工作原理、技术性能、使用和调试方法。

本书可供使用部门和制造部门的技术人员学习，也可给检修、值班人员学习参考。

前 言

高压输电线路故障点的准确定位，是提高输电线路安全经济运行的重要措施。准确的故障定位可以大大减轻查线工人的繁重体力劳动；可以加快线路恢复供电，减少因停电而造成的各种损失；可以及时发现设备隐患，防止事故重燃，提高运行的可靠性。

建立在脉冲反射原理基础上的线路故障探测器，由于它的结构比较复杂，调试困难，附属设备多，易受干扰，通道难以解决，所以，在国内没有普遍采用。此外，在我国有些地区使用故障录波器进行故障定位，这种方法探测精度不高，而且需要经过人工计算方可定位，不能迅速确定故障点的位置。本书介绍一种建立在电抗法原理基础上的新型线路故障探测器。这种仪器结构非常简单，调试容易，使用方便，无需附属设备，不受外界电磁干扰，其探测精度介于脉冲型探测仪和故障录波器之间，能满足工程上的需要。六十年代以来，在国外，对电抗型线路故障探测器进行了很多的研制工作，产品也很多，例如，英国通用电气公司生产的XTF系列故障探测器〔文献1〕，法国斯克鲁贝格公司生产的DALD-DLNS和DLDS系列故障探测器〔文献2〕。国内也积极开展了这方面的研制工作，例如黄石供电局和湖北电力中心试验所合作研制的XFL—1型故障探测器〔文献7〕，都属于电抗型。

1973年，铁道部科学研究院与成都铁路局绵阳供电段协作，首先将电抗法测量原理用于交流电气化铁路，研制成功DTG—1型接触网故障探测仪〔文献3〕。此后，又与沈

阳铁路局、郑州铁路局、电化工程局协作，研制成功用于10千伏系统的ZGT—1型自动闭塞电力线路故障检测仪〔文献4〕，投产后，结构有所改进，改型为ZGT—3型。1980年与重庆电业局达县供电局协作，研制成功用于110千伏系统的DDK—1型输电线路故障检测仪。以上三种产品都经过了鉴定，并投入使用。上述三种仪器都采用了电抗法测量原理，其主要环节基本相同。DTG—1型和DDK—1型两种仪器在使用中都收到了良好的效果。ZGT—3型检测仪在推广应用中，遇到一些困难和问题，为此，我们编写了这本书，作为参考，以推动此项新产品的推广应用。本书以ZGT—3型电力线路故障检测仪为主要对象，系统介绍这一仪器的结构原理和使用方法。对于用于110千伏系统的DDK—1型输电线路检测仪的特殊部分，在相应的章节予以补充说明，以期一书两用。

高压输电线路故障点定位技术发展很快，使用电子计算机进行故障定位就是一例〔文献6〕，我们相信，今后将有更精确的定位方法和仪器投入使用。

在本书编写过程中，参加此项研究工作的专题组成员张延昭、肖金生、达县供电局的谭明高以及铁道部科学研究院的何四本、刘启超等同志对本书初稿进行了校阅，并征求了现场同志的意见，对这些同志提出的宝贵意见，定稿时都作了相应的修改和补充，在此致以衷心的感谢。

对书中缺点和错误，诚恳同志们批评指正。

编 者

目 录

第一章	测量原理和仪器构成方法	1
一、	测量原理	1
二、	相间故障测量	3
三、	单相接地故障测量	8
四、	仪器构成方法	18
第二章	测量回路	25
一、	测量回路	25
二、	起动选相回路	28
第三章	计量回路	37
一、	短路电流变换电路	37
二、	电抗压降变换电路	39
三、	I_0 检出电路	48
四、	I_0 变换和读数回路	55
五、	仪器测量过程和控制电路	62
附 录	8FC3集成运算放大器简介	64
第四章	直流电源和接地开关控制电路	68
一、	直流电源	68
二、	接地开关控制电路	74
第五章	仪器性能和使用方法	77
一、	仪器性能	77
二、	外部接线	78
三、	仪器使用条件	80
四、	仪器开关和按键说明	82

五、值班员操作方法	83
第六章 调 试	84
一、元件测试	84
二、环节调试	86
三、整机调试	99
第七章 仪器故障检查	106
第八章 误差分析	115
一、外部因素	115
二、内部因素	118
三、110 千 伏双电源供电线路中，高阻接地时的误差分析	121
附表 I 各种导线的电阻和电抗（正序）	126
附表 II ZGT-3 型电力线路故障探测仪 元 件参数表	128
参考文献	132
附 图 电力线路故障探测仪电气原理图	

第一章 测量原理和仪器构成方法

一、测量原理

输电线路的参数主要有两个，一个是导线电阻，另一个是线路电抗，它们都与线路的长度成正比。在导线型号相同，排列一致时，线路电阻和电抗是均匀分布的。设线路长度为 l ，线路电阻和电抗分别为 R 和 X ，则存在以下关系

$$\left. \begin{aligned} R &= rl \\ X &= xl \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 r ——每公里线路的电阻 (Ω/km)，

x ——每公里线路的电抗 (Ω/km)。

r 、 x 可由电力设计手册中查出。本书附表 I 列出了一部分导线类型的参数值，供参考。

因此当线路发生短路或接地时，可以通过测量变电所至故障点的线路电抗，确定故障点的距离。这个测量方法，称为电抗法。此外，还有一种方法，叫阻抗法，这种方法对高阻性故障测量误差较大。请看图1—1电力线路故障示意图。

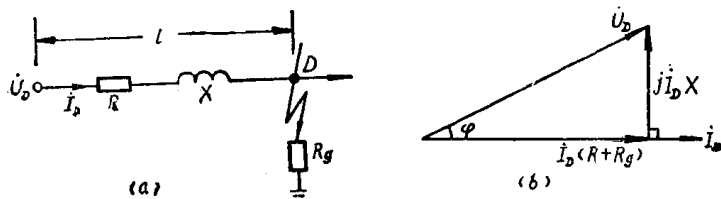


图 1—1 电力线路故障示意图
(a) 等值电路； (b) 向量关系。

图中 D 表示故障点，故障点的距离为 l ， R 为线路电阻， X 为线路电抗， R_g 为故障点处的过渡电阻。

虽然 R 与 l 成正比，但过渡电阻 R_g 是一个随机量，与故障点距离没有关系。 R_g 由两部分组成。一部分是电杆和外物电阻，称接地电阻；一部分是电弧电阻。接地电阻的大小与接地体的材料、表面积、布置方式以及大地导电率有关。电弧电阻则与电弧电流有关，在风吹，空气对流作用下，电弧长度也随之变化，因而电弧电阻是一个随机量。所以，用测量电阻和阻抗的方法不能消除过渡电阻的影响。而用测量线路电抗的方法则可排除过渡电阻的影响，使测量精度提高。

那么，怎样实现电抗法测距呢？

由图 1—1 (a) 可以看出，故障相母线残压 $\dot{U}_D$ （用向量表示）、故障电流 $\dot{I}_D$ 和回路阻抗间存在以下关系

$$\dot{U}_D = \dot{I}_D(R + R_g) + j\dot{I}_DX \quad (1-2)$$

$\dot{I}_D(R + R_g)$ 为残压 $\dot{U}_D$ 的有功分量，即电阻压降； $\dot{I}_DX$ 为残压 $\dot{U}_D$ 的无功分量，即电抗压降。即

$$\left. \begin{aligned} U_R &= I_D(R + R_g) \\ U_X &= I_DX \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

由图 1—1 (b) 所示向量关系可知

$$U_X = I_DX = U_D \sin \varphi \quad (1-4)$$

式中 φ ——短路阻抗角。

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R + R_g}。$$

所以

$$X = \frac{U_X}{I_D} = \frac{U_D \sin \varphi}{I_D} \quad (1-5)$$

如果已知线路单位长度（公里）电抗 x ，则故障点距离即可确定

$$l = \frac{X}{x} = \frac{1}{x} \cdot \frac{U_D \sin \varphi}{I_D} \quad (1-6)$$

DTG—1型接触网故障检测仪、ZGT—3型电力线路故障检测仪，以及DDK—1型输电线路故障检测仪，都是按上述原理构成的。

应当指出，对于不同型式的故障， $\dot{U}_D$ 、 $\dot{I}_D$ 的选取是不同的，称选相，由于 $\dot{U}_D$ 、 $\dot{I}_D$ 为线路高压侧的电压和电流，所以应通过电压互感器和电流互感器测出。 $U_D \sin \varphi$ 为电抗压降，要通过专门的变换回路得到，详见第三章第二节。 $U_D \sin \varphi / I_D$ 运算电路，见第三章第三节。

但是，对于中性点不接地系统，测量单相接地时要采取专门的措施，详见本章第三节。

二、相间故障测量

（一）三相短路

三相短路的等值电路，如图1—2所示。

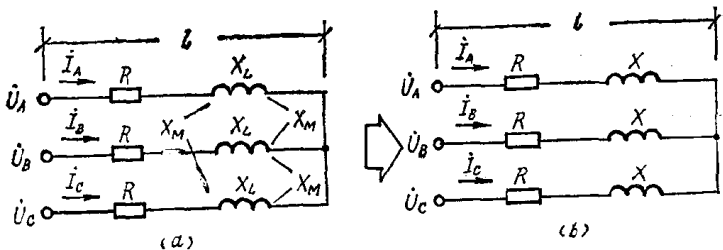


图1—2 三相短路等值电路

三相短路为对称性短路。母线残压和短路电流存在以下关系

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C &= 0 \\ \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

由图 1—2 (a) 可知

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{I}_A R + j \dot{I}_A X_L + j \dot{I}_B X_M + j \dot{I}_C X_M \\ \dot{U}_B &= \dot{I}_B R + j \dot{I}_B X_L + j \dot{I}_A X_M + j \dot{I}_C X_M \\ \dot{U}_C &= \dot{I}_C R + j \dot{I}_C X_L + j \dot{I}_A X_M + j \dot{I}_B X_M \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 X_L ——每相自感抗；

X_M ——相间互感抗。

在三相对称的架空线路中， X_L 和 X_M 对每相来说都是相同的。

根据 (1—7) 式， $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ ，可将 (1—8) 式变换为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{I}_A R + j \dot{I}_A (X_L - X_M) \\ \dot{U}_B &= \dot{I}_B R + j \dot{I}_B (X_L - X_M) \\ \dot{U}_C &= \dot{I}_C R + j \dot{I}_C (X_L - X_M) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

$X_L - X_M$ 为等值电抗，一般教科书中称它为正序电抗，用 X 表示。因为 $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$ 为正序电流，所以 $X_L - X_M = X$ 称作正序电抗。于是得到用正序电抗表示的三相短路等值电路图 1—2 (b)。则 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 可用正序电抗表示

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{I}_A R + j \dot{I}_A X \\ \dot{U}_B &= \dot{I}_B R + j \dot{I}_B X \\ \dot{U}_C &= \dot{I}_C R + j \dot{I}_C X \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

测量三相短路时，可以采用两种方式，一种是取相电压和相电流，即取 (1—10) 式中其中一相作为测量相；另一

种方式是采用线电压和相电流差测量方法。由 (1—10) 式可求得线电压关系

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B = (\dot{I}_A - \dot{I}_B)R + j(\dot{I}_A - \dot{I}_B)X \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C = (\dot{I}_B - \dot{I}_C)R + j(\dot{I}_B - \dot{I}_C)X \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A = (\dot{I}_C - \dot{I}_A)R + j(\dot{I}_C - \dot{I}_A)X \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

由 (1—11) 式可以看出, 可任取其中一相作为测量相。ZGT—3 型电力线路故障检测仪规定选择 AB 相作为三相短路时的测量相, 则

$$X = \frac{U_{AB} \sin \varphi}{\dot{I}_A - \dot{I}_B} \quad (1-12)$$

式中 φ —— $\dot{U}_{AB}$ 和 $(\dot{I}_A - \dot{I}_B)$ 的相角差。

如果已知线路单位长度 (公里) 正序电抗 x , 则故障点距离就可确定, 即

$$l = \frac{1}{x} \frac{U_{AB} \sin \varphi}{\dot{I}_A - \dot{I}_B} \quad (1-13)$$

$\dot{U}_{AB}$ 和 $(\dot{I}_A - \dot{I}_B)$ 由检测仪选相回路自动选出。

(1—12) 式表明, 三相短路时所测量的电抗为正序电抗, 确定故障点距离时, 要用单位正序电抗标定。

(二) 两相短路

图 1—3 为 BC 相短路示意图。

若忽略第三相 (A 相) 负载电流 (因短路电流比负载电流大得多, 负载电流可以忽略不计), 则 $\dot{I}_B = -\dot{I}_C$ (图 1—3 所示参考方向)。因此

$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{I}_B R + j\dot{I}_B X_L + j\dot{I}_C X_M \\ &= \dot{I}_B R + j\dot{I}_B (X_L - X_M) \end{aligned}$$

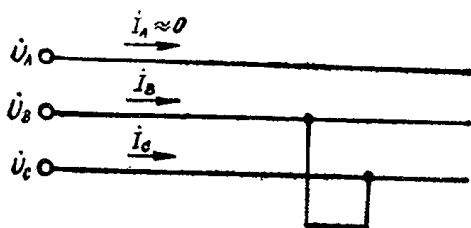


图 1-3 BC相短路示意图

因 $X_L - X_M = X$ (正序电抗), 则

$$\dot{U}_B = \dot{I}_B R + j \dot{I}_B X \quad (1-14)$$

同理

$$\dot{U}_C = \dot{I}_C R + j \dot{I}_C X \quad (1-15)$$

所以

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = (\dot{I}_B - \dot{I}_C) R + j(\dot{I}_B - \dot{I}_C) X \quad (1-16)$$

测量电抗

$$X = \frac{U_{BC} \sin \varphi}{\dot{I}_B - \dot{I}_C} = \frac{U_{BC} \sin \varphi}{2 \dot{I}_B} \quad (1-17)$$

所测电抗为正序电抗, 应用单位正序电抗标定距离, 即

$$l = \frac{X}{x} = \frac{1}{x} \frac{U_{BC} \sin \varphi}{\dot{I}_B - \dot{I}_C} = \frac{1}{x} \frac{U_{BC} \sin \varphi}{2 \dot{I}_B} \quad (1-18)$$

AB相短路和CA相短路时的分析方法与此类似, 可直接写出

$$l = \frac{1}{x} \frac{U_{AB} \sin \varphi}{\dot{I}_A - \dot{I}_B} = \frac{1}{x} \frac{U_{AB} \sin \varphi}{2 \dot{I}_A} \quad (1-19)$$

$$l = \frac{1}{x} \frac{U_{CA} \sin \varphi}{\dot{I}_C - \dot{I}_A} = \frac{1}{x} \frac{U_{CA} \sin \varphi}{2 \dot{I}_C} \quad (1-20)$$

ZGT—3 型电力线路故障检测仪就是按照 (1—13)、(1—18)、(1—19) 和 (1—20) 式进行相间故障测量的。

(三) 两相两点接地

在10千伏系统中，由于中性点不接地，当出现单相接地时，另外两相相电压将升高，有可能造成另外一相绝缘击穿，而发展成为两相两点接地故障。这也是相间故障的一种情况。在这种情况下，ZGT—3 型电力线路故障检测仪的测量结果是什么呢？请看图 1—4 的例子。

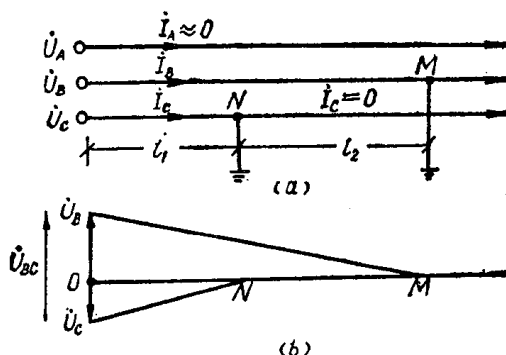


图 1—4 BC相两点接地

(a) 两相两点接地示意图；

(b) 两相两点接地时的电压变化。

设B相在M点接地，C相在N点接地。故障电流自B相母线→M点→大地→N点→C相母线。在 l_2 一段上C相电流等于零。若忽略A相电流，则由图 1—4 可写出B、C相电压关系式

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{I}_B r(l_1 + l_2) + j\dot{I}_B x_L(l_1 + l_2) + j\dot{I}_C x_M l_1 \\ \dot{U}_C &= \dot{I}_C r l_1 + j\dot{I}_C x_L l_1 + j\dot{I}_B x_M l_1 \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

式中 x_L ——每公里线路的自感抗；

x_M ——每公里线路的互感抗。

因 $\dot{I}_B = -\dot{I}_C$ (忽略 $\dot{I}_A$)，则由 (1—21) 式可得：

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BC} &= 2\dot{I}_{Br}l_1 + \dot{I}_{Br}l_2 + j[2\dot{I}_B(x_L - x_M)l_1 + \dot{I}_B x_L l_2] \\ &= 2\dot{I}_{Br}l_1 + \dot{I}_{Br}l_2 + j[2\dot{I}_B x l_1 + \dot{I}_B x_L l_2] \quad (1-22)\end{aligned}$$

式中 $x = x_L - x_M$ ——每公里线路正序电抗。

设 $x_L = K_D x$ ， K_D 称补偿系数，则

$$\dot{U}_{BC} = 2\dot{I}_{Br}l_1 + \dot{I}_{Br}l_2 + j \left[2\dot{I}_B x \left(l_1 + \frac{K_D}{2} l_2 \right) \right] \quad (1-23)$$

所以，测量距离为 $l_1 + \frac{K_D}{2} l_2$ ，即

$$l_1 + \frac{K_D}{2} l_2 = \frac{U_{BC} \sin \varphi}{2 \dot{I}_B} \cdot \frac{1}{x} \quad (1-24)$$

对于单回路无避雷线的架空线路， $K_D \approx 1.83$ (证明略)。所以 $l_1 + \frac{K_D}{2} l_2 = l_1 + \frac{1.83}{2} l_2 = l_1 + 0.915 l_2 \approx l_1 + l_2$ 。由此可见，两相两点接地时，测量距离为两个接地点中最远一点 (M 点) 的距离。这里存在一定误差，设误差为 Δl ， $\Delta l = (l_1 + l_2) - (l_1 + 0.915 l_2) = 0.08 l_2$ 。可见， l_2 越大， Δl 越大。最大误差出现在一相线路末端接地，而另一相在线路始端接地，此时 l_2 最大，误差最大。

三、单相接地故障测量

这里分两种情况：

1. 中性点不接地系统单相接地。ZGT—3型电力线路故障检测仪就是适应这种线路的特点而设计的。

2. 中性点接地系统单相接地。DDK—1型输电线路故障检测仪适用于这种系统。

以上两种情况截然不同。前者，单相接地不是短路，不

造成断路器跳闸，流过故障相的电流只是系统的电容电流，不是短路电流；后者与此相反，流过故障相的电流是短路电流，属于短路故障。在进行故障定位时，采取的测量手段也完全不同。下面，我们分别加以介绍。

(一) 中性点不接地系统

在这种系统中，由于电源侧中性点不接地，所以单相接地时，没有形成短路回路，不能直接应用电抗法进行故障定位。为了解决这个问题，可采取以下两种措施：

1. 电源中性点瞬时接地。就是说，在电源中性点（有隔离变压器的条件下）与地之间接一个开关（断路器），如图 1—5（a）所示。在出现单相接地后，人为地（或自动地）将此开关瞬时闭合，经过一定时间后自动断开，以构成中性点瞬时接地的条件。这样，就可以用电抗法进行测量。大家知道，中性点不接地系统单相接地时，线路仍允许短时间运行，如果我们照上述制造了中性点接地的条件，则有可能造成线路跳闸，这是不允许的。为了避免这种情况，可以控制中性点瞬时接地的时间小于继电保护的動作时间。这样，既满足了测量的需要，又不致危及线路运行。利用这个方法，我们制成了 ZGT—2 型电力线路故障检测仪。

在中性点接地开关闭合的瞬间，检测仪进行测量。参见图 1—5（a）。

例如 A 相接地，故障点距离可由 A 相母线残压 $\dot{U}_A$ 和短路电流 $\dot{I}_A$ 确定，计算公式如下

$$\left. \begin{aligned} X_L &= \frac{U_A \sin \varphi}{I_A} \\ l &= \frac{1}{x_L} \frac{U_A \sin \varphi}{I_A} \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

注意，此时所测电抗为自感电抗 X_L ，所以应用单位自