

变配电装置的故障分析

杨 阿 德 著

煤炭工业出版社



变配电装置的故障分析

杨阿德著

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书以实践经验为主要内容,运用电工学的基本原理和数学知识,对变配电装置的各种断路、短路、错接和错误操作故障进行了分析,并提出了判断故障的方法和预防故障的措施。叙述、插图采用了正常情况和异常情况的对比方法,说理简明扼要,深入浅出。可供具有一定基础知识的工厂、矿山、农村从事值班、维修、安装、试验工作的电工阅读,也可供有关电气工程技术人員参考。

变配电装置的故障分析

杨 阿 德 著

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

石油化学工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $6 \frac{1}{8}$

字数 133 千字 印数 1—63,100

1976年9月第1版 1976年9月第1次印刷

书号 15035·2027 定价 0.54 元

前 言

变配电装置是发电、输电、用电的中间环节，是工厂、矿山技术装备的心脉。这个环节出了故障，轻则，扰乱单一用户的生产秩序，造成工艺技术过失，危及人身安全；重则，破坏发电设备的正常运行，影响整个电力系统，给国民经济的其它部门招致重大损失。因此，对变配电装置运行异常现象的原因进行分析，做到准确地判断、迅速地排除故障，并从中摸索规律，掌握要领，指导装配过程，消除先天隐患，不仅有着技术经济方面的意义，而且还有着政治方面的意义。

变配电装置的类别繁多，可能发生的故障是各种各样的。但常见的、危害最大的、而且较难分析的要算是断路、错接、短路、错误操作这四种故障。尤其是前三种故障，理论分析是较难理解的。因此，本书用了较多的篇幅，论述了关于断路、错接和短路方面的实例，以使读者获得较多的知识，提高分析故障的能力。

由于电磁的本质用肉眼看不见，故在分析故障时，充分运用了几何图形这个工具，特别是矢量图，它把看不见的电磁关系变成可以直观的东西了，这对于帮助理解物理意义很有价值。

依据电磁变化规律描绘出几何图形，还要进行数学运算，把一些用文字说不清的事，用一个数学式子来表示，就明确地回答了问题。有的读者若对数学运算过程一时看不懂，这也不要紧，把图形、结论看明白就可以了。

遵照毛主席“有比较才能鉴别”的教导，本书在每例举一种故障之前，都首先从基本原理出发，谈了正常情况。这样写法，正是为了比较和鉴别，从中掌握由正常情况过渡到故障情况的变化规律。

马克思主义的方法论，是不但要提出问题，还要解决问题。本书不单是列举了许多曾经发生过和可能发生的电器故障，同时，对于怎样预防、寻找故障，也提了一些措施。并且，还介绍了某些设备的选择计算方法。然而，电工技术知识涉及面较广，笔者的实践和理论都还缺欠，错误之处难免，希望读者多提意见。

在撰写本书的过程中，得到铜川矿务局、王家河矿和机电部门各级领导的支持及有关同志的帮助。在此，谨致谢意。

杨阿德

一九七三年九月十五日

目 录

第一章 断路故障	1
第一节 中性线断路	1
一、照明电路	1
二、电流互感器电路	17
三、零序电压检测仪电路	21
四、消弧线圈电路	25
第二节 相线断路	27
一、三相四线制负荷电路	27
二、三相三线制对称星形负荷电路	31
三、三角形负荷电路	33
第三节 变压器一相断路	36
一、Y/Y变压器一次侧一相断路	36
二、Y/ Δ 变压器一次侧一相断路	40
三、 Δ /Y变压器一次侧一相断路	42
四、 Δ /Y变压器一次侧一相线圈断路	45
五、 Δ / Δ 变压器一次或二次侧一相线圈断路	53
六、Y/Y变压器一台一次侧一相断路	55
七、并联变压器一台一次侧一相断路	60
第四节 整流电路断路	62
一、单相全波桥式整流电路一只整流元件断路	62
二、三相半波整流电路一相断路	65
三、三相全波整流电路一相、一、二只整流元件断路	70
第二章 错接故障	79
第一节 接错相序	79

一、容感电压补偿器接错相序	79
二、阻容中性点固定器接错相序	89
三、异相补角电压互感器接错相序	97
四、电源相序的测定	103
第二节 变压器一相线圈接反	106
一、Y/Y变压器二次侧一相线圈接反	106
二、Y/Y变压器一次侧一相线圈接反	109
三、Y/ Δ 变压器二次侧一相线圈接反	115
第三节 变压器的极性接错	116
一、Y/ Δ 变压器的极性接错	117
二、 Δ /Y变压器的极性接错	119
三、Y/Y变压器的极性接错	121
四、 Δ / Δ 变压器的极性接错	122
五、变压器极性接错给并联工作带来的麻烦	124
六、变压器的极性接错给差动保护工作带来的麻烦	131
七、变压器极性的测定	141
第四节 零序电流互感器电缆头地线接错	145
第三章 错误操作故障	149
第一节 操作过电压	149
第二节 并联变压器调压开关位置不相符	158
第三节 隔离开关带负荷拉闸	164
第四章 短路故障	167
第一节 星形负荷一相短路	167
一、电容器组一相被击穿	167
二、三柱变压器一次侧一相线圈被短路	171
第二节 变压器内部短路	175
一、Y/Y变压器一次侧一相线圈部分匝数被短路	175
二、Y/ Δ 变压器一次侧一相线圈被短路	179
第五章 两相式过流保护装置的设计错误故障	183

第一章 断 路 故 障

变配电装置在长期运行中，由于受机械力、电磁力的作用和热效应、严重氧化等原因，可能造成相线、中性线和设备内部等断路故障，使设备不能正常运行。为此，必须对各种断路故障进行分析。

第一节 中性线断路

一、照明电路

电路图如图 1 所示，只要电源电压三相对称，尽管三相负荷不对称，因为负荷的中性点 O' 与电源的中性点 O 直接连接，若中性线的阻抗忽略不计，则 O' 点与 O 点同电位，于是三相负荷电压降仍然对称。大家知道，负荷电压降等于电源电压与中性线上的电压降的几何差，即：

$$\dot{U}_{AO'} = \dot{U}_{AO} - \dot{U}_{OO'}$$

$$\dot{U}_{BO'} = \dot{U}_{BO} - \dot{U}_{OO'}$$

$$\dot{U}_{CO'} = \dot{U}_{CO} - \dot{U}_{OO'}$$

$$\text{而} \quad -\dot{U}_{OO'} = \dot{i}_O Z_O$$

式中 $\dot{i}_O$ ——流过中性线的电流；

Z_O ——中性线阻抗。

如令 $Z_O = 0$

那么 $\dot{U}_{OO'} = 0$

于是，三相负荷电压降就等于三相电源电压，即：

$$\dot{U}_{AO'} = \dot{U}_{AO}$$

$$\dot{U}_{BO'} = \dot{U}_{BO}$$

$$\dot{U}_{CO'} = \dot{U}_{CO}$$

所以三相负荷电压降是对称的。

由负荷的中性点 O' 经过中性线流向电源中性点的电流为：

$$-\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

如图 1 所示，假设三相负荷电阻的关系为：

$$R_A = 2R_B = 3R_C$$

那么电流的关系则为：

$$I_B = 2I_A$$

$$I_C = 3I_A$$

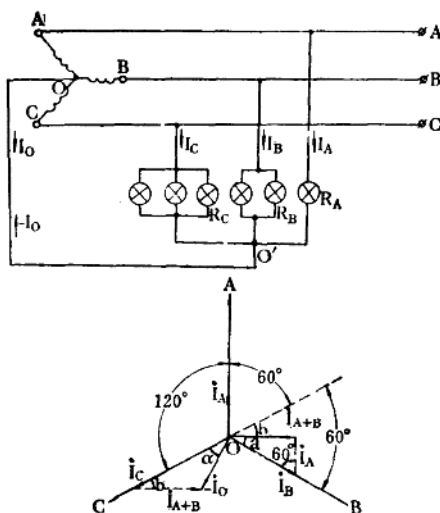


图 1 三相负荷不平衡中性线的作用图

由于白炽灯是纯电阻性负荷，其电流与电压同相位。所以，尽管各相电流的大小不等，但相位仍互距 120° 。我们若以 $\dot{i}_A$ 为参考量，则得中性线的电流为：

$$\begin{aligned}
 -\dot{i}_O &= \dot{i}_A + \dot{i}_B + \dot{i}_C \\
 &= \dot{i}_A e^{j0} + 2\dot{i}_A e^{-j\frac{2\pi}{3}} + 3\dot{i}_A e^{-j\frac{4\pi}{3}} \\
 &= \dot{i}_A \left(e^{j0} + 2e^{-j\frac{2\pi}{3}} + 3e^{-j\frac{4\pi}{3}} \right) \\
 &= \dot{i}_A \{ \cos 0^\circ + j\sin 0^\circ + 2[\cos(-120^\circ) + j\sin(-120^\circ)] + 3[\cos 120^\circ + j\sin 120^\circ] \} \\
 &= \dot{i}_A \left\{ 1 + 2 \left[\left(-\frac{1}{2} \right) + j \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] + 3 \left[-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right] \right\} \\
 &= \dot{i}_A \left\{ 1 - 1 - j\sqrt{3} - \frac{3}{2} + j\frac{3\sqrt{3}}{2} \right\} \\
 &= \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{i}_A (-\sqrt{3} + j) \\
 &= \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{i}_A \sqrt{(-\sqrt{3})^2 + 1^2} e^{j \arctg \frac{1}{-\sqrt{3}}} \\
 &= \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{i}_A \sqrt{4} e^{j\frac{5\pi}{6}} \\
 &= \sqrt{3} \dot{i}_A e^{j150^\circ}
 \end{aligned}$$

这就是说，通过中性线的电流是负荷最小那相电流的 $\sqrt{3}$ 倍，而且较该相电流超前 150° 。在选择负荷极端不平衡照明电路的中性线断面时，必须考虑到通过中性线电流的大

小，断面不宜过小。

还可以用另外一种方法求出通过中性线的电流：

1. 先求电流 i_A 与电流 i_B 的几何和 i_{A+B} ，如图 1 的矢量图所示，将矢量 i_A 沿矢量 i_B 平行移至 i_B 的终端，从 O 点出发到平移后的 i_A 终点的矢量 i_{A+B} 的长度即为 i_A 与 i_B 的几何和。即：

$$i_{A+B} = i_A + i_B$$

因为 i_A 与 i_B 相距 120° ，所以平移后的 i_A 与 i_B 的夹角为 60° ，根据余弦定律得：

$$\begin{aligned} I_{A+B} &= (I_A^2 + I_B^2 - 2I_A I_B \cos 60^\circ)^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[I_A^2 + (2I_A)^2 - 2I_A \cdot 2I_A \cdot \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= [I_A^2 + 4I_A^2 - 2I_A^2]^{\frac{1}{2}} \\ &= I_A \sqrt{1 + 4 - 2} \\ &= \sqrt{3} I_A \end{aligned}$$

2. 求电流 i_{A+B} 与电流 i_C 的几何和

将矢量 i_{A+B} 沿矢量 i_C 平行移至 i_C 的终端，并从 O 点出发至平移后的矢量 i_{A+B} 终端的矢量 $-i_O$ 的长度为 i_{A+B} 与 i_C 的几何和。即：

$$-i_O = i_{A+B} + i_C$$

从矢量图中得知角 b 与角 a 之和为 60° 。根据正弦定律得：

$$\begin{aligned} \frac{I_A}{\sin a} &= \frac{I_{A+B}}{\sin 60^\circ} \\ &= \frac{\sqrt{3} I_A \cdot 2}{\sqrt{3}} \\ &= 2I_A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\therefore \sin a &= \frac{I_A}{2I_A} \\ &= \frac{1}{2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\angle a &= \arcsin \frac{1}{2} \\ &= 30^\circ\end{aligned}$$

而 $\begin{aligned}\angle b &= 60^\circ - \angle a \\ &= 30^\circ\end{aligned}$

$$\begin{aligned}\text{于是 } -I_0 &= [I_{A+B}^2 + I_C^2 - 2I_{A+B}I_C \cos b]^{\frac{1}{2}} \\ &= [(\sqrt{3}I_A)^2 + (3I_A)^2 \\ &\quad - 2 \cdot \sqrt{3}I_A \cdot 3I_A \cos 30^\circ]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[3I_A^2 + 9I_A^2 - 2 \cdot \sqrt{3} \cdot 3I_A^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \sqrt{3}I_A\end{aligned}$$

并 $\begin{aligned}\frac{I_{A+B}}{\sin \alpha} &= \frac{|-I_0|}{\sin b} \\ &= \frac{I_0}{\sin 30^\circ}\end{aligned}$

$$\begin{aligned}\therefore \sin \alpha &= \frac{I_{A+B} \sin 30^\circ}{I_0} \\ &= \frac{\sqrt{3}I_A \cdot \frac{1}{2}}{\sqrt{3}I_A} \\ &= \frac{1}{2}\end{aligned}$$

$$\angle \alpha = \arcsin \frac{1}{2}$$

$$= 30^\circ$$

由矢量图得知 $-\dot{i}_0$ 超前于 $\dot{i}_A$ $120^\circ + \alpha = 150^\circ$

$$\therefore -\dot{i}_0 = \sqrt{3} \dot{i}_A e^{j150^\circ}$$

其结果和复数运算一样，但不如复数运算来的简便。尤其是当中性线阻抗不能忽略和三相负荷的性质即功率因数不同时，这种方法显得更复杂。

当中性线上的阻抗不能忽略时，则不平衡电流通过中性线所造成的电压降 $\dot{U}_{00'}$ 就不等于零。那时，各相电流分别为：

$$\dot{i}_A = \frac{\dot{U}_{AO} - \dot{U}_{00'}}{Z_A}$$

$$\dot{i}_B = \frac{\dot{U}_{BO} - \dot{U}_{00'}}{Z_B}$$

$$\dot{i}_C = \frac{\dot{U}_{CO} - \dot{U}_{00'}}{Z_C}$$

$$\dot{i}_0 = \frac{-\dot{U}_{00'}}{Z_0}$$

式中 Z_A 、 Z_B 、 Z_C ——是各相负荷的阻抗。

各相负荷的阻抗，若以导纳 Y ($Y = \frac{1}{Z}$) 代入上式则：

$$\dot{i}_A = (\dot{U}_{AO} - \dot{U}_{00'}) Y_A$$

$$\dot{i}_B = (\dot{U}_{BO} - \dot{U}_{00'}) Y_B$$

$$\dot{i}_C = (\dot{U}_{CO} - \dot{U}_{00'}) Y_C$$

$$\dot{i}_0 = -\dot{U}_{00'} Y_0$$

于是通过中性线电流的表示式为：

$$\therefore -\dot{i}_0 = \dot{i}_A + \dot{i}_B + \dot{i}_C$$

$$\begin{aligned}
\therefore \dot{U}_{OO'} Y_O &= (\dot{U}_{AO} - \dot{U}_{OO'}) Y_A + (\dot{U}_{BO} - \dot{U}_{OO'}) Y_B \\
&\quad + (\dot{U}_{CO} - \dot{U}_{OO'}) Y_C \\
&= \dot{U}_{AO} Y_A - \dot{U}_{OO'} Y_A + \dot{U}_{BO} Y_B - \dot{U}_{OO'} Y_B \\
&\quad + \dot{U}_{CO} Y_C - \dot{U}_{OO'} Y_C \\
&= \dot{U}_{AO} Y_A + \dot{U}_{BO} Y_B + \dot{U}_{CO} Y_C - \dot{U}_{OO'} (Y_A \\
&\quad + Y_B + Y_C)
\end{aligned}$$

移项得：

$$\dot{U}_{OO'} (Y_A + Y_B + Y_C + Y_O) = \dot{U}_{AO} Y_A + \dot{U}_{BO} Y_B + \dot{U}_{CO} Y_C$$

$$\therefore \dot{U}_{OO'} = \frac{\dot{U}_{AO} Y_A + \dot{U}_{BO} Y_B + \dot{U}_{CO} Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_O}$$

这就是求中性点位移的计算公式。只要知道电源电压和各相负荷阻抗，应用这公式就可求出负荷中性点 O' 与电源中性点 O 之间的电位差，或中性点的位移量。当 $\dot{U}_{OO'}$ 确定之后，各相负荷的电压降就可求出来。我们以前面所讨论的图1为例，令中性线的电阻 R_O （忽略电抗）为负荷最大那相电阻 R_C 的 $\frac{1}{10}$ ，即：

$$R_O = \frac{1}{10} R_C$$

$$\text{又因为 } Y_A = \frac{1}{R_A}, Y_B = \frac{1}{R_B} = \frac{2}{R_A}, Y_C = \frac{1}{R_C} = \frac{3}{R_A},$$

$$Y_O = \frac{1}{R_O} = \frac{30}{R_A}$$

则中性线上的电压降为：

$$\dot{U}_{OO'} = \frac{\dot{U}_{AO} Y_A + \dot{U}_{BO} Y_B + \dot{U}_{CO} Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_O}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\dot{U}_{AO} \frac{1}{R_A} + \dot{U}_{BO} \frac{2}{R_A} + \dot{U}_{CO} \frac{3}{R_A}}{\frac{1}{R_A} + \frac{2}{R_A} + \frac{3}{R_A} + \frac{30}{R_A}} \\
&= \frac{\dot{U}_{AO} + 2\dot{U}_{BO} + 3\dot{U}_{CO}}{36} \\
&= \frac{\dot{U}_{AO} + \dot{U}_{BO} + \dot{U}_{BO} + 3\dot{U}_{CO}}{36} \\
&= \frac{-\dot{U}_{CO} + \dot{U}_{BO} + 3\dot{U}_{CO}}{36} \\
&= \frac{2\dot{U}_{CO} + \dot{U}_{BO}}{36} \\
&= \frac{2\dot{U}_{CO} + \dot{U}_{CO} e^{i120^\circ}}{36} \\
&= \frac{\dot{U}_{CO}}{36} (2 + \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) \\
&= \frac{\dot{U}_{CO}}{36} \left(2 - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\
&= \frac{\dot{U}_{CO}}{72} (3 + j\sqrt{3}) \\
&= \frac{\sqrt{12}}{72} \dot{U}_{CO} e^{j \arctan \frac{\sqrt{3}}{3}} \\
&= \frac{\sqrt{3}}{36} \dot{U}_{CO} e^{i30^\circ}
\end{aligned}$$

于是，各相负荷的实际电压降为：

$$\dot{U}_{AO'} = \dot{U}_{AO} - \dot{U}_{OO'}$$

$$\begin{aligned}
&= \dot{U}_{AO} - \frac{\sqrt{3}}{36} \dot{U}_{CO} e^{i30^\circ} \\
&= \dot{U}_{AO} - \frac{\sqrt{3}}{36} e^{i30^\circ} \dot{U}_{AO} e^{i120^\circ} \\
&= \dot{U}_{AO} - \frac{\sqrt{3}}{36} \dot{U}_{AO} e^{i150^\circ} \\
&= \dot{U}_{AO} \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{36} e^{i150^\circ} \right) \\
&= \dot{U}_{AO} \left[1 - \frac{\sqrt{3}}{36} (\cos 150^\circ + j \sin 150^\circ) \right] \\
&= \dot{U}_{AO} \left[1 - \frac{\sqrt{3}}{36} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) \right] \\
&= \frac{\dot{U}_{AO}}{72} [75 - j\sqrt{3}] \\
&= \frac{75.02}{72} \dot{U}_{AO} e^{j \arctg \frac{-\sqrt{3}}{75}} \\
&= 1.04 \dot{U}_{AO} e^{-j1^\circ 18'}
\end{aligned}$$

即当中性线电阻 $R_0 = \frac{1}{10} R_C$ 时的 A 相负荷电压降，比

中性线阻抗为零时的 A 相负荷电压降升高了 4%，相位也向后移了 1 度 18 分。用同样的方法也可以求出 $\dot{U}_{BO'}$ 和 $\dot{U}_{CO'}$ 。

由计算可以看出，当中性线的阻抗值不大时，尽管三相负荷不平衡，但三相负荷电压降的对称性变化不大。

然而，由于某种原因一旦中性线发生断路时，情况就不同了。这时，由于没有中性线滤过不平衡电流，为维持三相负荷电流的矢量和等于零，负荷中性点必产生位移，如图 2 所示。为简便起见，我们假设每只灯泡的电阻均为 R ，应用

求中性点位移的计算公式，算出中性点的位移量，并求出各相负荷的电压降：

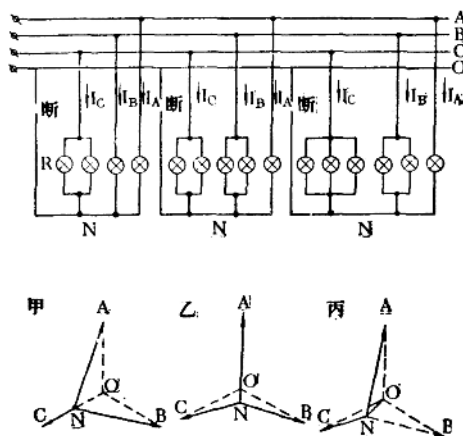


图 2 不平衡负荷电路，中性线断路时中性点位移图

在图 2 甲中，三相负荷阻抗为：

$$Z_A = R$$

$$Z_B = R$$

$$Z_C = \frac{R}{2}$$

$$\therefore Y_A = \frac{1}{R}, Y_B = \frac{1}{R}, Y_C = \frac{2}{R}, Y_O = \frac{1}{\infty} = 0$$

中性点的位移量为：

$$\dot{U}_{NO} = \frac{\dot{U}_{AO}Y_A + \dot{U}_{BO}Y_B + \dot{U}_{CO}Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_O}$$