变配电装置的故障分析

杨 阿 德 著

工 业 出 版 社

內容提要

本书以实践经验为主要內容，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员参考。

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 787×1092 1/32　印张 6 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

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：

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

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

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

而 $$-\dot{U}_{OO'}=\dot{I}_O Z_O$$

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：

$$I_B = 2I_A$$

$$I_C = 3I_A$$

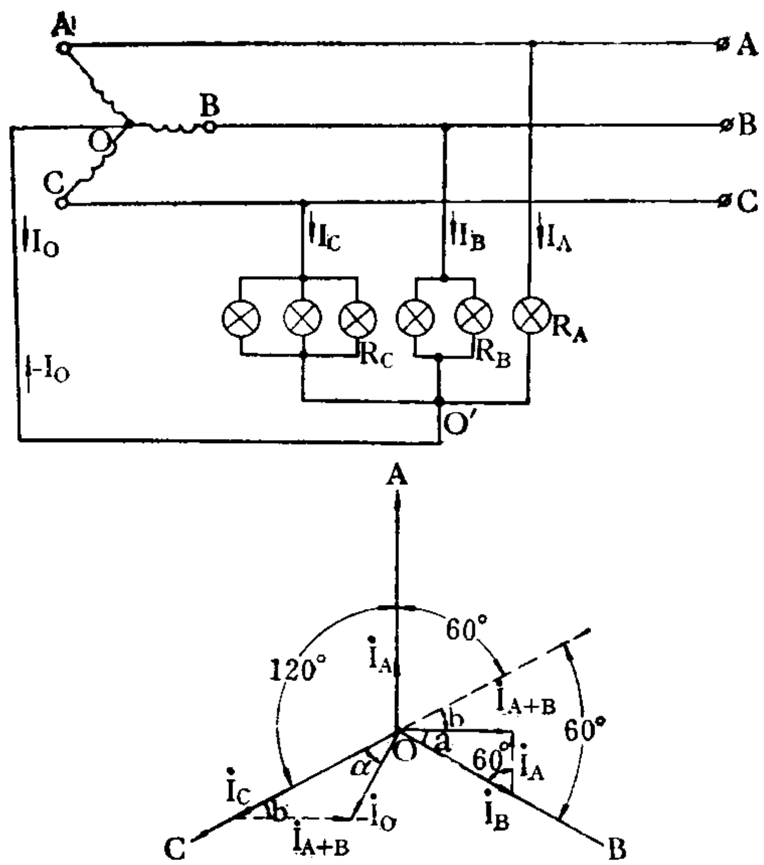

图 1　三相负荷不平衡中性线的作用图

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：

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

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$\dot{I}_A$与电流$\dot{I}_B$的几何和$\dot{I}_{A+B}$，如图 1 的矢量图所示，将矢量$\dot{I}_A$沿矢量$\dot{I}_B$平行移至$\dot{I}_B$的终端，从O点出发到平移后的$\dot{I}_A$终点的矢量$\dot{I}_{A+B}$的长度即为$\dot{I}_A$与$\dot{I}_B$的几何和。即：

$$\dot{I}_{A+B}=\dot{I}_A+\dot{I}_B$$

因为$\dot{I}_A$与$\dot{I}_B$相距120°，所以平移后的$\dot{I}_A$与$\dot{I}_B$的夹角为60°，根据余弦定律得：

$$\begin{aligned}I_{A+B}&=(I_A^2+I_B^2-2I_AI_B\cos60°)^{\frac{1}{2}}\\&=\left[I_A^2+(2I_A)^2-2I_A\cdot2I_A\cdot\frac{1}{2}\right]^{\frac{1}{2}}\\&=[I_A^2+4I_A^2-2I_A^2]^{\frac{1}{2}}\\&=I_A\sqrt{1+4-2}\\&=\sqrt{3}I_A\end{aligned}$$

2．求电流$\dot{I}_{A+B}$与电流$\dot{I}_C$的几何和

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

$$-\dot{I}_O=\dot{I}_{A+B}+\dot{I}_C$$

从矢量图中得知角b与角a之和为60°。根据正弦定律得：

$$\begin{aligned}\frac{I_A}{\sin a}&=\frac{I_{A+B}}{\sin60°}\\&=\frac{\sqrt{3}I_A\cdot2}{\sqrt{3}}\\&=2I_A\end{aligned}$$

∴ $$\sin a=\frac{I_A}{2I_A}$$

$$=\frac{1}{2}$$

$$\angle a=\arc\sin\frac{1}{2}$$

$$=30^\circ$$

而 $$\angle b=60^\circ-\angle a$$

$$=30^\circ$$

于是 $$-I_O=[I_{A+B}^2+I_C^2-2I_{A+B}I_C\cos b]^{\frac{1}{2}}$$

$$=[(\sqrt{3}I_A)^2+(3I_A)^2-2\cdot\sqrt{3}I_A\cdot 3I_A\cos 30^\circ]^{\frac{1}{2}}$$

$$=\left[3I_A^2+9I_A^2-2\cdot\sqrt{3}\cdot 3I_A^2\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$=\sqrt{3}I_A$$

并 $$\frac{I_{A+B}}{\sin\alpha}=\frac{|-I_O|}{\sin b}$$

$$=\frac{I_O}{\sin 30^\circ}$$

∴ $$\sin\alpha=\frac{I_{A+B}\sin 30^\circ}{I_O}$$

$$=\frac{\sqrt{3}I_A\cdot\frac{1}{2}}{\sqrt{3}I_A}$$

$$=\frac{1}{2}$$

$$\angle\alpha = \arc\sin\frac{1}{2}$$

$$=30^\circ$$

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

∴ $$-\dot{I}_O=\sqrt{3}\,\dot{I}_A e^{j150^\circ}$$

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$\dot{U}_{OO'}$就不等于零。那时，各相电流分别为：

$$\dot{I}_A=\frac{\dot{U}_{AO}-\dot{U}_{OO'}}{Z_A}$$

$$\dot{I}_B=\frac{\dot{U}_{BO}-\dot{U}_{OO'}}{Z_B}$$

$$\dot{I}_C=\frac{\dot{U}_{CO}-\dot{U}_{OO'}}{Z_C}$$

$$\dot{I}_O=\frac{-\dot{U}_{OO'}}{Z_O}$$

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$\left(Y=\frac{1}{Z}\right)$代入上式则：

$$\dot{I}_A=(\dot{U}_{AO}-\dot{U}_{OO'})Y_A$$
$$\dot{I}_B=(\dot{U}_{BO}-\dot{U}_{OO'})Y_B$$
$$\dot{I}_C=(\dot{U}_{CO}-\dot{U}_{OO'})Y_C$$
$$\dot{I}_O=-\dot{U}_{OO'}Y_O$$

于是通过中性线电流的表示式为：

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

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

移项得：

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

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

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：

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

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：

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

$$=\frac{\dot{U}_{AO}\frac{1}{R_A}+\dot{U}_{BO}\frac{2}{R_A}+\dot{U}_{CO}\frac{3}{R_A}}{\frac{1}{R_A}+\frac{2}{R_A}+\frac{3}{R_A}+\frac{30}{R_A}}$$

$$=\frac{\dot{U}_{AO}+2\dot{U}_{BO}+3\dot{U}_{CO}}{36}$$

$$=\frac{\dot{U}_{AO}+\dot{U}_{BO}+\dot{U}_{BO}+3\dot{U}_{CO}}{36}$$

$$=\frac{-\dot{U}_{CO}+\dot{U}_{BO}+3\dot{U}_{CO}}{36}$$

$$=\frac{2\dot{U}_{CO}+\dot{U}_{BO}}{36}$$

$$=\frac{2\dot{U}_{CO}+\dot{U}_{CO}e^{j120^\circ}}{36}$$

$$=\frac{\dot{U}_{CO}}{36}(2+\cos 120^\circ+j\sin 120^\circ)$$

$$=\frac{\dot{U}_{CO}}{36}\left(2-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$=\frac{\dot{U}_{CO}}{72}(3+j\sqrt{3})$$

$$=\frac{\sqrt{12}}{72}\dot{U}_{CO}\,e^{j\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{3}}{3}}$$

$$=\frac{\sqrt{3}}{36}\dot{U}_{CO}e^{j30^\circ}$$

于是，各相负荷的实际电压降为：

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

$$= \dot{U}_{AO} - \frac{\sqrt{3}}{36}\dot{U}_{CO}e^{j30°}$$

$$= \dot{U}_{AO} - \frac{\sqrt{3}}{36}e^{j30°}\dot{U}_{AO}e^{j120°}$$

$$= \dot{U}_{AO} - \frac{\sqrt{3}}{36}\dot{U}_{AO}e^{j150°}$$

$$= \dot{U}_{AO}\left(1 - \frac{\sqrt{3}}{36}e^{j150°}\right)$$

$$= \dot{U}_{AO}\left[1 - \frac{\sqrt{3}}{36}(\cos150° + j\sin150°)\right]$$

$$= \dot{U}_{AO}\left[1 - \frac{\sqrt{3}}{36}\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right)\right]$$

$$= \frac{\dot{U}_{AO}}{72}\left[75 - j\sqrt{3}\right]$$

$$= \frac{75.02}{72}\dot{U}_{AO}\,e^{j\operatorname{arctg}\frac{-\sqrt{3}}{75}}$$

$$= 1.04\dot{U}_{AO}e^{-j1°18'}$$

即当中性线电阻 $R_O = \frac{1}{10}R_C$ 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：

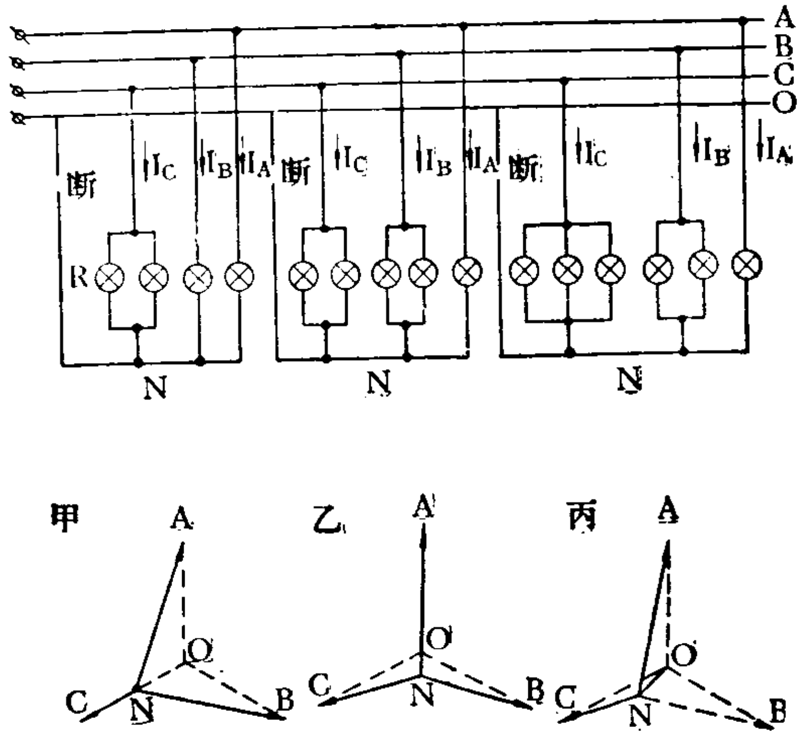

图 2　不平衡负荷电路，中性线断路时中性点位移图

在图 2 甲中，三相负荷阻抗为：

$$Z_A = R$$

$$Z_B = R$$

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

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

中性点的位移量为：

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

$$=\frac{\dot{U}_{AO}\frac{1}{R}+\dot{U}_{BO}\frac{1}{R}+\dot{U}_{CO}\frac{2}{R}}{\frac{1}{R}+\frac{1}{R}+\frac{2}{R}+0}$$

$$=\frac{\dot{U}_{AO}+\dot{U}_{BO}+2\dot{U}_{CO}}{4}$$

$$=\frac{-\dot{U}_{CO}+2\dot{U}_{CO}}{4}$$

$$=\frac{\dot{U}_{CO}}{4}$$

中性点位移后的三相负荷电压降为：

$$\dot{U}_{AN}=\dot{U}_{AO}-\dot{U}_{NO}$$

$$=\dot{U}_{AO}-\frac{\dot{U}_{CO}}{4}$$

$$=\dot{U}_{AO}-\frac{1}{4}\dot{U}_{AO}e^{j120^{\circ}}$$

$$=\dot{U}_{AO}\left[1-\frac{1}{4}(\cos 120^{\circ}+j\sin 120^{\circ})\right]$$

$$=\dot{U}_{AO}\left[1-\frac{1}{4}\left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right]$$

$$=\frac{\dot{U}_{AO}}{8}(9-j\sqrt{3})$$

$$=\frac{\dot{U}_{AO}}{8}\sqrt{84}e^{j\operatorname{arctg}\frac{-\sqrt{3}}{9}}$$

$$=\frac{\sqrt{21}\dot{U}_{AO}}{4}e^{-j10^{\circ}54'}$$

$$\approx 1.15\dot{U}_{AO}e^{-j10^{\circ}54'}$$