交流电能表错误接线百例解析

（第二版）

邱炳正 编著

中国计量出版社

前　　言

交流电能表的正确接线是保证电能表正确计量的首要条件。因此，电能表能否正确计量电能，不但取决于电能表的准确度等级，更重要的是取决于电能表的正确接线（包括整个电能计量装置的正确接线）。但是，在电能表的安装接线过程中，又难以避免地发生错误接线，特别是三相电能表由于使用场合广泛，出现的错误接线更是形形色色。

尽管电能表的误差很小，但错误接线给电能计量带来的误差却往往很大。因此，对于电能表的错误接线，不但要善于发现和及时纠正，同时，还更要善于根据现场的错误接线实例，正确地绘制出错误接线图和相应的向量图以便进行电能计量分析，最终达到对错误接线时的电量进行基本准确的更正。

本书是在原《交流电度表错误接线百例解析》一书的基础上修订而成的。从原书出版至今已整整八年了，八年来我国的计量事业得到了蓬勃发展，特别是电能表的研制和生产有了新的发展，电能表的新型式和新品种也在不断增加；法定计量单位的实施和电气制图与电气图形符号新国标的颁发使用等，这些变化使得必须对原书进行修订。这次修订除对原书作了部分修改外，又增加了测量用电压互感器断相的电能计量分析的新内容。

本书可供从事电能表检定与安装接线的人员学习使用，可供计量技术管理人员在处理因电能表错误接线所引起的电能计量纠纷时参考。

由于本人水平所限，书中错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

编著者

1999年11月

目　　录

第一章　基　础　知　识

第一节　正弦交流电的基本概念

一、什么是交流电

我们知道，直流电的大小和方向是不随时间变化的。交流电与直流电的区别，在于交流电的大小和方向均随时间有规律地作周期性变化。一般交流电是遵循正弦函数的变化规律的，因此，我们亦称交流电为正弦交流电，正弦交流电的电动势、电压、电流等物理量的大小也是随时间按正弦函数规律作周期性变化的。我们分别称它们为交流电动势、交流电压、交流电流，统称交流电。工业上用的交流电就是这种交流电。随时间按照正弦规律变化的电流和电压，写成函数式便是：

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

式中：U_m、I_m 分别是交流电压、电流的最大瞬时值，称为最大值或峰值，也称为振幅；u，i 分别为电压、电流的瞬时值，它是时间的函数；ω 是角频率；φ 称为初相角。

上式三角函数表示式表达了每个瞬时交流电流和电压的大小，所以又被称为交流电的瞬时值方程式。描绘交流电随时间变化规律的曲线，叫做波形图。图 1—1 是正弦交流电流的波形图。

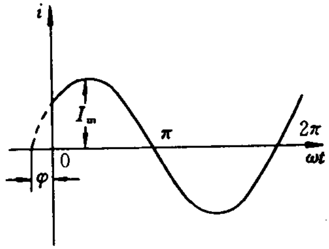

图 1—1

图 1—2 是一个简单的交流电路。当交流电源的出线端 A 为正极，B 为负极时，电流就从 A 端流出，经过负载流回 B 端，如图中实线箭头所示。过一会儿，出线端 A 变为负极，B 变为正极，这时电流就从 B 端流出，经过负载流回 A 端，如图中虚线箭头所示。因此，交流电的方向是不断地交变的。我们在交流电路图中常常用箭头标出电流的方向。其实，箭头所指方向并不代表电流的实际方向，只是为了分析方便假设的电流方向，我们称箭头所指方向叫做电流的“正方向”。当电流的实际方向和正方向一致时，电流就是正值；当电流的实际方向和正方向相反时，电流就是负值。在讨论交流电压和交流电动势时，情况也是一样。在交流电路中，用小写字母 i、u、e、p 等表示随时间变化的量，分别称为电流、电压、电动势和功率的瞬时值。

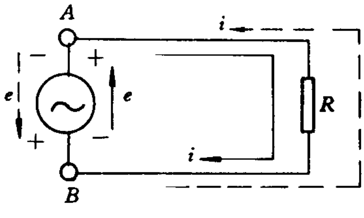

图 1—2

二、交流电的周期、频率和角频率

周期、频率和角频率是用来衡量交流电变化快慢的三种表示方式。

把交流电变化一周所需要的时间称为周期，用字母 T 表示，单位是秒。周期越短，表明交流电变化越快。

在单位时间内交流电重复变化的周期数叫做频率，用字母 f 表示，单位是赫[兹]，用符号 Hz 表示。频率越高，表明交流电变化越快。图 1—3 所示的交流电，在一秒钟内重复变化了 2 次，频率 $f=2$ Hz，每变化一次，所需时间就是 1/2 s，则周期 $T=1/2$ s。由此可见，周期和频率互为倒数关系，即：

$$T=\frac{1}{f} \qquad f=\frac{1}{T}$$

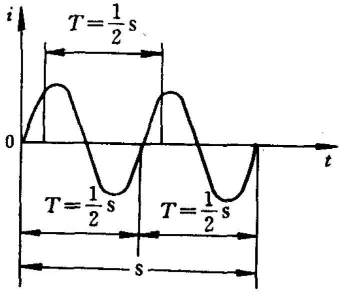

图 1—3

交流电变化一周，相当于电角度(ωt)变化了 2π 弧度。交流电的角频率 ω 就是单位时间内交流电变化的角度，单位是弧度/秒。因此，角频率 ω 和周期、频率的关系为 $\omega=2\pi/T=2\pi f$。在进行正弦量的分析和交流电路的计算时，经常要用到角频率 ω 这个电参数。我国电力网的交流电，其频率为 50 Hz，我们习惯上称为工业频率，简称“工频”。

三、相位和初相角

由前面我们知道，正弦交流电压的数学公式为：$u=U_m\sin(\omega t+\varphi)$。其中的$(\omega t+\varphi)$是一个角度，它是时间的函数。对应于确定的时间$t$，就有一个确定角度，说明在这段时间内交流电变化了多少角度，故$(\omega t+\varphi)$是表示正弦交流电变化进程的一个量，称为相位或相角。从图 1—1 所表示的交流电流波形图可见不同的相位就对应着不同的瞬时值。当$t=0$时的相角称初相角（也叫初相位）。简称初相。$(\omega t+\varphi)$中的φ就是初相。初相角和时间起点的选择有关。由于时间起点选择的不同，初相角也不同。如果在$t=0$时，正弦函数值为正值，相应的初相角也为正角；反之，函数值为负时，初相角也为负角。当时间起点选择在正弦波由负变正的这一点时，则初相角为零，此时$\varphi=0$。为了简便起见，一般常使初相角φ为零。当$\varphi=0$时，则有$i=I_m\sin\omega t$（或$u=U_m\sin\omega t$）。在电路计算中，一般把初相角φ为零的正弦交流电作为参考正弦量。

四、交流电的相位差

当研究两个以上同频率正弦交流电时，需要比较它们的大小和它们的相位关系，这就必须引入相位差的概念。后面，在电能表的接线向量分析中，经常会遇到研究同一个交流电的电压与电流之间的相位关系。相位差就是两个或两个以上同频率正弦交流电的相位之差，用字母φ表示。例如：已知一交流电的电压u和电流i的数学表达式分别为：

$$u=U_m\sin(\omega t+\varphi_u)$$

$$i=I_m\sin(\omega t+\varphi_i)$$

它们的角频率ω相同，但初相角不同，其相位差是：

$$\varphi=(\omega t+\varphi_u)-(\omega t+\varphi_i)=\varphi_u-\varphi_i$$

由上式可见，相位差就是两个同频率正弦交流电的初相角之差。

相位差实际上说明两交流电之间在时间上超前或滞后的关系。当其相位差 $\varphi=\varphi_u-\varphi_i=0$ 时，称两正弦交流电同相位（在此即为电压与电流同相位）；当 $180°>\varphi_u-\varphi_i>0$ 时（为正角），称电压 u 超前电流 i 一个 φ 角，或称电流 i 滞后电压 u 一个 φ 角，此时电压 u 比电流 i 先到达最大值和零值。即电压的变化要比电流变化早一个 φ 角。当电压达到最大值时，电流尚未达到最大值，而要经过 φ/ω 的时间以后，才能达到最大值。

当 $\varphi_u-\varphi_i=90°$时，这种相差 90°的相位关系称为“正交”；

当 $\varphi_u-\varphi_i=180°$时，两个正弦交流电的相位差为 180°，称它们为“反相”。

对于同频率的正弦交流电来说，其相位差是不变的。好比自行车车轮上每根幅条随着车轮一起转动，其角速度相同（亦可说是频率相同），幅条之间的夹角不会改变一样。

〔**例 1**〕 已知三个同频率正弦电压，角频率为 ω，设 $U_{m1}=200\ V$，$U_{m2}=100\ V$，$U_{m3}=50\ V$，其相位差是 $\varphi_1-\varphi_2=30°$，$\varphi_2-\varphi_3=60°$。以 u_2 为参考正弦量，写出三个电压的瞬时方程式。

解：

以 u_2 为参考正弦量，则

$$u_2 = 100\sin\omega t$$

u_1 超前 u_2 30°，则 $u_1=200\sin(\omega t+30°)$

u_3 滞后 u_2 60°，则 $u_3=50\sin(\omega t-60°)$

五、交流电的有效值

正弦交流电流、电压瞬时值虽然是不断地变化，但与直流电一样，它们通过电阻时都会发热。因此，在电工技术中引入了有效值的概念。交流电的有效值应和同样大小的直流电具

有相同的热效应和机械效应。

正弦交流电电流有效值，用字母 I 表示；电压有效值用字母 U 表示。字母 I 和 U 均不加下标，以便和最大值相区别。

下面以电流为例，根据电流通过某一电阻产生的热量求正弦交流电流最大值为 I_m 的交流电流有效值。由于交流电是周期性重复变化的，所以按有效值定义计算热量时，仅考虑一个周期。

设交变电流 i 通过电阻 R 在时间 dt 内所产生的热量为 $dQ_1=i^2\cdot R\cdot dt$，而在一个周期 T 内产生的总热量为：

$$Q_1=\int_0^T dQ_1=\int_0^T i^2\cdot R\cdot dt$$

在等于交流一周期(T)的时间内，直流通过同一电阻 R 所产生的热量为

$$Q_2=I^2\cdot R\cdot T$$

两者发热量相等，即 $Q_1=Q_2$

$$R\int_0^T i^2 dt=I^2RT$$

由此得出

$$I^2=\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt$$

方程两边开二次方便得交流电流有效值的表达式为：

$$I=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}$$

因为正弦交流电　$i=I_m\sin\omega t$

所以　$i^2=I_m^2\sin^2\omega t$

将 $i^2=I_m^2\sin^2\omega t$ 代入上式，则有效值为

$$I=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2\sin^2\omega t\cdot dt}$$

$$=\sqrt{\frac{I_m^2}{2T}\int_0^T 2\sin^2\omega t\cdot dt}$$

根据倍角三角函数公式 $\sin^2\omega t=\frac{1}{2}(1-\cos 2\omega t)$ 代入得：

$$I=I_m\sqrt{\frac{1}{2T}\int_0^T(1-\cos 2\omega t)\cdot dt}$$

$$=\frac{I_m}{\sqrt{2}}=0.707I_m$$

所以 $$I_m=\sqrt{2}I$$

交流电的有效值就是电流瞬时值的二次方在一周期内的平均值的二次方根。故有效值又称它为均方根值。同理，正弦交流电压、电动势的有效值为：

$$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}},\ E=\frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

第二节　三相交流电路及其向量关系

一、三 相 交 流 电

1. 三相交流电压及向量关系

三相交流电压和三相交流电流统称为三相交流电。三相交流电压是由三相发电机产生的。三相发电机有三个绕组，三相绕组按一定的方式连接成星形或三角形。实际上三相发电机每相的电动势只是一个近似的正弦电动势，因而三相电动势合起来并不绝对等于零，在三角形回路中可能出现环流。所以，发电机三相绕组很少接成三角形。三相绕组各在空间和时间上彼此相差 120°。因此可以供出三个具有相同频率和振幅、相位上互差 120°的交流电压。如以 A 相电压瞬时值为参考正弦量，其瞬时值表示式为：

$$u_{AN}=U_m\sin(\omega t+\varphi)$$
$$u_{BN}=U_m\sin(\omega t+\varphi-120°)$$
$$u_{CN}=U_m\sin(\omega t+\varphi+120°)$$

下面我们主要介绍发电机绕组连为星形的相电压与线电压的向量关系。一般三相发电机绕组大都按星形连接(如图1—4 所示)。其中三个绕组连在一起的一点叫三相电源的中点,从中点引出的导线称为中线。三个绕组的另一端引出三根导线分别为 A 线、B 线和 C 线,统称为端线,也称为 A 相、B 相和 C 相。由三根端线向外供出对称三相电源。

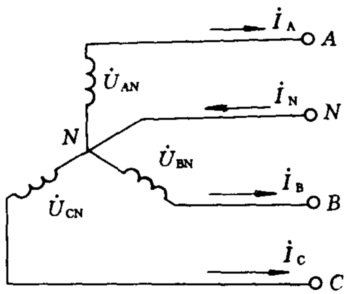

图 1—4

每根端线与中线之间的电压为相电压,用 U_{AN}、U_{BN}和U_{CN}分别表示 A、B 和 C 相的相电压,三相相电压用向量来表示时为:

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_{AN}&=Ue^{j\varphi}\\ \dot{U}_{BN}&=Ue^{j(\varphi-120°)}\\ \dot{U}_{CN}&=Ue^{j(\varphi+120°)}\end{aligned}\right\}\qquad(1\text{—}1)$$

三相电源中任意两根端线间的电压称为线电压。U_{AB}、U_{BC}和 U_{CA}分别表示 AB、BC 和 CA 间的线电压。根据图 1—4 中电压的标定方向,用回路电压定律可写出星形连接的三相

电源的线电压和相电压的关系式，即

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_{AB}&=\dot{U}_{AN}-\dot{U}_{BN}\\\dot{U}_{BC}&=\dot{U}_{BN}-\dot{U}_{CN}\\\dot{U}_{CA}&=\dot{U}_{CN}-\dot{U}_{AN}\end{aligned}\right\}\qquad(1—2)$$

将式(1—1)代入式(1—2)，可推导出星形连接的对称三相电源线电压和相电压之间的向量关系如下：

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB}&=\dot{U}_{AN}-\dot{U}_{BN}=\dot{U}_{AN}-\dot{U}_{AN}e^{\ j120^\circ}\\&=\dot{U}_{AN}(1-e^{-j120^\circ})\\&=\dot{U}_{AN}\left(1+\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\\&=\dot{U}_{AN}\left(\frac{3}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\\&=\sqrt{3}\dot{U}_{AN}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}+j\frac{1}{2}\right)\\&=\sqrt{3}\dot{U}_{AN}e^{j30^\circ}\end{aligned}\qquad(1—3a)$$

同理可以得到：

$$\dot{U}_{BC}=\sqrt{3}\dot{U}_{BN}e^{j30^\circ}\qquad(1—3b)$$

$$\dot{U}_{CA}=\sqrt{3}\dot{U}_{CN}e^{j30^\circ}\qquad(1—3c)$$

星形连接的三相电源也可以不接中线，即三相电源只接三根端线，这种电源就称为三相三线制交流电源。由三根端线供电的三相负载电路为三相三线制电路。在三相系统对称时，其三相相电压和线电压的向量关系如图 1—5 所示。

从向量图中可见三相相电压和线电压的相角关系是：线电压 $\dot{U}_{ab}$、$\dot{U}_{bc}$和 $\dot{U}_{ca}$分别超前相应的相电压 $\dot{U}_a$、$\dot{U}_b$ 和 $\dot{U}_c$30°；$\dot{U}_a$、$\dot{U}_b$ 和 $\dot{U}_c$ 彼此相差 120°，同样线电压 $\dot{U}_{ab}$、$\dot{U}_{bc}$和 $\dot{U}_{ca}$也是互

差 120°。$-\dot{U}_a$、$-\dot{U}_b$ 和 $-\dot{U}_c$ 亦彼此相差 120°，它们分别与 $\dot{U}_a$、$\dot{U}_b$ 和 $\dot{U}_c$ 互差 180°(即反相)。

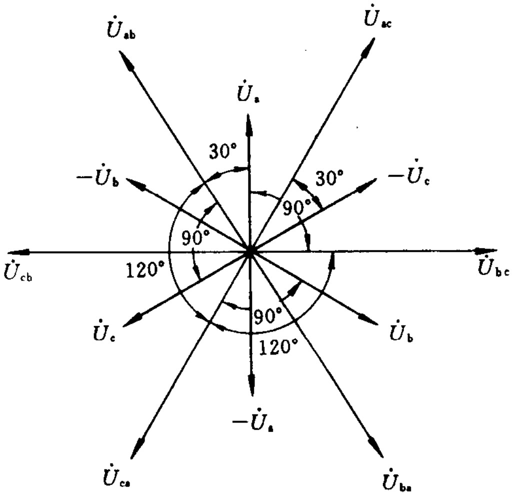

图 1—5

相电压的对称条件是：$U_a=U_b=U_c$，$\dot{U}_a$、$\dot{U}_b$ 和 $\dot{U}_c$ 相差 120°，线电压对称条件是三个线电压大小相等，各相间互差 120°(即 $U_{ab}=U_{bc}=U_{ca}$，$\dot{U}_{ab}$、$\dot{U}_{bc}$和 $\dot{U}_{ca}$相差 120°)。当相电压和线电压都对称时，则有如下关系：

$$U_{ab}=\sqrt{3}U_a=U_{ba}=\sqrt{3}(-U_a)=U_{bc}=\sqrt{3}U_b$$
$$=U_{cb}=\sqrt{3}(-U_b)=U_{ca}=\sqrt{3}U_c=U_{ac}$$
$$=\sqrt{3}(-U_c)$$

因为对称，故上面关系也可写为：

$$U_{ab}=U_{bc}=U_{ca}=U, U_a=U_b=U_c=U_x$$

$$U=\sqrt{3}U_x$$

上面说明星形连接的对称正弦三相电源的线电压的有效值是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。在三相三线制或三相四线制电路中，不论三个线电压是否对称，三个线电压的向量和均等于零，可用下式表示：

$$\dot{U}_{ab}+\dot{U}_{bc}+\dot{U}_{ca}=0$$

在三相四线制中，当三个相电压对称时，三个相电压的向量和等于零，即

$$\dot{U}_{a}+\dot{U}_{b}+\dot{U}_{c}=0$$

2. 三相交流电流的向量关系

在三相系统对称时，三相相电流与线电流的向量关系见图 1—6。在三相四线电路中，三相电流对称或中性线上没有电流，则 $\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=0$，若中性线有电流，则 $\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c\neq 0$。在三相三线电路中，不论三相电流是否对称，$\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=0$。

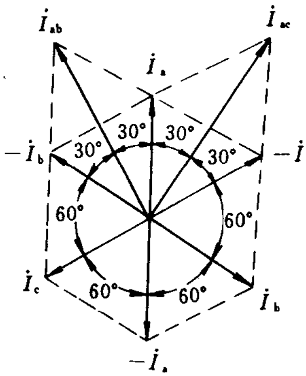

图 1—6

由向量图可知，三相三线电流有如下量值和相角关系：

量值关系：

$$\dot{I}_a+\dot{I}_c=-\dot{I}_b$$

$$\dot{I}_b=-\dot{I}_a-\dot{I}_c$$

$$\dot{I}_{ac}=\dot{I}_a-\dot{I}_c=\sqrt{3}\dot{I}_a=\sqrt{3}\dot{I}_c$$

$$\dot{I}_{ab}=\sqrt{3}\dot{I}_a=\sqrt{3}\dot{I}_b$$

$$\dot{I}_{bc}=\sqrt{3}\dot{I}_b=\sqrt{3}\dot{I}_c$$

相角关系：线电流 $\dot{I}_{ab}$、$\dot{I}_{bc}$和 $\dot{I}_{ca}$分别超前相应相电流 $\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$ 和 $\dot{I}_c$30°；$\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$ 和 $\dot{I}_c$ 互差 120°，同样线电流 $\dot{I}_{ab}$、$\dot{I}_{bc}$和 $\dot{I}_{ca}$彼此相差 120°；$\dot{I}_a$ 与$-\dot{I}_b$ 和$-\dot{I}_c$ 相差 60°，$\dot{I}_a$ 超前$-\dot{I}_c$60°，滞后$-\dot{I}_b$60°，同样，$\dot{I}_b$ 与$-\dot{I}_c$ 和$-\dot{I}_a$ 相差 60°，$\dot{I}_c$ 与$-\dot{I}_a$ 和$-\dot{I}_b$ 相差 60°。

二、三 相 负 载 电 路

三相电路的负载是由三部分组成，其中的每一部分叫做一相负载。各复数阻抗相等的三相负载叫做对称三相负载。这时各相负载平衡，负载性质相同，如三相电动机就是属于对称三相负载。

三相负载一般有星形和三角形两种连接方式，现分述如下。

1. 三相负载的星形连接

图 1—7 表示三相负载的星形连接，其中 N'点称为负载的中点。

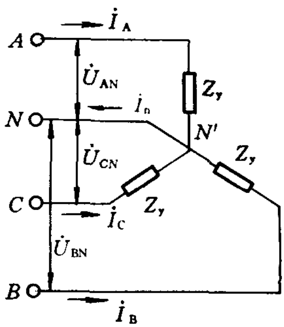

图 1—7

在对称三相电压作用下，每相负载承受电压为电源线电压的$\frac{1}{\sqrt{3}}$，流经对称三相负载的电流（相电流）分别为：

$$\dot{I}_{AN'} = \frac{\dot{U}_{AN}}{Z_y} \qquad (1—4a)$$

$$\dot{I}_{BN'} = \frac{\dot{U}_{BN}}{Z_y} = \dot{I}_{AN'}e^{-j120°} \qquad (1—4b)$$