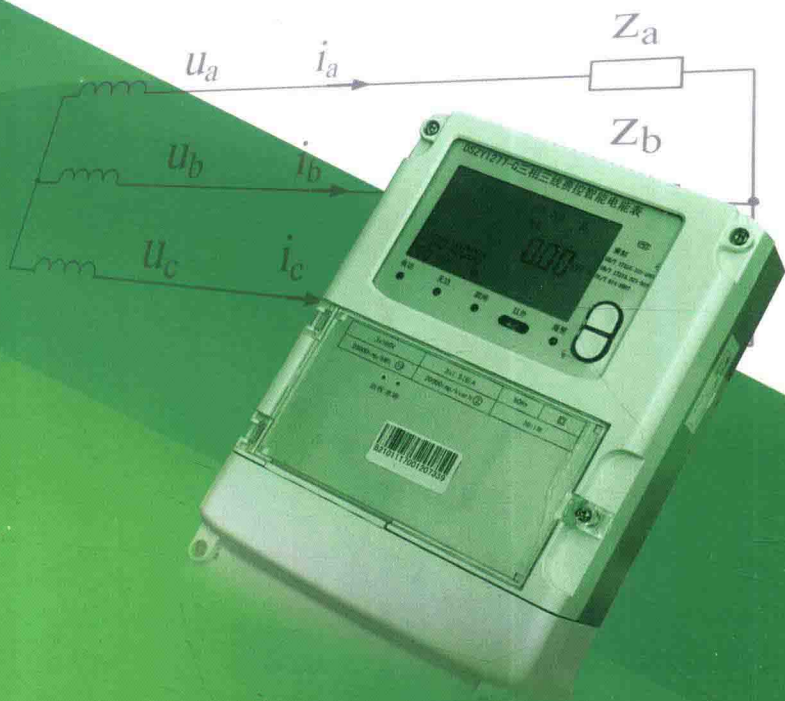


SANXIANG SANXIAN DIANNENG JILIANG ZHUANGZHI
CUOWU JIEXIAN JIEXI

三相三线电能计量装置 错误接线解析

常仕亮 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

三相三线电能计量装置 错误接线解析

常仕亮 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电能计量装置是电能计量的天平,其准确性与电能计量接线方式有着重要的关系。熟练、快速地甄别与修正三相三线电能计量装置错误接线在实际生产中有着极为重要的意义。本书紧密结合现场实际、全面系统、实用性强,对提高技术人员关于三相三线电能计量装置错误接线的认知具有重要意义。

本书共有六章,分别为电能计量接线方式、错误接线解析方法、定接地相法、定b相电压法、假定法以及定相电压法。

本书主要适用于直接从事电能计量、装表接电、用电信息采集、用电检查、业扩报装的技术人员和生产管理人员,也可供相关专业及管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

三相三线电能计量装置错误接线解析 / 常仕亮编. —北京:
中国电力出版社, 2016.11

ISBN 978-7-5123-9855-9

I. ①三… II. ①常… III. ①电能计量—接线错误—
分析 IV. ①TM933.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第238850号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年11月第一版 2016年11月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14.75印张 316千字

印数0001—2000册 定价75.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

电能计量装置是电能的计量器具，为计收电量提供依据，其准确性将直接影响供电企业和用电客户的经济利益。电能计量装置的准确性，不仅与电能表相对误差、电压互感器和电流互感器的合成误差、电压互感器二次回路压降误差有关，而且还与电能计量接线方式有着极其重要的关系。电能计量装置错误接线有成千上万种，这常常造成巨大的电量差错，严重影响计量的公平性与公正性。因此，掌握各种电能计量装置错误接线的解析方法，具有特别重大的意义。

本书第一章着重介绍了电能计量装置计量方式、接线方式等方面知识。第二章介绍了错误接线的基本解析方法。第三章至第六章，结合大量现场案例和各种负荷潮流状态，详细阐述了定接地相法、定 b 相电压法、假定法、定相电压法用于三相三线电能计量装置错误接线的解析过程。

本书的编写过程中，得到了国网重庆市电力公司、国网重庆市电力公司电力科学研究院、国网重庆市电力公司万州供电分公司、国网重庆市电力公司技能培训中心、国网重庆市电力公司检修分公司等单位领导和同事的指导与帮助，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者予以指正。

常仕亮

目 录

前言

第一章 电能计量接线方式	1
第一节 交流电路电能计量接线方式	1
第二节 中性点绝缘系统电能计量接线方式	2
第三节 中性点直接接地系统电能计量接线方式	7
第四节 经消弧线圈接地系统电能计量接线方式	12
第五节 二分之三断路器接线电能计量方式	14
第六节 无功电能计量方式	18
第二章 错误接线解析方法	22
第一节 电能表运行象限的判断	22
第二节 错误接线解析方法	25
第三节 三相电能表现场校验仪简介	28
第四节 差错电量退补	29
第三章 定接地相法	32
第一节 分析判断方法简析	32
第二节 错误接线实例解析	33
第四章 定 b 相电压法	52
第一节 分析判断方法简析	52
第二节 错误接线实例解析	54
第五章 假定法	115
第一节 分析判断方法简析	115
第二节 错误接线实例解析	120
第六章 定相电压法	173
第一节 分析判断方法简析	173
第二节 错误接线实例解析	175
参考文献	230

第一节 交流电路电能计量接线方式

一、单相电路电能计量接线方式

单相交流电路接线如图 1-1 所示。

负载功率 $p_0 = ui$ ，单相电能表测量功率 $p' = ui$ ，接线附加计量误差如下

$$r = \frac{p' - p_0}{p_0} \times 100\% = \frac{ui - ui}{ui} \times 100\% = 0.00\% \quad (1-1)$$

单相交流电路接入单相电能表，无接线附加计量误差。

二、三相电路电能计量接线方式

(一) 三相三线电路

三相三线交流电路等效图如图 1-2 所示。



图 1-1 单相交流电路接线图

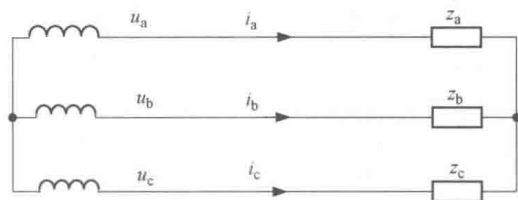


图 1-2 三相三线交流电路等效图

三相三线电路接线，按照“三相电压正相序，两相电流接入对应相”原则，电压回路并接于三相电路，电流回路串接于电路，电能表按照以下三种接线方式均可正确测量和计量。对于高压供电线路，电压互感器并接于一次回路，电流互感器串接于一次回路，获取二次电压和二次电流接入三相三线电能表。

负载功率 p_0 如下

$$p_0 = p_a + p_b + p_c = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1-2)$$

对于三相三线电路，有

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (1-3)$$

1. 第一种接线方式

三相三线电能表第一元件电压接入 u_{ab} ，电流接入对应相 i_a （和第一相电压对应）；第二元件电压接入 u_{cb} ，电流接入对应相 i_c （和第三相电压对应），则测量功率 p' 为

$$p' = u_a i_a + u_b (-i_a - i_c) + u_c i_c = u_{ab} i_a + u_{cb} i_c \quad (1-4)$$

2. 第二种接线方式

三相三线电能表第一元件电压接入 u_{ca} ，电流接入 i_c （和第一相电压对应）；第二元件电压接入 u_{ba} ，电流接入 i_b （和第三相电压对应），则测量功率 p' 为

$$p' = u_a(-i_b - i_c) + u_b i_b + u_c i_c = u_{ca} i_c + u_{ba} i_b \quad (1-5)$$

3. 第三种接线方式

三相三线电能表第一元件电压接入 u_{bc} ，电流接入 i_b （和第一相电压对应）；第二元件电压接入 u_{ac} ，电流接入 i_a （和第三相电压对应），则测量功率 p' 为

$$p' = u_a i_a + u_b i_b + u_c(-i_a - i_b) = u_{bc} i_b + u_{ac} i_a \quad (1-6)$$

理论上，上述三种接线方式均可正确测量和计量，为了规范和强化电能计量装置管理，三相三线电能计量应采用第一种接线方式。

(二) 三相四线电路

三相四线交流电路等效图如图 1-3 所示。

三相四线电路接线，按照“电压和电流正相序、电压和电流同相”原则，三相四线电能表电压回路并接于三相电路，电流回路串接于三相电路，电能表采用以下三种接线方式均可正确测量和计量。对于高压供电电路，电压互感器并接于一次回路，电流互感器串接于一次回路，获取二次电压和二次电流接入三相四线电能表。

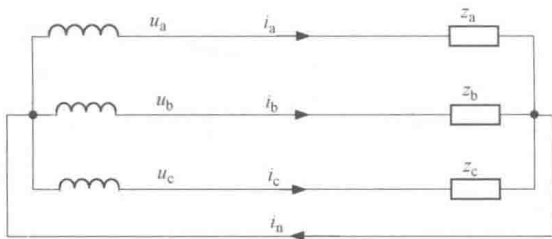


图 1-3 三相四线电路等效图

理论上，上述三种接线方式均可正确测量和计量，为了规范和强化电能计量装置管理，三相四线电能计量装置应采用第一种接线方式。

1. 第一种接线方式

第一元件电压接入 u_a ，电流接入 i_a ；第二元件电压接入 u_b ，电流接入 i_b ；第三元件电压接入 u_c ，电流接入 i_c ，则测量功率 p' 为 $p' = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c$ 。

2. 第二种接线方式

第一元件电压接入 u_b ，电流接入 i_b ；第二元件电压接入 u_c ，电流接入 i_c ；第三元件电压接入 u_a ，电流接入 i_a ，则测量功率 p' 为 $p' = u_b i_b + u_c i_c + u_a i_a$ 。

3. 第三种接线方式

第一元件电压接入 u_c ，电流接入 i_c ；第二元件电压接入 u_a ，电流接入 i_a ；第三元件电压接入 u_b ，电流接入 i_b ，则测量功率 p' 为 $p' = u_c i_c + u_a i_a + u_b i_b$ 。

理论上，上述三种接线方式均可正确测量和计量，为了规范和强化电能计量装置管理，三相四线电能计量装置应采用第一种接线方式。

第二节 中性点绝缘系统电能计量接线方式

无论负载对称与否，中性点绝缘系统采用三相三线或三相四线电能计量接线方式均无接线附加计量误差。但采用三相四线接线方式会因电压不平衡带来较大的其他附加误差，也会因系统单相接地、并联谐振等因素影响电能计量装置的安全稳定运行。而三相

三相接线方式则不受上述因素的影响，因此中性点绝缘系统应采用三相三线接线方式，不应采用三相四线接线方式。

一、绝缘系统接线方式

中性点绝缘系统指变压器中性点不接地，在我国 6kV 与 10kV 等供电系统运用极为广泛。由于负载侧无接地点，从电路性质上而言属于三相三线电路，其等效电路图如图 1-4 所示。

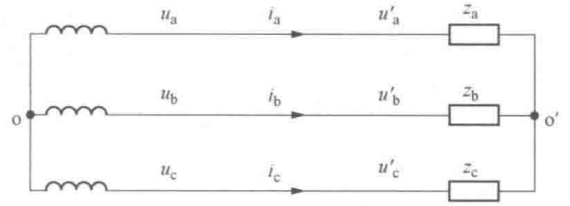


图 1-4 中性点绝缘系统等效电路图

(一) 采用三相三线接线计量

电能表测量功率 $p' = u_{ab}i_a + u_{cb}i_c$ ，由于计量电压为线电压，电压互感器采用 V/V-12 接线（本书若无特殊说明，三相三线电能表电压互感器均按照 V/V-12 接线）。

1. 对称负载分析

对称负载状态下

$$\left. \begin{aligned} u_{oo'} &= 0 \\ u_a &= u'_a \\ u_b &= u'_b \\ u_c &= u'_c \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

$$i_b = -(i_a + i_c) \quad (1-8)$$

负载功率

$$p_0 = u'_a i_a + u'_b i_b + u'_c i_c = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1-9)$$

接线附加计量误差

$$\begin{aligned} r &= \frac{p' - p_0}{p_0} \times 100\% \\ &= \frac{(u_{ab}i_a + u_{cb}i_c) - (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c)}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned} \quad (1-10)$$

从以上分析可知，负载对称时，三相三线接线方式无接线附加计量误差。

2. 不对称负载分析

当负载不对称时，负载中性点与变压器中性点之间产生位移电压，从 o 点位移至 o' 点，位移电压 $u_{oo'} \neq 0$ ，各相负载电压和电源电压不一致， $u'_a \neq u_a$ ， $u'_b \neq u_b$ ， $u'_c \neq u_c$ ，但电流关系依然为 $i_a + i_b + i_c = 0$ ，位移后的相量图如图 1-5 所示。

$$\left. \begin{aligned} u_a &= u'_a + u_{oo'} \\ u_b &= u'_b + u_{oo'} \\ u_c &= u'_c + u_{oo'} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

则

$$\left. \begin{aligned} u'_a &= u_a - u_{oo'} \\ u'_b &= u_b - u_{oo'} \\ u'_c &= u_c - u_{oo'} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

$$p_0 = u'_a i'_a + u'_b i'_b + u'_c i'_c = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1-13)$$

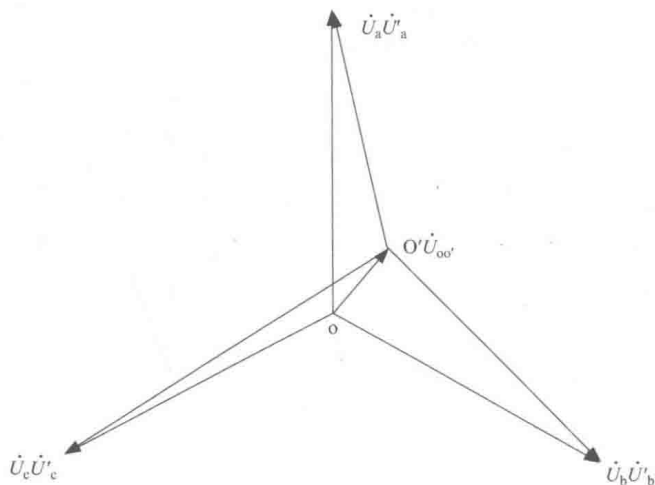


图 1-5 不对称负载位移相量图

接线附加计量误差

$$\begin{aligned} r &= \frac{p' - p_0}{p_0} \times 100\% \\ &= \frac{(u_{ab} i_a + u_{cb} i_c) - (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c)}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned} \quad (1-14)$$

从以上分析可知，负载不对称状态下，测量功率和负载功率保持一致，无接线附加计量误差。

(二) 采用三相四线接线计量

三相四线接线测量功率 $p' = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c$ ，计量电压采用相电压，电压互感器采用 Y_n/Y_n-12 接线方式。

1. 对称负载分析

对称负载状态下

$$\left. \begin{aligned} u_{oo'} &= 0 \\ u_a &= u'_a \\ u_b &= u'_b \\ u_c &= u'_c \\ i_a + i_b + i_c &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

负载功率

$$P_0 = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1-16)$$

接线附加计量误差

$$\begin{aligned} r &= \frac{P' - P_0}{P_0} \times 100\% \\ &= \frac{(u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c) - (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c)}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned} \quad (1-17)$$

由以上分析可知，对称负载时采用三相四线计量，无接线附加计量误差。

2. 不对称负载分析

(1) 接线附加计量误差。当负载不对称时，负载中性点与变压器中性点之间产生位移电压，位移电压 $u_{oo'} \neq 0$ ，各相负载电压和电源电压不一致。

此时， $u'_a \neq u_a$ ， $u'_b \neq u_b$ ， $u'_c \neq u_c$ ，电流关系依然为 $i_a + i_b + i_c = 0$ 。

由于三相电压互感器采用 Y_n/Y_n-12 接线方式，三只电压互感器特性不一致，以及电能表电压线圈阻抗不平衡，导致电能表电压线圈上的电压发生位移，分别变化为 u''_a 、 u''_b 、 u''_c ，位移电压 $u_{oo''} \neq 0$ ，位移后的相量图如图 1-6 所示。

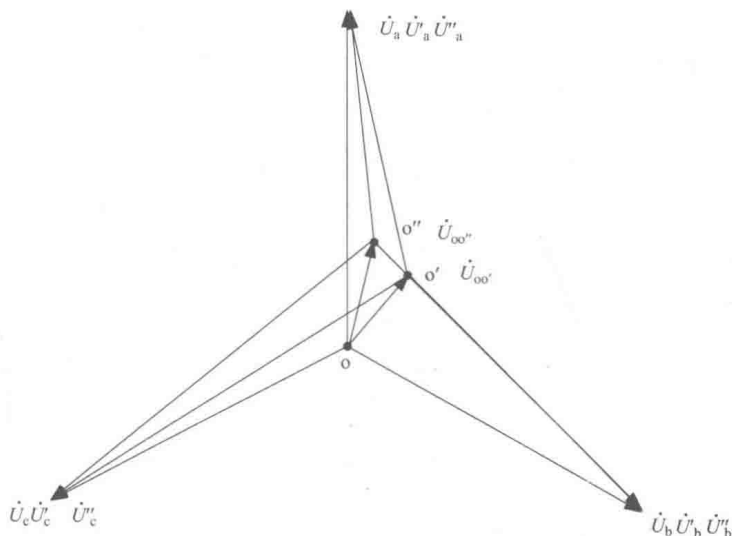


图 1-6 两次位移相量图

$$\begin{aligned} P_0 &= u'_a i_a + u'_b i_b + u'_c i_c \\ &= (u_a - u_{oo'}) i_a + (u_b - u_{oo'}) i_b + (u_c - u_{oo'}) i_c \\ &= u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \end{aligned} \quad (1-18)$$

测量功率

$$P' = u''_a i_a + u''_b i_b + u''_c i_c \quad (1-19)$$

$$\left. \begin{aligned} u_a &= u_a'' + u_{00''} \\ u_b &= u_b'' + u_{00''} \\ u_c &= u_c'' + u_{00''} \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

$$\left. \begin{aligned} u_a'' &= u_a - u_{00''} \\ u_b'' &= u_b - u_{00''} \\ u_c'' &= u_c - u_{00''} \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

$$\begin{aligned} p' &= (u_a - u_{00''})i_a + (u_b - u_{00''})i_b + (u_c - u_{00''})i_c \\ &= u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \end{aligned} \quad (1-22)$$

接线附加计量误差

$$\begin{aligned} r &= \frac{p' - p_0}{p_0} \times 100\% \\ &= \frac{(u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c) - (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c)}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned} \quad (1-23)$$

从以上分析可知，不对称负载时采用三相四线接线方式无接线附加计量误差。

(2) 采用三相四线接线方式的不利影响。无论负载对称与否，中性点绝缘系统采用三相四线接线方式均无接线附加计量误差，但是负载不对称造成的三相电压不平衡、系统单相接地、并联谐振等将严重影响电能计量装置的准确性和安全性。

1) 三相电压不平衡带来较大的附加误差。

a. 对机械电能表的影响。对于机械电能表而言，三相电压的严重不平衡会引起电压抑制力矩、电压回路磁通、轻载补偿力矩非线性的变化，电压抑制力矩与电压的三次方成正比，轻载补偿力矩与电压的平方成正比，以上三种因素在电压变化下引起的综合附加误差 λ_u ，如图 1-7 所示。

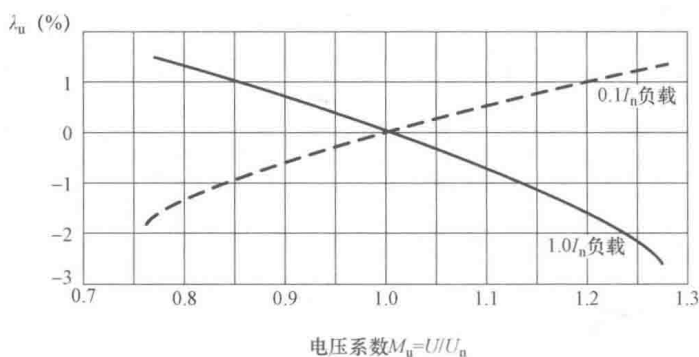


图 1-7 机械电能表电压特性图

从图 1-7 可知，电能表带额定负载 $1.0I_n$ 时，当电压大于 U_n 时，附加误差为负，小于 U_n 时，附加误差为正。电能表带轻载 $0.1I_n$ 时，当电压大于 U_n 时，附加误差为正，小

于 U_n 时,附加误差为负。

b. 对全电子多功能电能表的影响。三相电压不平衡对全电子多功能电能表乘法器会产生附加误差影响。模拟乘法器采用运算放大器和大规模集成电路,三相电压的变化有较大非线性,会引起较大的附加误差;数字乘法器主要由A/D转换器引起误差,电压的变化引起的误差可忽略不计。三相电压不平衡对全电子多功能电能表电压采样器会产生附加误差影响。对于电阻分压采样的全电子多功能电能表,三相电压的不平衡引起的误差可忽略不计;对于电压互感器采样的全电子多功能表,三相电压的不平衡会因为铁芯的非线性带来较大的附加误差。三相三线接线方式采用线电压,因此无论机械电能表或全电子多功能电能表,都不会因为相电压严重不平衡带来附加误差。

2) 系统单相接地造成安全隐患。中性点绝缘系统发生单相接地时,接地相相电压降为零,其他两相相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍,大大超过了电能表电压线圈的额定电压,带来极大的安全隐患,甚至可能烧坏电能表电压线圈,造成不计量的严重后果。如当A相单相接地时,接地相 $u_a''=0$,电能表其他两相电压线圈烧坏后 $u_b''=0$, $u_c''=0$,电能表测量功率 $p'=0$,此时电能表会不计量,严重影响计量准确性。

由于单相接地时线电压依然对称,三相三线接线方式不会因为相电压严重不平衡带来安全隐患,也不会造成电能表不计量。

3) 易发生谐振过电压。三相四线接线计量用电压互感器采用 Y_0/Y_0 接线,电缆出线和架空线路三相对地存在分布电容,电压互感器的铁心线圈相当于与电容器并联。正常运行时电压互感器的励磁阻抗很大,三相基本平衡,不会引发谐振。当发生单相接地时,非接地相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍,有可能使电压互感器的铁心出现饱和或接近饱和,电压互感器感抗变小,当减小到感抗和线路对地容抗相等时,会产生谐振过电压,可能烧坏电压互感器等电气设备,严重影响系统的安全稳定运行。三相三线接线计量采用线电压,电压互感器采用V/V接线,中性点不接地,不满足并联谐振条件,因此不会产生并联谐振。

综上所述,中性点绝缘系统采用三相四线接线方式无接线附加计量误差,但三相电压不平衡、系统单相接地、并联谐振等因素,会影响计量准确性,严重影响电能计量装置的安全稳定运行。而采用三相三线接线方式,既无接线附加计量误差,也不会因为电压不平衡、单相接地、并联谐振等因素影响准确性和安全性,因此中性点绝缘系统应采用三相三线接线方式。

第三节 中性点直接接地系统电能计量接线方式

一、中性点直接接地系统的定义

中性点直接接地系统是指变压器中性点直接接地,负载侧也直接接地或接零,负载侧中性线和电源侧中性点构成通路,目前我国220V、110kV、220kV、330kV、500kV、750kV和1000kV等电压等级主要采用中性点直接接地系统。从电路性质上而言,中性

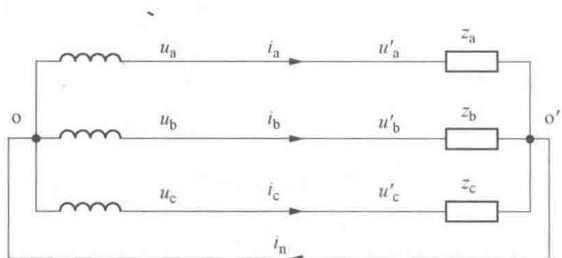


图 1-8 中性点直接接地系统等效电路

(一) 三相四线接线

对于中性点直接接地系统，无论负载是否对称，电源侧电压和负载侧电压始终不会发生位移，相关电压如下

$$\left. \begin{aligned} u_{oo'} &= 0 \\ u_a &= u'_a \\ u_b &= u'_b \\ u_c &= u'_c \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

负载功率

$$p_0 = u'_a i_a + u'_b i_b + u'_c i_c = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1-25)$$

接线附加计量误差

$$\begin{aligned} r &= \frac{p' - p_0}{p_0} \times 100\% \\ &= \frac{(u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c) - (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c)}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned} \quad (1-26)$$

从以上分析可知，中性点直接接地系统采用三相四线计量方式，无接线附加计量误差。通常情况下，中性点直接接地系统采用三相四线接线方式不会有接线附加计量误差，但在电能表零线断线、假性三相四线接线方式两种情况下，会产生较大的附加计量误差。

1. 电能表零线断线

通常情况下，电能表零线接入电压互感器二次侧中性线或者接入 10kV 配电或专用变压器 0.4kV 侧的零线，当电能表零线断线情况下，会产生附加计量误差。为了简化分析，以 0.4kV 侧低压三相四线系统为例进行分析。

(1) 等效电路图。电能表接线图等效电路如图 1-9 所示。

(2) 附加计量误差分析。电路本身为三相四线电路，由于电能表电压线圈零线未接，会造成电能表电压线圈测量电压从 o 点位移至 o'，位移后的

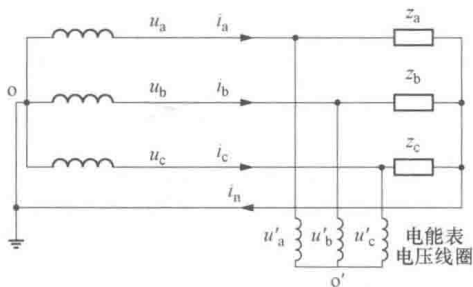


图 1-9 电能表接线图等效电路

电压为 u'_a 、 u'_b 、 u'_c 。

负载功率

$$p_0 = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1-27)$$

测量功率

$$p' = u'_a i_a + u'_b i_b + u'_c i_c \quad (1-28)$$

接线附加计量误差

$$\begin{aligned} r &= \frac{p' - p_0}{p_0} \times 100\% \\ &= \frac{(u'_a i_a + u'_b i_b + u'_c i_c) - (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c)}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} \times 100\% \\ &= \frac{-u_{00}' i_n}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} (\%) \end{aligned} \quad (1-29)$$

用有效值表示为

$$r = \frac{-U_{00}' I_n \cos(\hat{U}_{00}', \hat{I}_n)}{U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c} \times 100\% \quad (1-30)$$

从以上分析可知，如果三相四线电能表电压线圈未接零线，负载不对称将产生附加计量误差，误差的大小和 U_{00}' 、 I_n ，以及二者之间的夹角有关。

(3) 实例分析。某上网水电站，在发电机出口 0.4kV 侧采用三相四线接线方式，在一次电能表现场检验过程中，发现 0.5S 级的三相三元件全电子多功能电能表自投入运行以来，中性线一直未接零，现场测试参数数据如下。

测得零序电压 U_{00}' 为 7.62V，零相电流回路的电流 I_n 为 0.18A， U_{00}' 和 I_n 之间的夹角为 8.3°，0.05s 级的电能表现场校验仪测得的二次回路总功率为 362.68W（将零线接入了现场校验仪）。

此时电能表附加误差

$$\begin{aligned} r &= \frac{-U_{00}' I_n \cos(\hat{U}_{00}', \hat{I}_n)}{U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c} \times 100\% \\ &= \frac{-7.62\text{V} \times 0.18\text{A} \times \cos 8.3^\circ}{362.68\text{W}} \times 100\% \\ &= -0.37\% \end{aligned} \quad (1-31)$$

由上分析可知，由于电能表的电压线圈中性线未接零，产生的附加误差达到了 -0.37%。

2. 假性三相四线接线方式

在中性点直接接地系统中，少数电能计量装置采用三相三线接线方式，B 相电流互感器二次回路在开关场端子箱处就地短接，仅将 A、C 两相电流互感器二次接线安装至电能表屏处。三相三线接线方式属于不合理电能计量方式，现场运行中一些电能计量人

员将电流互感器 A、C 相二次电流合成之后，再反接入三相四线电能表的 b 相电流线圈，通过 $i_b = -(i_a + i_c)$ 这种关系接入电能表达到三相四线接线方式的目的，接线图如图 1-10 所示。此种接线方式依然属于不合理的计量方式，负载不对称时会有较大的接线附加计量误差。

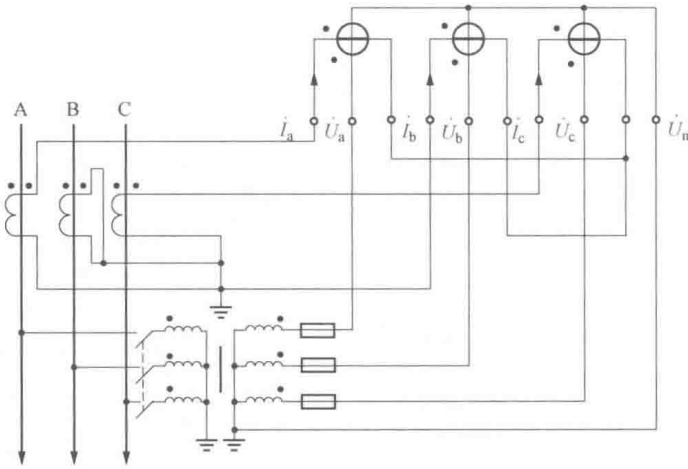


图 1-10 假性三相四线接线方式

电能表测量功率

$$p' = u_a i_a + u_b (-i_a - i_c) + u_c i_c = u_a i_a + u_b (i_b - i_n) + u_c i_c \quad (1-32)$$

电能表附加误差

$$\begin{aligned} r &= \frac{p' - p_0}{p_0} \times 100\% \\ &= \frac{[u_a i_a + u_b (i_b - i_n) + u_c i_c] - (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c)}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} \times 100\% \\ &= \frac{-u_b i_n}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-33)$$

从以上分析可知，采用假性三相四线接线方式，当负载不对称时， $i_n \neq 0$ ，存在较大的接线附加计量误差。运行过程中负载不可能完全对称，变压器中性线始终有电流流过，因此采用假性三相四线接线方式，电能表存在较大的接线附加计量误差，属于不合理的电能计量方式，应杜绝采用。

(二) 三相三线接线

1. 附加计量误差

此时电流为

$$i_b = i_n - (i_a + i_c) \quad (1-34)$$

负载功率

$$p_0 = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1-35)$$

附加计量误差

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{P' - P_0}{P_0} \times 100\% \\
 &= \frac{(u_{ab}i_a + u_{cb}i_c) - (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c)}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} \times 100\% \\
 &= \frac{-u_b i_n}{u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c} \times 100\%
 \end{aligned} \tag{1-36}$$

用有效值表示如下

$$r = \frac{-U_b I_n \cos(\hat{U}_b, \hat{I}_n)}{U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c} \times 100\% \tag{1-37}$$

由此可见，中性点直接接地系统采用三相三线接线方式，会产生接线附加计量误差，附加计量误差的大小与电压 \hat{U}_b 、 \hat{I}_n 以及二者之间的夹角有关。

2. 实例分析

某变电站的 110kV 专用供电线路用电客户，由于设计不合理，采用三相三线接线计量，纳入电能计量装置改造。为了分析不合理计量方式的接线附加计量误差，在改造前进行了现场测试。

该专线用电客户计量电压互感器采用 Y_n/Y_n-12 接线，准确度等级为 0.2 级，计量用电流互感器准确度等级为 0.2S 级，电能表准确度等级为 0.2S 级，测试的参数数据如下： $U_a = 59.4V$ ， $U_b = 58.2V$ ， $U_c = 59.6V$ ， $\varphi_a = 26.2^\circ$ ， $\varphi_b = 24.5^\circ$ ， $\varphi_c = 23.7^\circ$ ， $I_a = 0.76A$ ， $I_b = 0.71A$ ， $I_c = 0.72A$ ， $I_n = 0.046A$ ，测得 \hat{U}_b 和 \hat{I}_n 之间的夹角为 138.64° 。

从以上测试的参数数据可知，负载非常不对称。

计算二次总功率 P_2

$$\begin{aligned}
 P_2 &= U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c \\
 &= 59.4 \times 0.76 \times \cos 26.2^\circ + 58.2 \times 0.71 \times \cos 24.5^\circ + 59.6 \times 0.72 \times \cos 23.7^\circ \\
 &= 117.4(W)
 \end{aligned} \tag{1-38}$$

此时，电能计量装置电流电压相量图如图 1-11 所示。

接线附加计量误差

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{-U_b I_n \cos(\hat{U}_b, \hat{I}_n)}{P_2} \times 100\% \\
 &= \frac{-58.2V \times 0.046A \times \cos 138.64^\circ}{117.4W} \times 100\% \\
 &= 1.71\%
 \end{aligned} \tag{1-39}$$

通过上述分析和相量图可知，接线附加计量误差可能为正，也可能为负，其正负与 \hat{U}_b 、 \hat{I}_n 的夹角有关。

综上所述，三相四线电路采用三相三线计量，如果负载不对称，会产生接线附加计量误差，误差

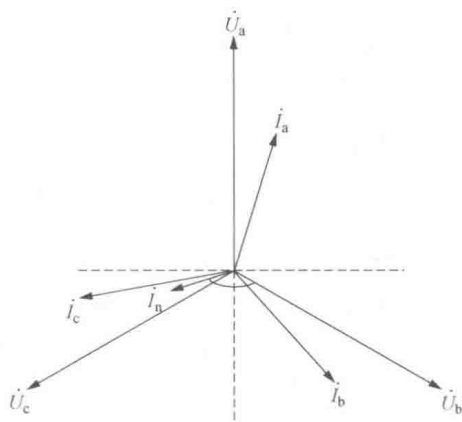


图 1-11 电能计量装置电流电压相量图

的大小、正负与三相电压的大小、负载的不对称情况、负载功率因数有关。因此，为提高计量正确性，中性点直接接地系统应采用三相四线接线方式，不应采用三相三线接线方式。

第四节 经消弧线圈接地系统电能计量接线方式

经消弧线圈接地系统是指变压器中性点经消弧线圈接地，在我国 35kV 及 66kV 等供电系统运用较为广泛。从电路性质上来讲，中性点经消弧线圈接地系统属于三相四线电路。该系统运行中，中性点容易产生不平衡电流，如果采用三相三线接线方式，将产生较大的接线附加计量误差，采用三相四线接线方式则没有线路附加误差。

一、经消弧线圈接地系统接线图

经消弧线圈接地系统的等效电路图如图 1-12 所示。

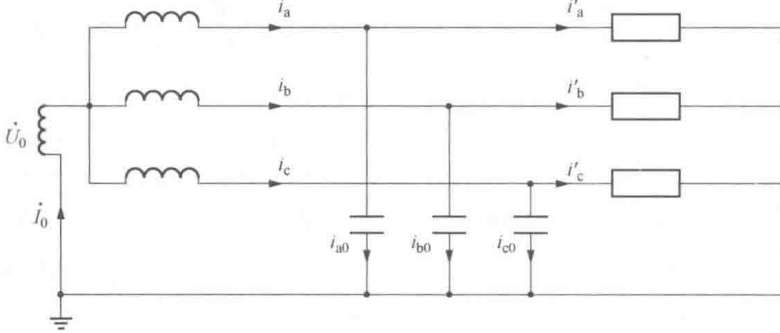


图 1-12 经消弧线圈接地系统的等效电路图

从图 1-12 可知，由于三相对地电容大小不一致，导致三相对地电容电流 i_{a0} 、 i_{b0} 、 i_{c0} 大小不一致，因此变压器中性点将产生不平衡电流 i_0 ， i_0 从消弧线圈中流过，并在消弧线圈产生压降 U_0 。

二、三相三线接线

电流表达式为

$$i_a + i_b + i_c = i'_a + i_{a0} + i'_b + i_{b0} + i'_c + i_{c0} \quad (1-40)$$

由于

$$\left. \begin{aligned} i'_a + i'_b + i'_c &= 0 \\ i_{a0} + i_{b0} + i_{c0} &= i_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-41)$$

因此

$$\begin{aligned} i_a + i_b + i_c &= i_0, \text{ 故} \\ P_0 &= u_a i_a + u_b (i_0 - i_a - i_c) + u_c i_c \end{aligned} \quad (1-42)$$

附加计量误差