

单相电能表相线、中性线接反状态估计与分析

李万¹, 李景村²

(1. 河南理工大学, 河南 焦作 454000; 2. 广东电网汕尾供电局, 广东 汕尾 516600)

摘要: 单相电能表相线、中性线接反可能构成典型桥式电路。从电能表接入处的支路电路入手, 通过等效和化简, 进而由简单到复杂, 从局部到整个低压系统, 全面分析了等效桥式电路工况和三相不对称运行、多点接地或漏电对计量状态的影响; 并用二元函数描述了电能表测量功率与负荷的关系, 使计量状态的估计与分析更加清晰明了, 对用电管理人员有一定实用价值, 对电能表生产厂家也有一定参考作用。

关键词: 电能表接反; 桥式电路; 负荷状态; 计量结果

中图分类号: TM933.4

State Estimate and Analysis on Reverse Connection of Live and Neutral Lines of Single-phase Electric Energy Meters

LI Wan¹, LI Jingcun²

(1. Henan Polytechnic University, Henan Jiaozuo 454000, China; 2. Shanwei Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid, Guangdong Shanwei 516600, China)

Abstract: The reverse connection of the live and neutral lines of a single-phase electric energy meter may constitute a typical bridge circuit. This paper started with the branch circuit at the access point of the electric energy meter, through equivalence and simplification, and then from simple to complex, from local to the whole low-voltage system, comprehensively analyzed the influence on the metering state of equivalent bridge circuit operating conditions, three-phase asymmetric operation and multi-point grounding or leakage; And the relationship between the measured power and the load of the electric energy meter is described with a binary function, which makes the estimate and analysis of metering state clearer and has a certain practical value for the electricity management personnel. It also has certain reference for electric energy meter manufacturers.

Keywords: reverse connection of electric energy meter; bridge circuit; loadstate; measurementresult

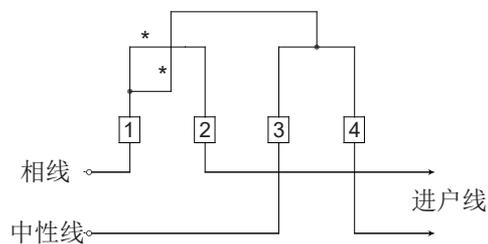
早期电力部门的巡检过程中有时会发现单相电能表时而正转, 时而反转, 在排除电能表质量问题后可将问题归于电能表相线与中性线反接, 同时表后中性线接地或漏电^[1]。但这种反转现象只会出现于较为老式的无逆止机构机械式电能表。而从20世纪初开始普及电子式电能表到2009年开始使用智能电表, 并逐步由功能更加完善的智能电表取而代之, 因此相线、中性线接反对计量状态的影响也须重新探讨。

1 普通单相电能表正确接线时的计量

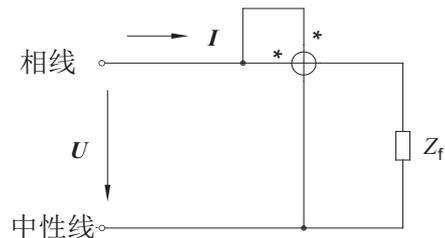
普通单相电能表正确接线如图1所示。

这种电能表只有一个电流测量元件和一个电压测量元件, 它的有功功率表达式 $P = UI\cos\varphi$, 计量电度为有功功率对于时间的积分。即使表后有漏电

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-08-23



(a) 接线图



(b) 原理图

图1 普通单相电能表接线图和原理图

或接地，由于电能表的电流线圈串接在进线的相线端，漏电流和接地电流全部流过电能表的电流线圈，与正常的负荷电流路径相同，电能表能正确记录电量，不存在漏计现象。

2 普通单相电能表相线、中性线接反时的计量

2.1 表后没有漏电与接地

电能表接线如图2所示。

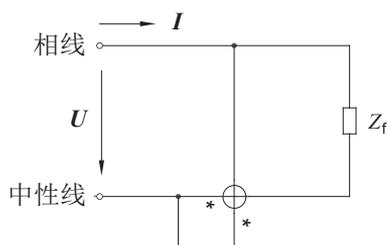


图2 表后没有漏电与接地示意图

这时电能表的功率表达式与正确接线时相同，所以仍能正常计量。

2.2 表后相线对地漏电

接线如图3所示。由于漏电流没有流过电能表的电流线圈，这部分漏电功率就计量不到。通常情况下变压器低压侧中性点直接接地，当相线对地电阻R很小或直接对地短路时就可能会形成远大于正常负荷电流的对地电流，电源开关将自动跳闸。

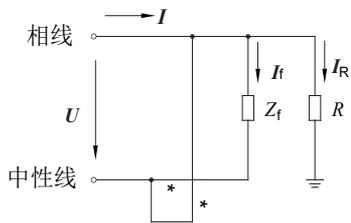


图3 表后相线对地漏电示意图

2.3 表后中性线接地

一个单相电能表接入电路，就和整台变压器供电的低压系统全部元件及网络结构互相关联，分析的思路就不能局限于一个电能表，而应该扩展到整个低压系统。为了分析方便，可按照由简到繁，由近及远，由局部到全部的原则，先抓主要因素，后考虑次要因素。

2.3.1 简化等效电路的分析

先做如下假设：（1）三相对称，中线无电流；

（2）其他用户没有漏电与接地，低压系统内无重复接地；（3）电能表接入的支线二端网络等效电源无穷大，即等效电源内阻抗为零。

现从支线电路入手，对于分散装表的单相用户，单相电能表接入处的支线等效电路如图4所示。

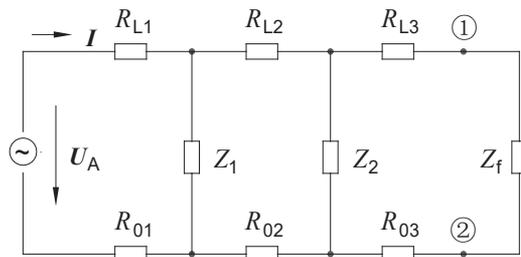


图4 单相电能表接入处的支线等效电路图

图4中， U_A 为支线二端口等效电源， R_{L1} 、 R_{L2} 、 R_{L3} 为相线各段电阻， R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} 为中性线各段电阻， Z_1 、 Z_2 为相邻负载阻抗， Z_f 为本用户阻抗。根据二端网络定理，①、②左端等效电源阻抗为：

$$Z_n = ((R_{L1} + R_{01}) // Z_1 + (R_{L2} + R_{02})) // Z_2 + R_{L3} + R_{03} \quad (1)$$

由于 $Z_1 \gg R_{L1} + R_{01}$ ，所以 $(R_{L1} + R_{01}) // Z_1 \approx R_{L1} + R_{01}$ 。

同理 $Z_2 \gg (R_{L1} + R_{01}) + (R_{L2} + R_{02})$ ，所以 $((R_{L1} + R_{01}) // Z_1 + (R_{L2} + R_{02})) // Z_2 \approx R_{L1} + R_{01} + R_{L2} + R_{02}$ 。

等效电源内阻抗：

$$Z_n \approx (R_{L1} + R_{L2} + R_{L3}) + (R_{01} + R_{02} + R_{03}) = R_L + R_0$$

这样就可把 Z_1 、 Z_2 看成并联关系，并把相线电阻和中性线电阻分别以 $R_L (R_{L1} + R_{L2} + R_{L3})$ 和 $R_0 (R_{01} + R_{02} + R_{03})$ 代替。显然，对于集中装表的单相用户，等效电源内阻抗也就是 $Z_n = R_L + R_0$ 。

经过等效和化简，户内中性线接地后的简化等效电路如图5所示。

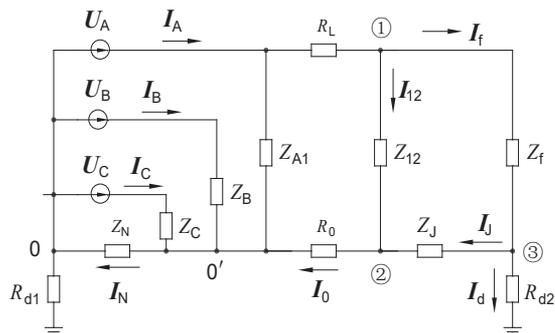


图5 户内中性线接地后的简化等效电路图

图5中, Z_{12} 为 Z_1 、 Z_2 并联阻抗, 也可看成多个阻抗并联值, Z_j 为电表电流线圈阻抗 (或电阻分流器), I_j 为电流线圈正向电流; R_{d1} 为变压器中性点接地电阻, R_{d2} 为表后接地电阻, 由于流过同一电流, 两者可以直接相加即 $R_d = R_{d1} + R_{d2}$ 。显然, Z_{12} 、 Z_f 、 R_0 、 R_d 、 Z_j 构成一个典型的桥式电路, 桥臂为 Z_{12} 、 Z_f 、 R_0 、 R_d , Z_j 则在桥上。

目前使用的单相电能表种类很多, 但从本文分析电路的角度看, 只须分为单电流元件 (计量用) 和双电流元件 (计量用) 两大类^[2-4]。双电流元件电能表的相线、中性线端电流元件都用于计量电度, 通常情况下选择火线电流计量, 这和普通单相电能表正确接线时完全一样; 当中性线电流大于火线电流达到设定值时, 自动切换为中性线电流计量, 这时的等效电路和图5无异。

以变压器中性点为参考点, $U_2 = I_0 R_0$, $U_3 = I_d R_d$, $U_{32} = U_{30} - U_{20}$; 把电能表电压线圈两端电压 U_{12} 作为参考向量, U_{12} 与 I_j 之间的夹角就是电能表测量的功率因数角 φ 。下面就从电桥的工况分析电表的计量状态。

电桥完全平衡。 $U_{30} = U_{20}$, 两个电压不但有效值相等, 而且相位角也相同, 这时 $U_{32} = 0$, $I_j = 0$, Z_j 可以断开, 则

$$U_{20} = U_{10} \frac{R_0}{R_0 + Z_{12}}, U_{30} = U_{10} \frac{R_d}{R_d + Z_f} \quad (2)$$

将其代入电压平衡式可推出

$$\frac{R_0}{R_0 + Z_{12}} = \frac{R_d}{R_d + Z_f}, \frac{R_0}{Z_{12}} = \frac{R_d}{Z_f} \quad (3)$$

这就是电桥平衡时的阻抗平衡式。由于 $I_j = 0$, 则测量功率为零, 电能表无记录电度, 但双电流元件电能表则由火线电流元件正常计量。

电桥极不平衡。有 $\frac{R_d}{Z_f} \gg \frac{R_0}{Z_{12}}$ 和 $\frac{R_0}{Z_{12}} \gg \frac{R_d}{Z_f}$ 两种情形。

$$\frac{R_d}{Z_f} \gg \frac{R_0}{Z_{12}}, \text{ 此时 } U_{30} > U_{20}, U_{32} \text{ 为正, } I_j \text{ 也为}$$

正, 出现这种情况的原因可能是 Z_f 减小或 Z_{12} 增大, 也可能2个原因兼而有之, 极端情况是 Z_{12} 空载。这时 I_j 主要由 I_f 决定, 当 Z_f 为感性负载时 I_j 滞后 U_{12} 落在第四象限; 当 Z_f 为容性负载时 I_j 超前 U_{12} 落在第

一象限; 当 Z_f 为电阻负载时电流 I_j 与 U_{12} 可能同相, 也可能超前或滞后 U_{12} 落在第一象限或第四象限, 即 I_j 都在平面直角坐标的右半平面, U_{12} 与 I_j 的夹角 φ 小于 90° , 测量功率为正, 但由于 $I_j = I_f + I_d$, I_d 的分流作用使 $I_j < I_f$, 电能表少计电度。但对于双电流元件电能表则照常计量。

$$\frac{R_0}{Z_{12}} \gg \frac{R_d}{Z_f}, \text{ 此时 } U_{20} > U_{30}, U_{32} \text{ 为负, } I_j \text{ 也为}$$

负。导致这种情况的原因可能是 Z_{12} 减小或 Z_f 增大, 也可能两个原因都有, 极端情况是 Z_f 空载。这时 I_j 主要由 I_{12} 决定, 当 Z_{12} 为感性负载时 I_j 超前 U_{12} 落在第二象限; 当 Z_{12} 为容性负载时 I_j 滞后 U_{12} 落在第三象限; 当 Z_{12} 为电阻负载时电流 I_j 与 U_{12} 可能反相, 也可能落在第二象限或第三象限, 即 I_j 总在平面直角坐标的左半平面, U_{12} 与 I_j 的夹角 φ 大于 90° , 测量功率为负。对计量结果的影响主要有三种情形:

第一种为单向计量电能表, 此时电表停止计度。

第二种为双电流元件智能电能表, 这种电能表具有组合有功计量模式, 设置为此模式时对测量功率正、负一样计量, 并取绝对值相加。如果不考虑功率因数的影响, 则当 $I_f > I_j$ 时照常计量, $I_j > I_f$ 时可能多计了电量。而当电能表未设置为组合有功模式, 且出现负功率时电表只将电量计入反向表码, 这时可能少计了电量。

第三种为单电流元件智能电能表, 这种电表对正、负有功电能分别计量, 当电能表未设置为组合有功模式, 正功率电量用于计费, 负功率电量仅作为状态记录, 这时也可能少计了电量。

除了上述电桥特殊工况, 一般情况下电桥工况是介于完全平衡与极不平衡之间, 电流相量 I_j 就可能落在平面直角坐标的右半平面或左半平面。落在右半平面时电能表测量功率为正, 落在左半平面时电能表测量功率为负。

当智能电能表现场监测信息出现功率为负, 同时火、零线电流不相等时, 可初步判断用户有窃电嫌疑; 但必须结合有无电压、电流突变记录, 有无开表盖记录, 有无开表箱和更改火、零线证据等综合分析判断^[5-6], 才能认定用户有无窃电行为或窃电企图 (作案未遂)。

2.3.2 三相不对称的影响

实际的低压三相系统不可能完全对称, 一般情况下, 三相电源是对称的, 而低压三相负载是不对称的。不对称三相负载产生中线电流 I_N , 并在中线阻抗 Z_N 上形成中点位移电压 U'_0 , 显然, 此时三相不对称影响如图 6 所示。

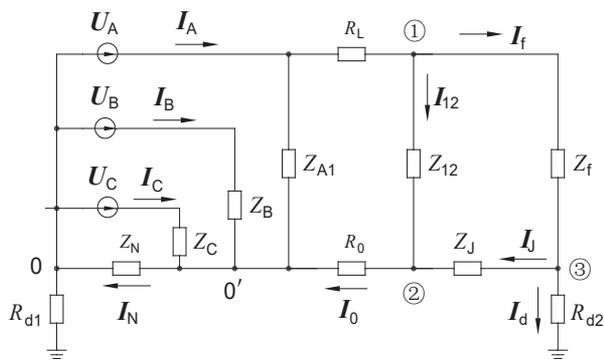


图6 三相不对称影响示意图

$I_N = I_A + I_B + I_C \neq 0$, $0'$ 点与 0 点不重合。

图中 U_A 、 U_B 、 U_C 为三相对称电源, Z_N 为支线接入点至变压器中性点中性线阻抗, Z_{A1} 为 A 相其他负载阻抗, Z_B 为 B 相阻抗, Z_C 为 C 相阻抗。当 Z_A 、 Z_B 、 Z_C 三相不对称时, 中线电流产生的电压为 $U'_0 = I_N Z_N$, 迭加在 R_0 上, 使得 $U_2 = I_0 R_0 + I_N Z_N$ 升高, 逼使 I_J 减小甚至变负, 从而影响计量结果。

2.3.3 其他用户接地或漏电的影响

当其他用户接地或漏电时, 流入地中的电流 I'_d 和 I_d 一样流过变压器中性点接地电阻 R_{d1} , 这就抬高了地电位和 U_3 , 如图 7 所示。

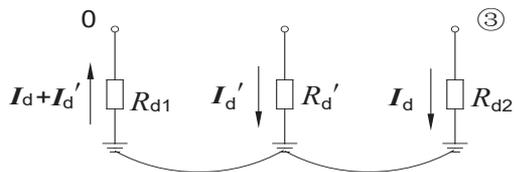


图7 其他用户接地或漏电影响示意图

设 I'_d 为 n 倍 I_d , 即 $I'_d = nI_d$, 则 U_3 可表示为:

$$U_3 = R_{d2} I_d + R_{d1} (n+1) I_d \quad (4)$$

R_{d1} 相当于提高到 $(n+1)$ 倍, 例如取 $n=2$, 则 R_{d1} 提高到等效电阻 $R'_{d1} = 3R_{d1}$ 。显然, 其他用户接地或漏电将使 I_J 正向增大, 用户内接地漏电的影响就会减少, 或者说电表少计的程度就会减轻。

另外, 当低压三相系统采用重复接地时, 接地

电流的作用与其他用户接地电流的作用相同。

2.3.4 等效电源内阻抗的影响

支线端口等效电源实际上并非无穷大, 而是存在一定内阻抗 Z_n 。从图 5 可以看出, 等效电源的内阻抗 Z_n 与 R_L 是串联关系, Z_n 与 R_L 的存在使负载端电压下降, 导致负荷功率减少, 但它们都不在桥内, 不影响电桥的平衡, 也不影响计量准确度。

表后中性线对地电压很低, 通常才几 V, 所以对地漏电流也相对较小。但是, 表后中性线对地漏电和中性线接地对电能表的计量影响在原理上是相同的, 两者只是影响的程度可能不同, 推理从略。

2.3.5 支路负荷状态的影响

在回路正常情况下, R_0 、 R_d 为常数, Z_{12} 和 Z_f 为变数, 即对应的负荷功率 P_{12} 和 P_f 是变数。单电流元件电能表测量功率 P 可表示为 P_{12} 、 P_f 的二元函数。即:

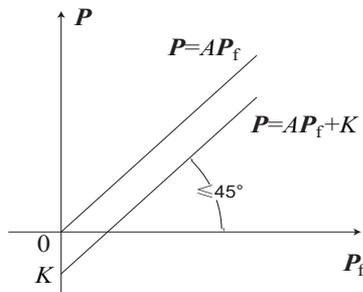
$$P = AP_f - BP_{12} \quad (5)$$

式中: $A = \frac{R_d}{R_d + Z_J + R_0}$ 是 I_f 单独作用时 I_J 的分流系数, $B = \frac{R_0}{R_d + Z_J + R_0}$ 是 I_{12} 单独作用时 I_J 的分流系数。

考虑到 Z_J 阻抗很小, 可以忽略。所以有

$$A \approx \frac{R_d}{R_d + R_0}, B \approx \frac{R_0}{R_d + R_0} \quad (6)$$

若 Z_{12} 为恒定负载, 则 P_{12} 为常数, 上式可变为 $P = AP_f + K$, 这样就把二元线性函数变成一元线性函数, 式中 $K = -BP_{12}$ 为纵轴截矩, 也是 P_f 空载时的电能表测量功率。函数图象如图 8 所示。

图8 P_{12} 为常数时 $P=f(P_f)$ 函数图像

图中, $P = AP_f$ 是 P_{12} 为 0 (无载) 时的图象, $P = AP_f + K$ 是 P_{12} 有载时的图象, 两者是互相平行的两条直线, $P = AP_f + K$ 的函数图像与横坐标交点即电桥平衡点。

实际上 P_{12} 通常是变数, 这时表示 $P = AP_f + K$ 的直

线将在 $P=AP_f$ 线下方随着 P_{12} 增大或减小向下平移或向上平移,电桥平衡点也随之向右或向左移动。以平衡点为界,左边 P_f 减小 P 为负,右边 P_f 增大 P 为正。

R_d 通常小于 $10\ \Omega$, R_0 通常小于 $0.1\ \Omega$,若按 $R_d=10\ \Omega$, $R_0=0.1\ \Omega$ 计算,则 $A\approx 0.99$, $B\approx 0.01$,图8中两条平行直线的倾角 $\psi=\arctan 0.99=44.7^\circ\approx 45^\circ$ 。电桥平衡时 $P=0$, $AP_f=BP_{12}$,再设此时 $P_{12}=5P_{IN}$, $P_f=xP_{IN}$, P_{IN} 是电能表额定电流对应的功率。代入电桥平衡式: $0.99xP_{IN}=0.05P_{IN}$,求出 $x=0.05$ 即5%,在 P_f 轻载区间。若 $P_{12}=10P_{IN}$,则 $x=10\%$,仍在 P_f 轻载区间。

若 R_d 取值减小,例如 $R_d=5\ \Omega$, R_0 仍按 $0.1\ \Omega$ 计算,则 $A\approx 0.98$, $B\approx 0.02$,两条平行直线的倾角 $\psi=\arctan 0.98\approx 44.4^\circ$, $P_{12}=5P_{IN}$ 时 $x=10\%$, $P_{12}=10P_{IN}$ 时 $x=20\%$,都还在轻载区间。 R_d 减小使 $P=AP_f+K$ 的直线与纵轴交点下移,同时与横坐标交点右移, R_d 的分流作用对计量的影响更大。

因为 $A\gg B$,影响计量状态的主要因素是 P_f ,把 P_f 分为空载、轻载(大于零但小于 $50\%P_{IN}$)和重载($\geq 50\%P_{IN}$),同时把 P_{12} 分为有载和无载,综合以上分析,不同负荷状态下的电表测量功率 P 大致如表1所示。

表1 不同负荷状态下的测量功率

	空载	轻载	重载
有载	负	负 零 正	正, $<P_f$
无载	零	正, $<P_f$	正, $<P_f$

双电流元件电能表选择相线电流计量时不受负荷状态影响;选择中性线电流计量时与单电流元件电能表计量状态相同。

3 结束语

从电桥工况和负荷状态对计量的影响可以发现,单电流元件电能表当实测功率大于或等于零时少计有功电量,当实测功率为负时可能多计有功电量;而双电流元件电能表当实测功率大于或等于零时照常计量,当实测功率为负时也可能多计了电量。如果负功率电量仅作运行监测参数,双电流元件电能表就可在不同功率状态下正常计量,对防止欠流法窃电也有很好的效果。

目前居民用户普遍安装了漏电保护开关,在漏电开关功能正常情况下表后漏电和接地是不可能长时间存在的运行方式。但是有些用户可能没有安装漏电保护开关,或者漏电开关失效形同虚设,相线、中性线接反后当用户漏电和中性线接地时就可能导致计量状态异常。所以安装电表时要遵照规范,确保正确无误;同时供电企业最好能和政府部门联合推广用户安装漏电保护开关,这既是保护人身安全的必要措施,也是保障正常计量的有效措施。其次是电能表增设中性线、相线自动识别功能,这样就可以及时发现问题和及时更正。

参考文献

- [1] 焦斌,李景村.单相电能表转向不定的原因[J].农村电气化,2006(10):21-23.
- [2] 李宁,李建闽,张建文,等.单相双向计量多功能智能电能表设计[J].自动化仪表,2017,38(3):70-74.
- [3] 刘宇鹏,燕伯峰,董永乐,等.基于零线电流测量和计量功能的单相电能表防窃电应用分析[J].内蒙古电力技术,2017,35(6):6-10.
- [4] 刘阳力.单相电子式防窃电电能表设计[D].长沙:湖南大学,2008.
- [5] 李景村.防治窃电应用技术与实例[M].北京:中国水利水电出版社,2004:161-162.
- [6] 李景村.防治窃电实用技术[M].北京:中国水利水电出版社,2009:170-173.

作者简介

李万(1994—),男,河南理工大学研究生,研究方向为电力系统及其自动化。

李景村(1950—),男,广东电网汕尾供电局高级工程师。

(责任编辑:刘艳玲)

资讯

国网上海电力:投运交通领域组合光伏项目 拓展可再生能源应用场景

10月13日,国网上海市电力公司4.736 kW延安路(铜仁路)高架分布式光伏项目成功投运,这是上海电网首个全容量并网的交通领域组合光伏发电(发电棒+光伏声屏障)项目。光伏所发电量全额上网、就近消纳,满足路灯、道路指引牌等电力需求,打造了“光伏+交通安全出行”场景,助力交通领域减排降碳。

来源:国网上海市电力公司