

「电网损耗」

# 计及三相不平衡和负荷波动的 低压台区理论线损计算

文/贵州大学电气工程学院 鹿振国 张盼盼 王炳昱 张华鑫

电网的损耗作为影响经济效益的一个重要方面，受到了越来越多的关注，目前大部分统计线损是通过每个月末抄表数据统计计算的结果得出的，电量波动变化较大，存在着缺少瞬时性和准确性较差的问题，通过配电变压器监测终端采集的数据，同时在计算过程中考虑负荷波动、三相不平衡、低压无功补偿以及单相/三相混合供电等情况进行低压台区理论线损计算，通过理论线损计算便于运行管理部门进行分析，从而采取切实可行的降损措施，以达到最大的经济效益。

降低低压台区电能损耗的重要途径是采取行之有效的措施，主要的降损措施包括合理调整运行电压、缩短供电半径、换粗截面导线、更换高能耗变压器和增加无功补偿装置等。在低压台区线损计算过程中由于功率因数是依据首端TTU得出的，而末端用户的功率因数千差万别，导致理论计算出的线损和实际误差很大，在一定程度上导致三相严重不平衡，而且对用户的抄表只能得到有功电量，所以数据采集也有问题。在分析目前采用低压台区理论线损计算方法存在问题的基础上，提出了一种计及负荷波动、三相不平衡、低压无功补偿和单相/三相混合供电等情况的低压台区理论线损计算方法。

## 低压台区理论线损计算影响因素分析

### 1. 功率因数影响

在实际电量采集中，仅能获取用户有功电量，理论线损计算过程中功率因数均按首端功率因数考虑，实际上由于低压台区用户负荷功率因数与首端功率因数不一致，进而造成计算结果存在一定偏差。功率因数提高，线路流过无功电流减少，线损降低；功率因数降低，线路流过无功电流增加，线损升高。因此，在准确计算低压台区理论线损时，应考虑按用户负荷性质来定义各个用户的功率因数。

另外，在现有的低压台区理论线损计算软件中，未考虑低压台区无功补偿装置作用。随着今

后计量装置的完善，建议在理论线损的算法中考虑分散式或集中式低压无功补偿装置对计算结果的影响，以使计算结果与实际更为接近。

### 2. 三相不平衡影响

在三相平衡状态下，三相电流的矢量和为零；当三相负荷不平衡时，相间就会有不平衡电流产生，它在相间及中性线上会引起附加的电能损耗。假设某条采用三相四线制架设的线路，三相负荷平衡且负荷电流为总值为 $3I$ ，每相导线及中性线的导线电阻值为 $R$ ，利用式（1）和式（2）可分别求得中性线电流及线路中的电能损耗

$$I_N = I_a + I_b + I_c = 0 \quad (1)$$

$$\Delta P_b = 3I^2 R \quad (2)$$

另假设某三相电流不平衡状态，设A相电流为 $2I$ ，B、C相的电流值为 $I/2$ ，其中性线电流和线路上的电能损耗可利用式（3）和式（4）分别求得

$$I_N = 2I + \frac{1}{2}I\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \frac{1}{2}I\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{3}{2}I \quad (3)$$

$$\Delta P_{umb} = [(2I)^2 + \left(\frac{1}{2}I\right)^2 + \left(\frac{1}{2}I\right)^2 + \left(\frac{3}{2}I\right)^2] \times R = \frac{27}{4}I^2 R \quad (4)$$

比较式（2）和式（4），可知三相不平衡状态下的功率损耗比平衡状态时增加了1.25倍，最极端的情况是，全部负荷由单相供电，求得线路的导线损耗

$$\Delta P_{umb} = (3I)^2 \times 2R = 18I^2 R \quad (5)$$

由式（4）和式（5）对比可知，在线路用电

情况相同的条件下,负荷完全由单相供电的导线损耗是三相供电方式的6倍。

### 3. 负荷波动影响

低压线路负荷形状系数是描述低压线路首端负荷变化特征的一个参数,它反映了负荷谷峰值的大小及负荷在一段时间内的波动情况,定义为线路首端负荷电流的方均根值 $I_{fj}$ 与平均值 $I_{pj}$ 之比,即

$$K = \frac{I_{fj}}{I_{pj}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} I_{pj}^2}}{\frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} I_{pj}} \quad (6)$$

关于负荷形状系数 $K$ 的计算,最关键问题是如何选取代表日,对此,主要需综合考虑三点因素。

1) 所选的代表日应为非节假日,其供电量接近计算期的日平均供电量。

2) 所选代表日的气候情况正常,气温接近计算期气温的平均值。

3) 代表日负荷记录应完整,能满足计算需要,一般取1 d (24 h) 整点的电流电压功率因数有功和无功电量等。

台区典型日24点负荷波动情况如图1所示。

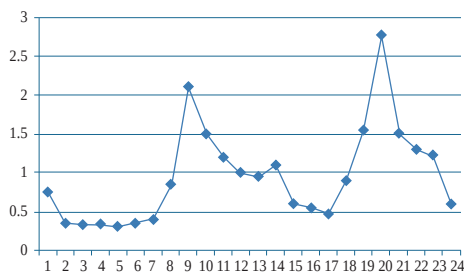


图1 典型日负荷波动情况示意图

### 4. 供电位置

由于低压台区用户接线形式较复杂,供电半径千差万别,在用户比较密集的地区,台区用户不断增多,低压台区变压器供电位置随之偏离负荷中心,导致线损增加,所以供电位置对线损的影响也不容忽视。

## 分层前推回代三相潮流算法

在前推回代算法中,先要对网络支路和节点进行编号。首先对辐射状网络进行分层,将根节点作为第一层,按照广度优先算法依次顺序进行搜索并分层编号。如图2所示的配电网,利用广度优先算法搜索形成的层次关系以及各层的节点编

号,第一层:0;第二层:1;第三层:2、3、4;第四层:5、6、7;最后一层:8、9、10。

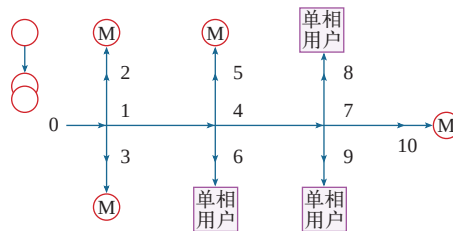


图2 辐射状网络结构编号

前推回代算法的过程如图3所示辐射状配电网线路中, $i$ 、 $k$ 分别为父、子节点, $k$ 、 $j$ 分别为父、子节点。

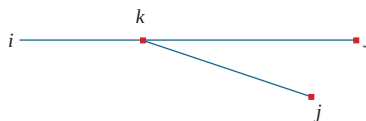


图3 辐射状配电网馈线支路图

## 基于前推回代法三相潮流理论线损的计算

### 1. 计算流程图

图4所示为计及三相不平衡的低压台区理论线损计算流程。

按折算后典型日的24个时段分别计算理论线损,包含如下几个模块。

1) 潮流计算模块。采用基于前推回代的三相潮流计算方法,通过迭代获取各个节点的三相或单相节点电压和注入电流,以及各个支路的电流。

2) 线路损耗计算模块。根据1)获得的支路电流计算各相支路损耗,计算各支路的零线电流及损耗。

3) 线路损耗修正模块。通过表计损耗及环境温度对理论线损计算结果进行修正。

### 2. 数据预处理

通过变压器TTU能够获取低压台区日负荷曲线,然后将典型月用户电量折算为典型日平均负荷,再乘以各个时段的负荷系数即可得到24时段的用户平均负荷。在理论线损计算时,折算后的典型日按24个时段分别计算理论线损,最后通过损耗功率平均值得到理论线损。

本文采用的线损计算数学模型和降损措施均考虑了三相平衡问题,要求明确各用户是单相或三相用户。单相用户需要确定接入相。三相用户根据其所用表计情况而定,当三相用户安装三块

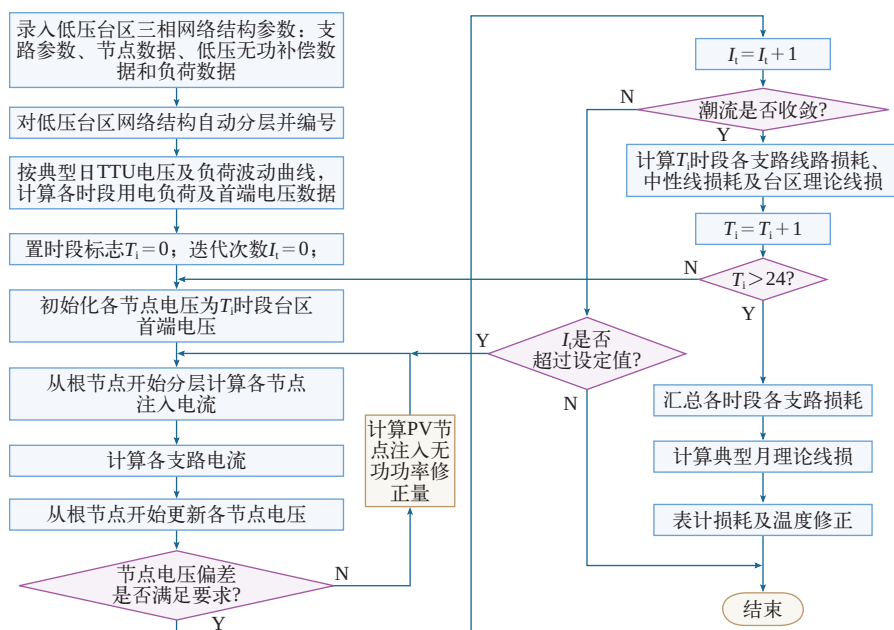


图4 计及三相不平衡的低压台区理论线损计算流程

单相电能表分相计量时，其处理方法相当于三个在同一地点的相序不同的三个单相用户。如果三相用户只是安装一块三相电能表，本文认为三相负荷基本平衡，将三相电能表的数值除以3，虚拟为三块单相电能表的数值。

### 三相不平衡对低压台区线损影响及处理

某文献提出了一种三相四线制配电网络的相分量潮流模型求解三相潮流，但该方法中涉及大地导线、对地导纳等参数，不适于实际低压台区的理论线损计算。为此，提出了一种简单的零线损耗计算方法。三相三线制主要用于动力负荷，三相四线制主要用于低压网络主干线支路，单相两线制则用于居民用户。在三相不平衡系统中的保护接地线也可能流过较小电流，增加支路的损耗，但由于其数值往往较小，在实际计算中可将其忽略。图5所示为低压配电网络。

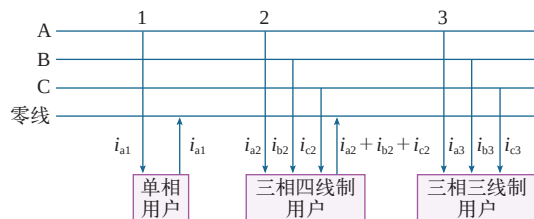


图5 低压台区供电模式示意图

由图5可知，支路L1三相电流分别为

$$\begin{cases} i_{L1a} = i_{a1} + i_{a2} + i_{a3} \\ i_{L1b} = i_{b2} + i_{b3} \\ i_{L1c} = i_{c2} + i_{c3} \end{cases} \quad (7)$$

零线上流过电流为节点1零线电流和节点2注入零线电流之和，即

$$i_{L1N} = i_{a1} + i_{a2} + i_{b2} + i_{c2} \quad (8)$$

由于对于节点3来说，有

$$i_{a3} + i_{b3} + i_{c3} = 0 \quad (9)$$

故可得

$$i_{L1N} = i_{L1a} + i_{L1b} + i_{L1c} \quad (10)$$

故可得如下结论：无论采用何种供电方式，零线回路上的电流实际上等于该零线所在支路的三相电流之和，由此可结合零线线路参数计算其线路损耗。

### 算例分析

由表1可知，分析台区理论线损率发现采用本文所提计算方法所得理论线损率高于3%，而其余计算方法所得结果不到2.5%，说明本文的理论方

表1 台区1理论线损计算结果

| 计算方法 | 导线损耗<br>/kW·h | 表计损耗<br>/kW·h | 总损耗<br>/kW·h | 线损率<br>(%) |
|------|---------------|---------------|--------------|------------|
| 本文   | 420.41        | 89.7          | 519.04       | 3.24       |
| 电量   | 370.62        | 89.7          | 466.11       | 2.13       |
| 容量   | 382.56        | 89.7          | 469.17       | 2.17       |

法与实际线损更为接近。

由表2台区可知,以本台区为例计及负荷波动系数后,理论线损率明显上升,负荷波动对线损率的影响较大,说明本文所提方法也能将负荷波动对线损的影响考虑进去,在一定程度上能得到和实际较为接近的线损率。

表2 台区1计及三相不平衡理论线损计算构成

| 分类        | 计及负荷波动    | 不计及负荷波动  | 增加百分比 (%) |
|-----------|-----------|----------|-----------|
| 供电量/kW·h  | 15 886.04 | 15 765.2 | —         |
| 损耗电量/kW·h | 420.41    | 299.9    | 40.183 39 |
| 线路损耗/kW·h | 338.61    | 240.5    | 40.794 18 |
| 零线损耗/kW·h | 80.82     | 62.1     | 30.144 93 |
| 表计损耗/kW·h | 89.7      | 89.7     | —         |
| 线损率 (%)   | 3.2       | 2.36     | 35.593 22 |

根据图6由前推回代法计算的理论线损与功率因数的关系可知,理论线损随功率因数的提高而降低,说明要减小在线路和设备上的损耗,应尽量提高线路的功率因数,可考虑在负荷集中处加装低压无功补偿装置。

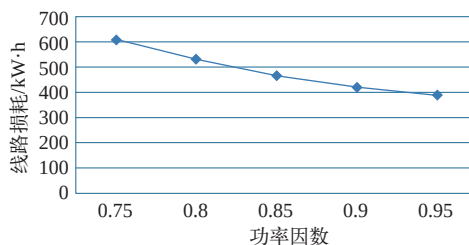


图6 功率因数对赵思1号台区理论线损影响

## 结束语

考虑了影响理论线损计算的常见因素,比较了常用的低压台区理论计算方法的优缺点和不足,找到了一种更接近实际理论线损计算的方法,对有监测终端装置的配电变压器,在计及负荷波动情况下,找到了一种利用前推回代三相潮流算法计算低压台区理论线损的方法。将此方法应用于典型的低压台区线损计算中去,同时又和其他理论线损计算方法相比较,最终发现此方法计算结果更接近实际线损。EA

(收稿日期: 2014.07.24)

[编辑: 刘群焱]

(上接第69页)

且不以装置显示为判断结果,应模拟不同的状态测试SV品质位无效时装置是否自动闭锁。

7) 合并单元准确度调试。利用测试仪测试合并单元输出各个采样通道的精度,记录相角及变比误差。值得注意的是在测试级联电压的准确度时,应从电压合并单元加电压,在间隔合并单元测试接收侧准确度及延时是否合格。

8) 合并单元逻辑检查。包括间隔合并单元的电压切换逻辑测试及母线合并单元的电压并列逻辑测试。

9) 智能终端逻辑测试。包括手跳、永跳和压力低闭重逻辑;直连及组网GOOSE报文接收光口区分。

10) 智能终端虚回路测试。检查智能终端接受一次设备信号后输出虚遥信的正确性;检查智能终端接受GOOSE报文后输出硬接点的正确性。

11) 网络性能测试。包括交换机性能测试、网络风暴测试等。

## 分系统调试

智能变电站同传统变电站一样需要分别模拟各种运行及故障状态,测试二次设备的动作行为,同时结合传动来验证出口软、硬压板的唯一性及正确性。除此之外智能变电站还应进行如下项目调试。

1) 进行二次通流通压试验来测试某一间隔采样的同步性。同时从母线合并单元和间隔合并单元前端输入电压和电流,在各个接收装置处检测电流、电压的幅值及角度,以检测相关装置采样数据的正确性。

2) 测试从不同合并单元同时采集数据的如母差保护、主变保护及3/2接线保护等二次设备采样的同步性。应同时从各相关合并单元前端输入电压和电流来检查各二次设备的采样,确保不同合并单元采样数据的同步。EA

(收稿日期: 2014.07.02)

[编辑: 刘群焱]