[电网]

基于实际线路结构且考虑动态三相不平衡度的低压电网线损算法

文/扬州供电公司　吴佳佳　黄　俊　韩旭雯

提出了一种基于实际线路结构且考虑实时动态三相不平衡度的低压电网线损算法。该算法不仅能够给出线路总损耗，而且能给出各条支路的具体损耗，从而能够对台区损耗有更加详细的了解。同时该算法考虑了动态三相不平衡度，使得计算精度和改进的等值电阻法相当，而且基于实际线路结构能够得出具体每条支路的损耗，从而能够发现一些损耗异常的线路（如卡脖子线路）。通过建立关联矩阵，给出了该算法的计算机算法的实现。最后通过算例验证了该算法的正确性和有效性。

电力网的电能损耗（俗称线损），是电网经营企业在电能传输和营销过程中所产生的损耗。线损是供电企业的一项重要的经济技术指标，也是衡量供电企业综合管理水平的重要指标。准确计算配网低压台区的线损是合理制订线损率指标和分析线损的基础。同时也有利于供电企业掌握台区电网的运行状况，从而为供电企业采取降损措施提供可靠的基础。供电企业的主要任务就是要安全输送与合理地分配电能，并力求尽量减少电能损失，以取得良好的社会效益与企业经济效益。

以往配电自动化水平较低，配网准确信息难以收集，但随着配网建设的日益完善，低压配网的资料也越来越完整和精确，从而为基于实际线路结构的线损算法应用创造了条件。

普通等值电阻法原理

1．等值电阻法

基于等值电阻的线损计算基本思想是，在低压配电线路首端（计量点）处，假想一个等值的线路电阻R_{eq}，在通过线路首端的总电流I_Σ产生的损耗，与线路各段不同的分段电流I_i，通过分段电阻R_i，所产生的损耗的总和相等。

如假设有一简单的低压配电网，由若干分支线组成，各分支线电阻分别为R_1、R_2、R_3、…、R_n，线路首段的负荷电流为定值I_Σ，如图1所示。

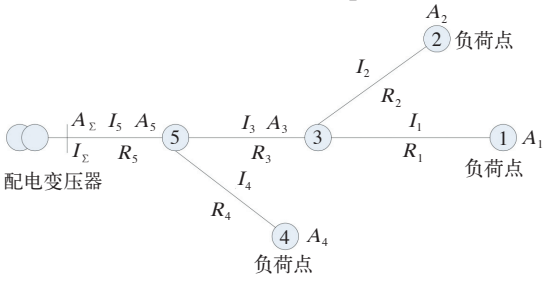

图1　低压配电网结构图

则

$$\Delta A = 3I_\Sigma^2\left[\left(\frac{A_1}{A_\Sigma}\right)^2 R_1+\left(\frac{A_2}{A_\Sigma}\right)^2 R_2+\cdots+\left(\frac{A_n}{A_\Sigma}\right)^2 R_n\right]\times t \quad (1)$$

式中，I为电网线路实际运行时间；I_Σ为电网线路首段的负荷电流；I_i为各分支线路的负荷电流，i

$=1$，$2\cdots$；A_i为各分支线路的抄见电量，$i=1$，$2\cdots$；A_Σ为总抄见电量，各负荷抄见电量之和。

令$R_{eq}=\left(\frac{A_1}{A_\Sigma}\right)^2R_1+\left(\frac{A_2}{A_\Sigma}\right)^2R_2+\cdots+\left(\frac{A_n}{A_\Sigma}\right)^2R_n$，$R_{eq}$即为电网的等值电阻。

2．等值电阻法计算模型

线路损耗

$$\Delta A=NI_{av}^2K^2R_{eq}T \tag{2}$$

式中，N为配电变压器低压出口电网结构常数，单相两线制取$N=2$，三相三线制取$N=3$，三相四线制取$N=3.5$；K为线路首段负荷曲线特征系数（负荷曲线形状系数）；I_{av}为线路首段第 时段内平均负荷电流；R_{eq}为线路导线等值电阻；T为当月线路实际运行时间。

当低压台区配电变压器二次侧装有有功电能表和功率因数表时，则I_{av}为

$$I_{av}=\frac{A_p}{\sqrt{3}NU_{av}T\cos\varphi} \tag{3}$$

式中，A_p为配电变压器的低压侧出口月总有功电量；U_{av}为配电变压器的低压侧出口处的线电压，一般取$U_{av}=0.38$ kV；$\cos\varphi$为低压线路负荷功率因数。

等值电阻法计算方法主要缺点是：该计算模型认为，如果低压线结构是三相四线制，则中性线截面积比相线要小得多，中性线中的电流也比相线中的电流要小，估算线路的电能损耗约为一根导线损耗的3.5倍，即电网结构常数$N=3.5$。这样的近似算法对于一些负荷严重不平衡的低压网来说计算结果显然是不准确的。所以在计算低压网线损时，需要充分地考虑到三相负荷不平衡度对线损的影响。

考虑动态三相不平衡度的等值电阻法

1．线损与三相不平衡度的关系

各相电流不平衡度定义为

$$\beta_\phi=\frac{I_\phi-I_{av}}{I_{av}}\times100\% \tag{4}$$

式中，I_ϕ为相负荷电流；I_{av}为平均负荷电流，$I_{av}=(I_A+I_B+I_C)/3$。

显然有$I_\phi=(1+\beta_\phi)I_{av}$，由于$I_\phi$的取值范围为$0\sim3I_\phi$，所以$\beta_\phi$的变化范围是$-1\sim2$，且存在以下关系

$$\beta_A+\beta_B+\beta_C=0$$

假定三相四线制线路的相线电阻与中性线电阻皆为R，则线路的总损耗为$\Delta P=[3+2(\beta_A^2+\beta_B^2+\beta_C^2)-(\beta_A\beta_B+\beta_B\beta_C+\beta_C\beta_B)]I_{av}^2R$则$3+2(\beta_A^2+\beta_B^2+\beta_C^2)-(\beta_A\beta_B+\beta_B\beta_C+\beta_C\beta_A)$称为不平衡系数。

由以上推导可以得出三相不平衡时线路损耗是三相平衡时线路损耗的倍数为

$$K=\frac{3+2(\beta_A^2+\beta_B^2+\beta_C^2)-(\beta_A\beta_B+\beta_B\beta_C+\beta_C\beta_A)}{3} \tag{5}$$

考虑到β_ϕ的变化范围是$-1\sim2$，且存在以下关系$\beta_A+\beta_B+\beta_C=0$，得

$$K=\frac{3+5\beta_A^2+\beta_B^2+5\beta_A\beta_B}{3} \tag{6}$$

显然K与β_A和β_B是一个三维的曲面关系，如图2所示。

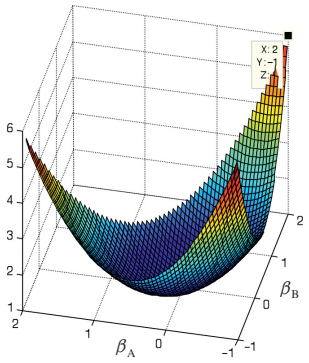

图2　K与β_A和β_B关系图

当$\beta_A=0$、$\beta_B=0$时（此时三相平衡），$K=1$；当$\beta_A=-1$、$\beta_B=2$时$K=6$，即当A相不平衡度为-1，B相不平衡度为2（此时可算出C相不平衡度为-1）时，线路的损耗是三相平衡时的6倍。因此，搞好三相平衡是降低线损的重要措施。

2．考虑动态三相不平衡度的线损算法

在前面确定的动态三相不平衡度的基础上，低压台区线路损耗计算模型最终为

$$\Delta A=K_2^2\sum_{i=1}^{n}K_{1i}I_{pji}R_{eq}\frac{T}{24}\times10^{-3} \tag{7}$$

式中，K_{1i}为动态三相不平衡系数；K_2为线路首端负荷曲线特征系数（负荷曲线形状系数）；I_{pji}为线路首端第T时段的平均负荷电流；n为实际负荷电流代表日抄录的个数或次数；T为计算时间。

这样计算便将每隔T时段的三相不平衡度乘以每相隔T时段的负荷平均电流，然后累加到系统损耗电量中，反映了系统的时变性，提高了计算精度。

基于实际线路结构的低压线损计算方法

1．电流分配数学表达式

（1）节点与支路的编号规则

通过参考现有的拓扑分析方法，再结合低压台区的实际状况，提出了“低压台区分层编号规则”，适用于辐射形、开环运行的低压农网。假设某低压台区线路结构如图3所示。对于图3中的

线路，用编号①～⑥代表全部节点，用编号1～13代表全部支路。

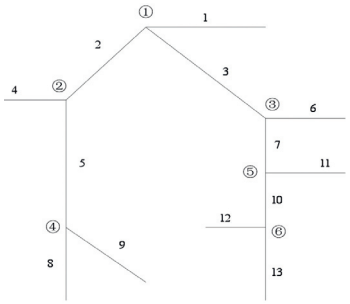

图3　某低压台区线路结构图

节点所遵循的编号原则如下。

1）所有的末端节点编号为0。

2）电源点为首节点，也称为一级节点，编号为①。

3）直接与电源通过一条导线相连的节点为二级节点，由②开始依次编号全部二级节点，如图中所示②、③号节点。

以此类推，三级节点、四级节点……直至将所有末端支路的节点编号完毕，本例中，④、⑤为三级节点，⑥为四级节点。

支路所遵循的编号原则如下。

1）在节点编号完整的基础上，以一级节点为首节点的支路为一级支路，从1开始，对其依次编号，如图中的1、2、3号支路。

2）以二级节点为首节点的支路为二级支路，如图中的4～7号支路，同时也要遵循小号节点下支路先编号，大号节点下支路后编号的原则。

以此类推，三级支路、四级支路……直至所有末端支路编号完毕。

（2）确定各支路电流值的数学表达式

结合图3分析电流传送的过程：起始电流由一级节点①注入后，分别流入一级支路1、2、3，电流分配的依据是该支路及其后续所有支路所带负荷量之和。如分配给支路2的电流由之路2、4、5、8、9负荷之和决定，流经支路3的电流则是支路3、6、7、10、11、12、13负荷之和决定。当电流通过二级节点②、③向二级支路分配时，遵循同样的原则，以此类推。

定义概念“支路分流决定因子”——某条支路本身以及所有影响该支路电流分配的后续支路的分流参数之和。数学表达式为

$$M_i=A_i+\sum_{i<j\leqslant n}A_j \quad i=1,\ 2,\ \cdots,\ n \qquad (8)$$

式中，j为所有影响支路i电流分配的后续支路编号；n为支路总数。

当电流每次在节点处面临分配时，即按照其下级支路各自的“分流决定因子”的比例关系分配。

由此引出每条支路电流值的表达式为

对于所有一级支路（即以电源点为首节点的支路）

$$I_i=I_0M_i/\sum_{1<j\leqslant n}M_j \quad i=1,\ 2,\ \cdots,\ n \qquad (9)$$

式中，i为某条一级支路编号；j为全部一级支路编号。

对于一级以下级别的其他支路

$$I_i=I_kM_i/\sum_{1<j\leqslant n}M_j=I_kM_i/(M_i-A_i) \quad i=1,\ 2,\ \cdots,\ n \qquad (10)$$

式中，i为某条一级支路编号；k为i的直系上级支路编号；j为与支路i分配I_k的所有支路号。

至此，已得到各支路电流值的数学表达式，根据该表达式并结合起始电流值，可以得到整个台区每条支路在一定时刻内的电流大小，解决了线损计算过程的关键问题。

2．计算机算法的实现

（1）关联矩阵的形成

要分析线路关系，首先要求用户按照一定的格式将线路关系输入到电脑中，本文所规定格式为：支路编号、首节点号、末节点号、该支路分流参数。其次则是用关联矩阵来用数学的方式表达拓扑关系。

将支路的方向就定为支路中电流的方向，针对图3中的线路，依据编号规则，形成关联矩阵如图4所示。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	−1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	−1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	−1	0	0	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	−1	0	0	1	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	−1	0	1	1

图4　关联矩阵图

矩阵中列编号1至6代表节点，行编号1至13代表支路。矩阵内元素1代表相应节点为支路的首节点；元素－1代表相应节点为支路的末节点；元素0代表相应节点与支路无关联关系。

（2）由下至上扫描，确定“支路分流决定因子”

计算机程序中，分两步采用两种类型扫描来得到该变量值。

1）针对所有末端支路。分别对各支路（即各列）进行扫描，找出所有不包含－1元素的列。对于关联矩阵中的每一列，元素－1对应的行即为该支路的末端节点编号，当一列中不包含－1元素，则说明0是该支路的末节点，则该支路为末端支路。末端支路的“分流决定因子”等于“分流参数”值，即，其中为所有末端支路编号。

2）针对末端以外的其他支路。对于除末端以外的其他支路，“分流决定因子”是本支路及其所有

下级支路的“分流参数”之和。

处理方式为：从大到小扫描全部支路编号，即分别扫描所有列，针对每一条支路首先找出它的唯一末节点（关联矩阵的这一列中－1所对应的行），针对这个节点找出它的所有直系下级支路（关联矩阵的这一行中1所对应的列），最后将本支路的“分流参数”与它所有支系下级支路的“分流决定因子”相加，即得到该支路的“分流决定因子”。

（3）由上至下扫描，确定支路电流

支路电流的获得方式也划分为两种。

1）针对所有一级支路。

扫描关联矩阵中的第1行，这一行中，元素1对应的列所代表的就是该台区的一级支路。而后即可根据式（9），确定这几条支路的电流值。

2）针对一级以下级别的其他支路。

对所有支路编号从小到大扫描，针对每一条支路先找到它的首节点（关联矩阵的这一列中1所对应的行），针对这个节点找到它的直系上级支路（关联矩阵的这一行中－1所对应的列），这条支路的电流即是待分配电流，则已开始扫描到的这条下级支路电流即可根据式（10）求出。

至此，算法的计算机实现介绍完毕，每条支路的电流值已由相应的存储空间所记录。

算例分析

图5是某低压台区线路网络结构图。该台区导线类型均为三相四线制，负荷性质为C类，即生活照明加非普工业。统一参数如表1所示。2007年10月该台区总电量为16 950 kW·h。

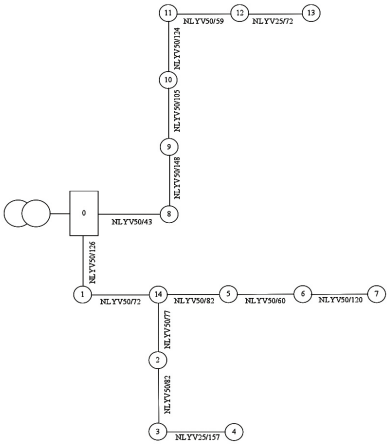

图5　某低压台区线路结构图

表1　统一参数

功率因数	负荷曲线特征系数	线路运行时间T/h	平均相电压/kV
0.85	1.25	744	0.22

分别用普通等值电阻法和本文改进算法对该算例进行了计算，结果如表2所示。

表2　月网损计算结果

计算模型	固定损耗 /kW·h	可变损耗 /kW·h	总损耗 /kW·h	理论线损率 /kW·h
等值电阻法	281	620.7	901.7	5.32%
本文改进算法	281	980.5	1261.5	7.44%

总损耗为各条支路损耗之和：1 082.57 kW·h，和《农村低压配电网理论线损计算方法研究》中的改进等值电阻法的980.5 kW·h基本相当，差异可能是由于线路电阻参数的误差引起的。由此基于实际线路结构且考虑动态三相不平衡度算法程序的正确性得到证明。同时程序还能得出等效电阻为0.101 18 Ω。

各支路的损耗如表3所示。很明显，支路0－1、1－14损耗比较严重，这是由于该线路下负荷较大，而这两条线路线径较小且长度较长导致的。如能更换为线径较粗的导线，将能明显降低台区线损。

表3　各支路损耗

支路	损耗/kW·h	支路	损耗/kW·h
0－8	28.179 6	1－14	212.412
8－9	83.765 2	14－5	94.84
9－10	47.423	5－6	0.441
10－11	41.027 6	6－7	0.278 1
11－12	15.251 8	14－2	31.752 4
12－13	0.625 9	2－3	29.299 5
0－1	412.478	3－4	84.795 8

结束语

基于实际线路结构线损算法原理和等值电阻法是一样的，该算法不仅能够给出线路总损耗，而且能给出各条支路的具体损耗，从而能够对台区损耗有更加详细的了解。用自己编制的程序对以上算例进行了研究，该程序采用的是基于实际线路结构且考虑动态三相不平衡度算法，该算法考虑了动态三相不平衡度，使得计算精度和改进的等值电阻法相当，而且基于实际线路结构能够得出具体每条支路的损耗，从而能够发现一些损耗异常的线路（如卡脖子线路）。EA

（收稿日期：2015.07.20）

（编辑：刘群点）