

采用负荷电量计算低压配电台区理论线损的牛拉法

刘庭磊¹, 王韶², 张知², 朱姜峰³

(1. 国网重庆市电力公司南岸供电分公司, 重庆 400060; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 3. 国网邯郸供电分公司, 河北 邯郸 056035)

摘要: 为计算低压配电台区理论线损和利用远程自动抄表系统提高管理线损水平, 提出一种采用负荷电量计算低压配电台区理论线损的牛拉法。该方法基于等值电阻法和用户电能表实抄电量, 通过引入线路负荷曲线形状系数与平均负荷电流的关系和三相负荷不平衡线损修正系数建立以台区理论线损为变量的数学模型。给出了运用牛拉法求解该模型的实现过程。算例分析表明, 提出的方法不仅能够计算低压配电台区的理论线损, 而且能够为识别不明线损提供信息。

关键词: 低压配电台区; 理论线损; 等值电阻法; 牛拉法; 线损管理

Newton-Raphson method for theoretical line loss calculation of low-voltage distribution transformer district by using the load electrical energy

LIU Tinglei¹, WANG Shao², ZHANG Zhi², ZHU Jiangfeng³

(1. Nan'an Electric Power Supply Subcompany, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400060, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Grid Handan Electric Power Company, Handan 056035, China)

Abstract: In order to calculate the theoretical line loss of low-voltage distribution transformer district and improve the line loss management level by using automatic meter reading system, a Newton-Raphson method to calculate the theoretical line loss of low-voltage distribution transformer district by adopting the load electrical energy is proposed. On the basis of the equivalent resistance method and the electrical energy acquired from the watt-hour meters of customers, the mathematical model of regarding theoretical line loss of transformer district as a variable is created. The model introduces relationship between load shape coefficients and the average load current, and the line loss modified coefficient of unbalanced three-phase load. The procedure of the Newton-Raphson method to solve the model is presented. Case analyses show that the proposed method can not only calculate the theoretical line loss of low-voltage distribution transformer district, but also provide the information to identify unknown line loss.

Key words: low-voltage distribution transformer district; theoretical line loss; equivalent resistance method; Newton-Raphson method; line loss management

中图分类号: TM72

文章编号: 1674-3415(2015)19-0143-06

0 引言

线损管理是电力部门的一项基础性工作。如何采取有效措施降低配电网的损耗非常重要^[1]。对量大面广的低压配电台区, 通过综合分析线损管理现状后, 采取针对性措施减少线损具有重要意义。

线损分为理论线损和管理线损。由于线损率是综合反映电网经营管理水平的一项重要经济技术指标^[2], 因此对于运行中的低压配电台区, 可以通过对

比实际线损率和理论线损率查找不明线损, 提高线损管理的水平^[3]。这就要求在分析管理线损水平时事先求得理论线损。由于低压配电台区紧靠用户, 分支线多, 而且线损受到各种因素影响^[4], 因此难以精确计算低压配电台区的理论线损^[5-6]。现有的低压配电台区理论线损计算方法可以分为两类, 一类是采用线路首端电流或电量进行计算, 主要有竹节法^[7]、平均电流·负荷曲线特性系数法^[8]、基于实际线路结构的计算方法^[9]、均方根电流法^[10]、等值电阻法^[3,11-13]等。尽

管这类方法可以实现理论线损的计算,但不能利用低压配电线路首端电量包含的不明线损信息查找问题。另一类是基于低压配电线路末端用户的电量,采用前推回代法计算低压配电网的理论线损^[14-15]。尽管在计算过程中计及了各段线路上负荷形状系数的差异^[14]和考虑了线制和电压降对线路线损的影响^[15],但计算结果误差较大,不利于查找不明线损。

随着智能电表和远程自动抄表系统^[16]的应用,采集用户的用电信息更加方便、快捷和准确。根据低压配电网的结构,利用远程自动抄表系统和合理配置电能表能够实现防窃电^[17]。但这要求配变区域总电能表的电量在明显大于该区域内所有用户电能表的电量时电能计量中心才能辨识出该区域内发生了窃电。窃电使国家蒙受巨大的经济损失^[18],因此,有必要研究能更好地利用远程自动抄表系统采集的用户电量提高管理线损水平的方法。

本文基于目前低压配电台区理论线损计算最常用的等值电阻法^[11],提出采用负荷电量计算低压配电台区理论线损的牛拉法。该方法以远程自动抄表系统采集到的末端用户电量为基础,通过引入线路负荷曲线形状系数与平均负荷电流的关系和三相负荷不平衡修正系数建立数学模型。采用牛拉法求解该模型实现理论线损计算。最后,通过算例说明用提出的方法识别不明线损信息的可行性。

1 等值电阻法基本原理

运用文献[11]给出的等值电阻法计算以配电台区为单元的低压配电线路的理论线损时,先按照导线型号、长度、输送负荷均相同者为同一线段的原则,从线路末端到首端,从分支线到主干线的次序划分计算线段,再计算理论线损值。具体公式为

$$\Delta A = NI_{av}^2 K^2 R_{dz} t \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$I_{av} = A_{p.g} / (\sqrt{3} U_{av} t \cos \varphi) \quad (2)$$

$$R_{dz} = \sum_{j=1}^n N_j A_{j\Sigma}^2 R_j / [N(\sum_{i=1}^m A_i)^2] \quad (3)$$

式中: ΔA 为低压线路的理论线损; N 为配电变压器低压出口电网结构常数,三相三线制取 $N=3$,三相四线制取 $N=3.5$,单相两线制取 $N=2$; I_{av} 和 $A_{p.g}$ 分别为线路首端平均负荷电流和有功供电量; U_{av} 为低压线路平均运行线电压,可取 $U_{av} \approx 0.38$ kV; t 为配电变压器向低压线路供电的时间,即低压线路的运行时间; $\cos \varphi$ 为配电变压器二次侧总表处的平均功率因数; K 为线路负荷曲线形状系数; R_{dz} 为低压线路等值电阻; N_j 为第 j 个计算线段线路结构常数,取值方法与 N 相同; $A_{j\Sigma}$ 为第 j 个计算线段供电的所

有低压用户电能表抄见电量之和; $R_j = r_j L_j$, R_j 、 r_j 和 L_j 分别为第 j 个计算线段的导线电阻、单位长度电阻和长度; A_i 为第 i 个 380/220 V 用户电能表的实抄电量; n 为计算线段数量; m 为用户电能表数量。

2 计算低压配电台区理论线损的牛拉法

2.1 数学模型

由式(1)、式(2)可见,用等值电阻法计算理论线损的基础是,由变压器二次侧总表有功供电量得到的线路首端平均负荷电流。由于该总表实测到的有功供电量是低压配电变压器实际供给该台区的全部电量,因此即使该台区有与偷漏电类似的不明电量丢失时,总表有功供电量因包含有这部分电量仍然可以用来确定低压配电台区的理论线损。但此时因总表有功供电量基本不变,由此得到的理论线损与无偷漏电情况下的理论线损相差不大,因此不能很好辨识出线损管理需要的不明线损信息。

正常运行时,用户用电是产生电能损耗的主要因素,低压配电台区理论线损应该与用户电能表实抄电量相匹配。当用户电能表实抄电量与实际用电量不相同,用这些实抄电量得到的理论线损也应不同于用户实际用电量产生的线损。因此可以利用这一信息来辨识是否存在不明电量丢失。

本文基于低压配电台区理论线损应与用户电能表实抄电量相匹配这一基本物理现象,采用用户电能表实抄电量建立计算理论线损的数学模型。此时,在式(1)中,计算线路首端平均负荷电流的公式为

$$I_{av} = (A_{\Sigma} + \Delta A) / (\sqrt{3} U_{av} t \cos \varphi) \quad (4)$$

式中, A_{Σ} 为低压配电台区用户总抄见电量。

在等值电阻法中,确定线路负荷曲线形状系数 K 的方法是,采用线路首端有功供电量求得线路首端平均负荷电流后,再用平均负荷电流查 $K=f(I_{av})$ 关系曲线获得线路负荷曲线形状系数^[3,11]。曲线 $K=f(I_{av})$ 是根据线路供用电峰谷月份的有功供电量分别确定对应的负荷曲线形状系的数值后绘制得到的^[11]。然而,在本文方法中,由式(4)可见,线路首端平均负荷电流要在求得理论线损 ΔA 后才能得到,因此不能用这种方法确定线路负荷曲线形状系数。由文献[3,11]可知,线路负荷曲线形状系数 K 与线路首端有功供电量或平均负荷电流成线性关系。因此可引入负荷形状系数的直线方程来确定负荷形状系数。基于此,其函数关系为

$$K = a I_{av} + b \quad (5)$$

式中, a 和 b 分别为待定系数,可以根据不同性质的负荷查取对应的 $K=f(I_{av})$ 关系来确定。

将式(4)代入式(5)可得

$$K = a(A_{\Sigma} + \Delta A) / (\sqrt{3}U_{av}t \cos \varphi) + b \quad (6)$$

由式(6)可见, 与等值电阻法不同, 本文采用低压配电台区用户总抄见电量和理论线损计算线路负荷曲线形状系数 K , 以反映用户电量对 K 的影响。

低压配电台区变压器二次侧线路常采用三相四线制, 因接入的大量单相负荷, 以及用户用电的随机性都将导致三相负荷不平衡。当三相负荷不平衡时, 中性线产生的损耗将增加线路总线损^[19]。为计及三相负荷不平衡的影响, 将三相负荷不平衡时的理论线损 ΔA 与三相负荷平衡时的理论线损 ΔA_{ph} 的比值^[3]定义为三相负荷不平衡线损修正系数

$$K_1 = \Delta A / \Delta A_{ph} \quad (7)$$

由式(1)、式(5)和式(7)可得

$$\Delta A = I_{av}^2 (aI_{av} + b)^2 NK_1 R_{dz} t \times 10^{-3} \quad (8)$$

因式(8)中已计及 K_1 , 故此处取 $N=3$ ^[3]。

$$\text{令 } C_1 = NK_1 R_{dz} t \times 10^{-3} \quad (9)$$

$$C_2 = \sqrt{3}U_{av}t \cos \varphi \quad (10)$$

将式(9)代入式(8)可得

$$\Delta A = (a^2 I_{av}^4 + 2abI_{av}^3 + b^2 I_{av}^2) C_1 \quad (11)$$

将式(4)和式(10)代入式(11)可得

$$C_2^4 \Delta A = [a^2 (A_{\Sigma} + \Delta A)^4 + 2abC_2 (A_{\Sigma} + \Delta A)^3 + b^2 C_2^2 (A_{\Sigma} + \Delta A)^2] C_1 \quad (12)$$

将式(12)整理后可得

$$f(\Delta A) = d_4 \Delta A^4 + d_3 \Delta A^3 + d_2 \Delta A^2 + d_1 \Delta A + d_0 = 0 \quad (13)$$

其中

$$d_0 = a^2 C_1 A_{\Sigma}^4 + 2abC_1 C_2 A_{\Sigma}^3 + b^2 C_1 C_2^2 A_{\Sigma}^2 \quad (14)$$

$$d_1 = 4a^2 C_1 A_{\Sigma}^3 + 6abC_1 C_2 A_{\Sigma}^2 + 2b^2 C_1 C_2^2 A_{\Sigma} - C_2^4 \quad (15)$$

$$d_2 = 6a^2 C_1 A_{\Sigma}^2 + 6abC_1 C_2 A_{\Sigma} + b^2 C_1 C_2^2 \quad (16)$$

$$d_3 = 4a^2 C_1 A_{\Sigma} + 2abC_1 C_2 \quad (17)$$

$$d_4 = a^2 C_1 \quad (18)$$

由式(13)~式(18)可见, 本文所建模型计算时只需要用户电能表实抄电量, 不需要事先界定用户电能表实抄电量是否与实际用电量相符合。因此求得的理论线损仅与用户电能表实抄电量相匹配。

2.2 三相负荷不平衡线损修正系数的确定

由于低压电网接线复杂, 实际中难以准确辨识用户相别, 因此本文仍采用低压线路首端电流计算三相负荷不平衡线损修正系数。

三相负荷平衡和不平衡时的理论线损分别为

$$\Delta A_{ph} = 3I_{av}^2 K^2 R t \quad (19)$$

$$\Delta A = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) K^2 R t + I_N^2 K^2 (\mu R) t \quad (20)$$

式中: R 和 μ 分别为三相四线制线路的相线电阻和

中性线电阻与相线电阻的比值; I_a 、 I_b 和 I_c 分别为线路首端三相平均电流; I_N 为中性线电流^[19], 如式(21)。

$$I_N^2 = \{(1 + \beta_a)^2 + (1 + \beta_b)^2 + (1 + \beta_c)^2 + 2(1 + \beta_a)[(1 + \beta_b) \cos \theta_b + (1 + \beta_c) \cos \theta_c] + 2(1 + \beta_b)(1 + \beta_c) \cos(\theta_b - \theta_c)\} I_{av}^2 \quad (21)$$

式中: θ_b 和 θ_c 分别为 B 相和 C 相电流滞后 A 相电流的角度; β_a 、 β_b 和 β_c 分别为三相不平衡度:

$$\beta_a = (I_a - I_{av}) / I_{av} \quad (22)$$

$$\beta_b = (I_b - I_{av}) / I_{av} \quad (23)$$

$$\beta_c = (I_c - I_{av}) / I_{av} \quad (24)$$

由式(7)、式(19)~式(24)可得

$$K_1 = (1 + \mu)[(1 + \beta_a)^2 + (1 + \beta_b)^2 + (1 + \beta_c)^2] / 3 + (2\mu/3)\{(1 + \beta_b)(1 + \beta_c) \cos(\theta_b - \theta_c) + (1 + \beta_a)[(1 + \beta_b) \cos \theta_b + (1 + \beta_c) \cos \theta_c]\} \quad (25)$$

2.3 算法的实现

由式(13)可见, 本文方法的数学模型是一个以低压配电台区理论线损为变量的一元四次方程, 可用牛拉法求解该方程。计算步骤如下。

1) 收集所需数据。收集的数据包括低压配电台区的网架结构和参数, 所有用户端电表量测到的电量, 配电变压器二次侧总表处的三相总电量和平均功率因数 $\cos \varphi$ 、以及各相电流和功率因数, 计算线损时段的时间, 台区负荷的性质等。

2) 根据台区负荷性质, 确定线路负荷曲线形状系数与平均电流的关系 $K=f(I_{av})$, 求取系数 a 和 b 。

3) 计算低压配电台区线路的等值电阻。计算前, 按照与等值电阻法相同的原则, 从末端到首端将低压线路划分成若干个计算线段。

4) 计算三相不平衡度, 三相不平衡线损修正系数 K_1 和常数 C_1 和 C_2 , 以及系数 $d_0 \sim d_4$ 。

5) 确定理论线损的初始值和允许误差, 用式(26)~式(28)计算低压配电台区线路的理论线损直到满足给定的允许误差条件为止。

$$f(\Delta A_{(k)}) = d_4 \Delta A_{(k)}^4 + d_3 \Delta A_{(k)}^3 + d_2 \Delta A_{(k)}^2 + d_1 \Delta A_{(k)} + d_0 \quad (26)$$

$$f'(\Delta A_{(k)}) = 4d_4 \Delta A_{(k)}^3 + 3d_3 \Delta A_{(k)}^2 + 2d_2 \Delta A_{(k)} + d_1 \quad (27)$$

$$\Delta A_{(k+1)} = \Delta A_{(k)} - f(\Delta A_{(k)}) / f'(\Delta A_{(k)}) \quad (28)$$

式中, k 为迭代次数。

3 算例分析

分别用等值电阻法和本文方法计算图 1 和图 2 两种接线^[3]在有无偷漏电时的理论线损。

图 1 和图 2 中分数前的数字为线路编号, 分子和分母分别为线路的型号和长度(km)。导线 LJ-16、LJ-25 和 LJ-35 的单位长度电阻分别为 1.98、1.28 和 0.92(Ω/km)。因图中的线路包含单相生活负荷和三相动力负荷, 故本文按 0.4 kV 混合型负荷线路考虑。由文献[3]可查得 0.4 kV 混合型负荷线路的负荷曲线形状系数 $K=f(I_{av})$ 为经过点(0,1.25)的直线。为与文献[3]对比, 由线路首端平均电流和已知的 K 值得 $K=f(I_{av})$ 分别经过点(43.3971,1.16)和(29.9993, 1.17), 据此可得系数 a 分别为 -2.0737×10^{-3} 和 -2.6667×10^{-3} , b 均为 1.25。取零线与相线截面之比为 0.5, 故取 $\mu=2$ 。

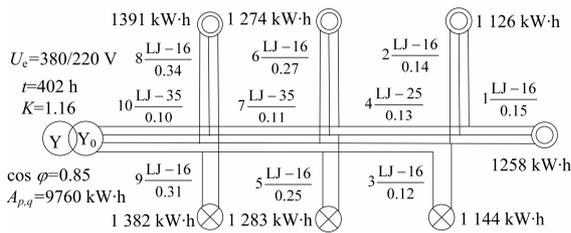


图 1 低压配电台区接线 1

Fig. 1 Wiring diagram 1 of low-voltage distribution transformer district

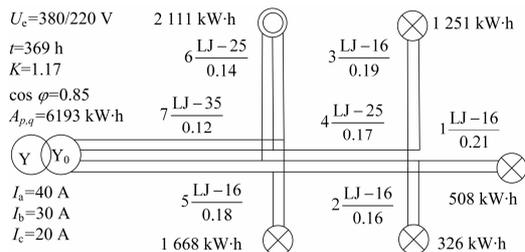


图 2 低压配电台区接线 2

Fig. 2 Wiring diagram 2 of low-voltage distribution transformer district

本文分四种偷漏电量情况进行计算。情况 1 和 2 分别为接线 1 线段 3 的单相负荷和线段 1 的三相负荷有无偷漏电; 情况 3 和 4 分别为接线 2 线段 1 的单相负荷和线段 6 的三相负荷有无偷漏电。计算结果中, 偷漏电量为 0 表示无偷漏电, 此时负荷实抄电量等于实际用电量; 偷漏电量大于 0 表示有偷漏电, 此时负荷实抄电量小于实际用电量。

理论线损率的计算结果分别如图 3 和图 4 所示; 对应的部分理论线损值如表 1 和表 2 所示。由图 3 可见, 偷漏电量从 0 到 500 kW·h 变化时, 等值电阻法和本文方法得到的理论线损率都单调下降。但前者的理论线损率变化很小, 后者的理论线损率变化明显。从表 1 中情况 1 的理论线损结果看, 等值电阻法的理论线损值从 768.6348 kW·h 降到 758.7506

kW·h, 本文方法的理论线损值从 746.1251 kW·h 降到了 654.7202 kW·h。前者仅下降 9.8842 kW·h, 后者下降 91.4049 kW·h。在情况 2 时, 前者下降 16.7865 kW·h, 后者下降 98.2798 kW·h。

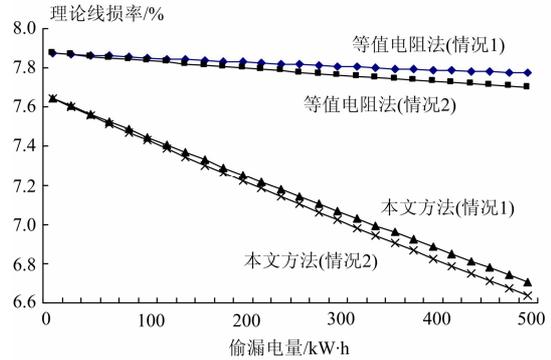


图 3 接线 1 的理论线损率

Fig. 3 Theoretical line loss rate of wiring diagram 1

表 1 接线 1 的理论线损

Table 1 Theoretical line loss of wiring diagram 1

偷漏 电量	等值电阻法的理论线损		本文方法的理论线损	
	情况 1	情况 2	情况 1	情况 2
0	768.634 8*	768.634 8	746.125 1	746.125 1
100	766.314 2	764.836 0	726.891 2	725.258 1
200	764.151 9	761.239 9	708.135 2	704.999 5
300	762.161 0	757.863 9	689.855 6	685.346 3
400	760.355 5	754.726 6	672.051 1	666.295 8
500	758.750 6	751.848 3	654.720 2	647.845 3

注: 等值电阻法的等值电阻为 0.2156 Ω 时的理论线损值。

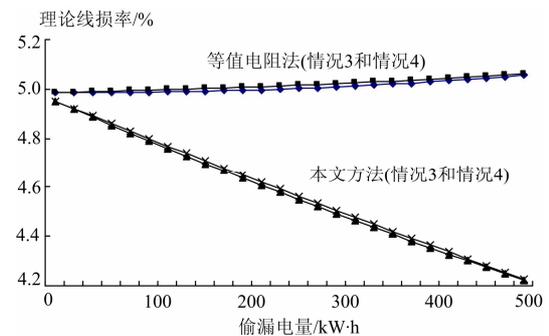


图 4 接线 2 的理论线损率

Fig. 4 Theoretical line loss rate of wiring diagram 2

在图 4 中, 偷漏电量从 0 到 500 kW·h 变化时, 由等值电阻法得到的理论线损率逐渐小幅上升; 而由本文方法得到的理论线损率仍然逐渐下降。由表 2 可见, 等值电阻法的理论线损值从 308.7343 kW·h 分别上升了 4.3698 kW·h 和 4.5922 kW·h; 本文方法的理论线损值从 306.6623 kW·h 分别下降了 45.0551 kW·h 和 44.8515 kW·h。

表 2 接线 2 的理论线损

Table 2 Theoretical line loss of wiring diagram 2

偷漏 电量	kWh			
	等值电阻法的理论线损		本文方法的理论线损	
	情况 3	情况 4	情况 3	情况 4
0	308.734 3	308.734 3	306.662 3	306.662 3
100	308.857 5	309.339 4	296.663 7	297.173 3
200	309.317 5	310.086 2	287.158 4	287.943 0
300	310.151 0	310.988 9	278.146 8	278.972 0
400	311.398 1	312.063 1	269.629 4	270.261 0
500	313.104 1	313.326 5	261.607 2	261.810 8

在图 3 和图 4 中, 本文方法的理论线损率比等值电阻法的理论线损率变化明显的原因是, 存在偷漏电时, 等值电阻法采用的配电变压器二次侧总表处的电量仍然是用户实际的总计量电量, 因此用总表处的电量得到的理论线损变化幅度较小, 不能很好地反映偷漏电量的影响。而本文方法采用用户电量得到的理论线损与存在偷漏电时的用户电量相匹配。随着偷漏电量的增加, 其理论线损变化幅度增大, 因而对偷漏电信息比等值电阻法的敏感度高。

图 5 给出了两种接线的等值电阻。由图 5 可见, 等值电阻在接线 1 的情况 1 和 2 时下降; 而在接线 2 的情况 3 和 4 时上升, 但变化幅度均不大。由于等值电阻法采用恒定的线路首端电量或电流确定均方根电流进而计算理论线损, 因此图 5 中等值电阻略有减小或增大, 将导致图 3 和图 4 中对应的理论线损率也略有减小或增大, 但变化幅度也都不大。

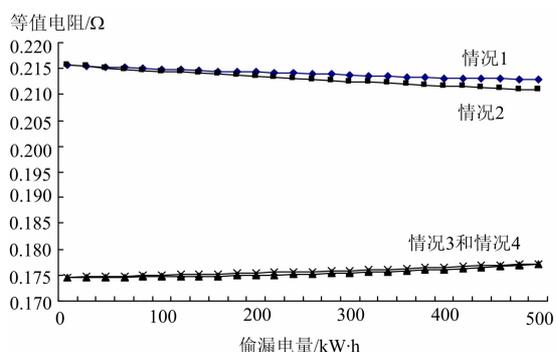


图 5 两种接线的等值电阻

Fig. 5 Equivalent resistances of both wiring diagram

本文方法采用末端用户实抄电量计算均方根电流, 表 3 给出了两种接线的部分均方根电流。由表 3 可见, 情况 1~情况 4 的均方根电流都是逐渐减小的。因情况 1 和 2 的等值电阻和均方根电流都减小, 故图 3 中本文方法的理论线损率也逐渐减小。尽管情况 3 和 4 的等值电阻略有增加, 但在减小的均方根电流作用下对应的理论线损率仍是逐渐减小的。

表 3 两种接线的均方根电流

Table 3 Root-mean-square currents of both wiring diagram

偷漏 电量	接线 1		接线 2	
	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
0	49.598 0	49.598 0	34.981 2	34.981 2
100	49.028 6	49.020 8	34.399 4	34.402 1
200	48.460 4	48.445 4	33.818 6	33.822 8
300	47.893 3	47.871 6	33.239 0	33.243 4
400	47.327 3	47.299 6	32.660 5	32.663 9
500	46.762 4	46.729 3	32.083 2	32.084 3

综上所述, 在有偷漏电情况下, 本文方法采用负荷电量计算得到的理论线损是减小的。这一信息可以用来辨识不明线损。这是因为无论是否存在偷漏电, 配电变压器二次侧总表处抄见电量都反映了低压配电台区的实际用电量。在无偷漏电情况下用户抄见电量减少时, 配电变压器二次侧总表处的有功供电量也将减小, 因而实际线损和理论线损都维持在一个正常水平。当有偷漏电时, 因配电变压器二次侧总表处的有功供电量不变, 用户抄见电量的减少将导致实际线损增大。这时用本文方法计算得到的理论线损却是减少的。偷漏电情况下实际线损的增大和理论线损的减小这一不对应信息可以用来辨识不明线损。而等值电阻法在三相负荷较平衡时得到的理论线损减小量很小, 而在三相负荷不平衡时得到的理论线损却是增大的, 因此不能提供有效的信息来辨识不明线损。

4 结论

本文提出一种采用负荷电量计算低压配电台区理论线损的牛拉法。在引入线路负荷曲线形状系数与平均负荷电流的关系和三相负荷不平衡修正系数基础上建立数学模型。给出了求解该模型的牛拉法的计算步骤。算例结果表明, 本文提出的方法不仅能计算无偷漏电时低压配电台区的理论线损, 而且能够利用远程自动抄表系统采集到的用户电量较为灵敏地提供识别不明线损的信息, 为提高线损管理水平提供依据。

参考文献

- [1] 陈芳, 张利, 韩学山, 等. 配电网线损概率评估及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 39-44.
CHEN Fang, ZHANG Li, HAN Xueshan, et al. Line loss evaluation and application in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 39-44.
- [2] 汪永华, 王正风. 基于 SCADA/EMS 的负荷实测与网损在线计算的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 96-100.

WANG Yonghua, WANG Zhengfeng. Research and application of power load measurement and on-line power network loss compute based on SCADA/EMS system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 96-100.

[3] 廖学琦, 郑大方. 城乡电网线损计算分析与管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 1-88.

[4] 吴安官, 倪保珊. 电力系统线损分析与计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 6-16.

[5] 叶云, 王主丁, 张宗益, 等. 一种规划态配电网理论线损估算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 82-86. YE Yun, WANG Zhuding, ZHANG Zongyi, et al. An estimation method of energy loss for distribution network planning[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 82-86.

[6] 彭建春, 李春晖, 祁学红, 等. 基于快速独立成分分析和支持向量回归的混合馈线线损估算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 51-55. PENG Jianchun, LI Chunhui, QI Xuehong, et al. Loss estimation of power distribution systems based on fast independent component analysis and support vector regression[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 51-55.

[7] 刘成祥. 竹节法在低压理论线损计算中的运用[J]. 大众用电, 2005(6): 28-29. LIU Chengxiang. Application of "bamboo burl" method for the computation of low-voltage theoretical line loss[J]. Popular Utilization of Electricity, 2005(6): 28-29.

[8] 董继征, 陈洪云, 何怡刚. 基于负荷分类的台区线损测算方法[J]. 现代电力, 2006, 23(1): 44-48. DONG Jizheng, CHEN Hongyun, HE Yigang. Method for calculating transformer district line loss based on load classification[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(1): 44-48.

[9] 王凌, 许跃进. 基于实际线路结构的低压电网线损计算[J]. 继电器, 2007, 35(19): 16-21. WANG Ling, XU Yuejin. Method for calculating low voltage district line loss based on actual network structure[J]. Relay, 2007, 35(19): 16-21.

[10] 郭峰, 姚莉娜, 刘恒, 等. 引入三项不平衡度的低压电网理论线损计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 51-54. GUO Feng, YAO Lina, LIU Heng, et al. Theoretical line loss calculation with three-phase unbalance degree for low-voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 51-54.

[11] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 农村电网节电技术规程(DL/T 738-2000)[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[12] 朱紫钊, 叶发新. 一种低压配电网理论线损计算的改进算法[J]. 电测与仪表, 2012, 49(11): 6-10, 70. ZHU Zizhao, YE Faxin. Improved method for theoretical line loss calculation of low-voltage distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(11): 6-10, 70.

[13] 王彪, 郑涛, 倪斌, 等. 计及三相负荷不平衡的农村低压配电网理论线损计算[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 81-85. WANG Biao, ZHENG Tao, NI Bin, et al. Theoretical line loss calculation of rural low-voltage distribution network considering unbalanced three-phase loads[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(1): 81-85.

[14] 杨丽徙, 刘辉, 张鸿雁, 等. 低压电网线损计算中的改进形状系数法[J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(4): 29-32. YANG Lixi, LIU Hui, ZHANG Hongyan, et al. Improved load shape coefficient method in low voltage line loss calculation[J]. Power Demand Side Management, 2009, 11(4): 29-32.

[15] 徐久荣, 刘俊, 付泽勋, 等. 低压配电网的结构特点与理论线损计算[J]. 电力与能源, 2013, 34(4): 356-359. XU Jiurong, LIU Jun, FU Zexun, et al. Characteristics and theoretical line loss computation of low-voltage distribution networks[J]. Power & Energy, 2013, 34(4): 356-359.

[16] 黄益庄, 李树军. 配电网智能监控管理远程抄表一体化系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 83-86, 90. HUANG Yizhuang, LI Shujun. Integrated system with intelligent monitoring management and remote metering for power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 83-86, 90.

[17] 龚静. 配电网综合自动化技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2014: 199-200.

[18] 赵兵, 吕英杰, 邹和平. 一种新型防窃电装置的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 116-118, 184. ZHAO Bing, LÜ Yingjie, ZOU Heping. Design of a new anti-stealing electricity device[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 116-118, 184.

[19] 张五一, 张言滨, 刘华伟. 配电网三相负荷不对称的线损分析[J]. 继电器, 2007, 35(7): 24-27. ZHANG Wuyi, ZHANG Yanbin, LIU Huawei. Circuit loss analysis of three-phase unbalanced circuit in distribution network[J]. Relay, 2007, 35(7): 24-27.

收稿日期: 2014-12-21; 修回日期: 2015-03-13

作者简介:

刘庭磊(1982-), 男, 工程硕士, 工程师, 从事配电网规划和运行的管理工作;

王 韶(1956-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 从事电力系统规划与可靠性、电力系统运行与控制方面的研究; E-mail:wangshao100@163.com

张 知(1990-), 男, 硕士研究生, 从事配电网规划方面的研究。

(编辑 姜新丽)