

配电网精细化线损检测与分析方法研究

董永乐,张江,张理放,张祺

(内蒙古电力科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:针对我国目前电力需求因素增多,而基于人工经验的传统配电网静态模型及调整模式工作效率低,不能满足配电网精细化线损等高级应用实际需求的问题,提出以巴盟某几个台区为试点,通过从跨平台海量数据中提取的负荷数据、遥信数据,构建10 kV馈线线损模型、台区线损模型和台区分支线损模型。开发自动拓扑校验技术的线损精细化系统,让线损指标可视化。通过对比传统方法与所提方法的10 kV线损,得到了所提方法在一定程度上有优势的结论。

关键词:配电网;精细化线损;建模;数据可视化

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23543

Research on Refined Line Loss Detection and Analysis Method of Multi Source Data in Distribution Network

DONG Yongle, ZHANG Jiang, ZHANG Lifang, ZHANG Qi

(Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010020, Nei Monggol, China)

Abstract: In view of the increasing factors of power demand in our country, and the low efficiency of traditional static model and adjustment mode of distribution network based on artificial experience, which can not meet the practical needs of high-level applications such as refined line loss of distribution network. It was proposed to take a certain station area in Bameng as a pilot, and build 10 kV feeder line loss model, substation area line loss model and substation area branch line loss model through load data and remote signaling data extracted from cross platform massive data. A line loss refinement system with automatic topology check technology was developed to visualize the line loss index. By comparing the 10 kV line loss between the traditional method and the proposed method, it was concluded that the proposed method has advantages to a certain extent.

Key words: distribution network; fine line loss; modeling; data visualization

低压配电系统^[1]是电能输送的最后环节,可以为用户直接供电。因此,配电线路的稳定性与运行质量对供电质量的影响就显得尤为重要。然而,电路从供电站到用户的途中需要经过很长线路及很多电力设备,会对电能产生一定的消耗,造成损失,尤其是电力线路及设备中的电阻会额外增加能源的消耗,出现浪费电力资源的现象,这不仅影响用户的体验,更影响供电企业的经济效益,阻碍了社会生产力的发展。

根据相关数据分析表明,我国配电网在35 kV及以上的线损率较低,与国际水平相当,但是在10 kV及以下的电压等级上线损比国际高6%左右,这主要是因为我国城乡差距大,电网结构复杂,负荷种类多,用电时间段较集中。10 kV与

380 V相比,相同条件下,10 kV配电网的线损远大于380 V电网^[2]。线损大受很多因素影响,很多地区缺乏精准的监测设备,通过人工统计的时间段模糊不确定,统计范围不确定,导致最后计算的线损不符合实际情况,或高得离谱,或存在负线损的情况。而且在供电的过程中存在偷电、漏电等异常状况,导致无功配置不符合实际状况,三相电压不平衡^[3-5]等高线损状态,是对电能源的浪费。为此,各电力企业均加大对线损的研究力度,以求得到线损成因并制定简单有效的线损控制措施,降低线损。

针对目前存在的问题,本文以巴盟某几个台区为试点,通过从跨平台海量数据中提取的负荷数据、遥信数据,构建10 kV馈线线损模型、台区

基金项目:内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目(2020-02)

作者简介:董永乐(1975—),男,本科,高级工程师,Email:15335577499@126.com

线损模型和台区分支线损模型,开发自动拓扑校验技术的线损精细化系统,让线损指标可视化。通过对比传统方法与本文方法的10 kV线损,得到本文方法在一定程度上有优势的结论。

1 配电网线损计算方法

线损是电能从发电厂输送到客户端过程中,在输、变、配、销这4个环节中所产生的电能损耗和损失。它不仅体现了供配电中的运行质量问题,还标志着供配电的技术程度水平,是供电部门主要的技术经济考核指标。

1.1 配电网的基本结构

图1为10 kV配电网结构示意图。10 kV配电网主要由10 kV线路、10/0.4配电变压器和0.4 kV线路等组成。主要由出线柜、分支箱、电表箱、智能电表组成,通过此拓扑网络可以采集出线柜电流有效值、分支箱出线电路有效值、电表箱进线电流有效值。

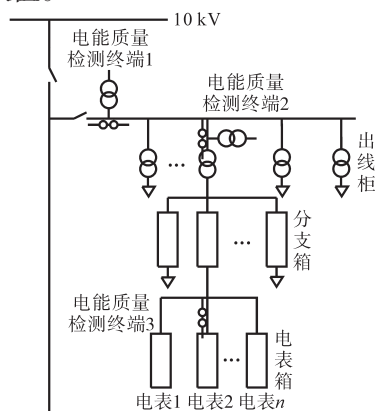


图1 10 kV配电网结构示意图简图

Fig.1 Schematic sketch of 10 kV distribution network structure

图1中,电能质量监测终端1分别监测10 kV线路首、末端运行数据;电能质量监测终端2监测配变高、低压侧的电能质量指标和电能损耗数据;电能质量监测终端3监测实时三相不平衡度。

1.2 传统线损计算方法

统计线损率是各网和省、地市供电部门对所管辖(或调度)范围内的电网各供、售电量计量表统计得出的线损率,如下式:

$$\Delta A_1 = (A_{\text{正}} - A_{\text{反}}) / A_{\text{正}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔA_1 , $A_{\text{正}}$, $A_{\text{反}}$ 分别为统计线损率、供电量和售电量。

10 kV线损计算一般规定方法有均方根电流法、平均电流法、最大电流法和等值电阻法^[6-7]。低压配电网常采用等值电阻法。

等值电阻法本质是均方根电流法,适合于数

据收集难、精度要求不高的10 kV及以下配电网理论线损计算,在计算过程中假设条件太多,精度明显低,但其只需统计线路出口处的电流、电压值,获取容易,且易于计算机编程计算,但这种方法得到的电能损耗常小于实际电能损耗。配电线路的等值模型如图2所示。

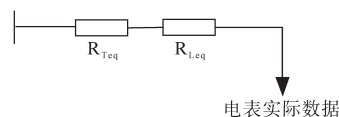


图2 电阻等效模型

Fig.2 Resistance equivalent model

若已知馈线首端的均方根电流 I_{rms} ,则配电网总的可变损耗为

$$\Delta A = 3I_{\text{rms}}^2 R_{\text{eq}} = 3I_{\text{rms}}^2 (R_{\text{Teq}} + R_{\text{Leq}}) \quad (2)$$

式中: R_{Teq} 为配电变压器等值电阻; R_{Leq} 为配电线路等值电阻。

传统线损计算方法本质是将各节点难以测量的数据近似为较易得到的数据,在统计数据较少的情况下可以粗略计算线损,其计算精度低、人工记录数据效率不高,在配电网复杂的情况下与实际损耗相差甚远。

通过等值电阻法计算得到的线损率均值大约为4.40%。随着电能智能化,大量电力电子装置逐渐进入配电网,如果不能准确地计算线损,不利于整体调控,会对电力系统的供配电及经济运行产生一定的影响。

2 配电网精确线损分析

潮流基本模型是根据各母线注入功率计算各母线电压和相角,母线分为三种类型: $P-Q$, $P-V$ 和 $V-\theta$ ^[8]。潮流方程即母线注入方程,基本潮流计算求出各母线的状态量,即满足上述潮流方程,是一个高维数的非线性方程组问题。此方法是目前主流的线损计算方法。

2.1 配电网前推回代法算法

潮流计算^[9-10]可以得到配电网中各负荷节点的电压和整条线路的线损,常分为电力法和电量法。电力法是根据每小时电源点、负荷点的有功功率和无功功率,结合配电网拓扑结构及元器件参数进行潮流计算,得到各节点电压,从而计算每条支路的有功损耗^[11];电量法是根据电源点、负荷点的日出力曲线及负荷曲线将24 h有功电量和无功电量折算成24 h功率,形成24 h各个节点的有功功率和无功功率^[12],并用与电力法相同的

方法得到配电网的线损电量。潮流法计算精度高,能处理各种运行方式,但是收敛性能差,计算难度大。而前推回代法计算精度较好,是计算配电网潮流的有效方法之一,但无法处理环网供电的运行方式。

前推回代法^[13-14]能计算出各个节点电压和各支路电流,进而计算配电网电能消耗,如下式:

$$\Delta A = (\sum \Delta A_0 + \sum I_{ij}^2 \cdot R_{ij})T \quad (3)$$

其中

$$I_{ij} = I_j + \sum_{m=1}^n I_{jm}$$

式中: I_{ij} 、 R_{ij} 为节点*i*到节点*j*之间支路的电流有效值、电阻; I_j 、 I_{jm} 分别为电网注入节点*j*的电流、节点*m*与*j*直接相连支路电流; T 为总时间。

配电网始末端各节点电压如下式:

$$U_j = U_i - I_{ij}Z_{ij} \quad (4)$$

式中: U_i 、 U_j 分别为节点*i*、*j*的电压; Z_{ij} 为节点*i*、*j*之间的阻抗。

本文通过从融合各终端采集的各种数据信息及第三方数据接入,获取设备台账、设备负荷、各分支电流、电压、电量等,创建网络拓扑模型,并基于实时采集的数据,设计相别模型,进行相别识别算法研究,并对线损做精细化的分段、分相别线损计算。

2.2 配电网线损检测

2.2.1 电压差法测线损

配电系统常呈辐射状结构或开环、环网的结构,这两种方式在运行时实质是树状结构。在配电网中智能电表侧为树状结构的叶节点,上游的各节点则对应于中间节点或根节点。

图3为低压配电网的局部拓扑示意图。假设用户均为单相用户,用户旁的名称为用户节点在此示意图中的编号及所属相位(如“3b”为用户编号为3,所属相为B相)。公共点为用户端线路与低压配网二次侧供电线路的连接点,其下面可以连接用户电表节点(如P2,P3)。对于用户节点,通过电表采集的电流侧、电压侧数据及用户段线路参数来计算公共点对应相电压(如用户节点1到P1的A相)。根据欧姆定律得:

$$U_{PCg} = U_g + Z \cdot I_g \quad (5)$$

式中: g 为与用户相关的电表编号; I_g 、 U_g 、 Z 分别为智能电表在规定时间间隔的用户平均电流、平均电压、阻抗; U_{PCg} 为编号*g*电表通过计算得到的与上游直接相连的公共点对应的相电压。

中间节点(如P2到P1)的计算公式如下:

$$U_{PCk3} = U_{k3} + Z_{mat} \cdot I_{k3} \quad (6)$$

式中: k 为下游中间节点编号; I_{k3} 、 U_{k3} 、 Z_{mat} 分别为三相电流向量、电压向量、3×3阻抗矩阵; U_{PCk3} 为节点*k*向上计算得到的上游直接连接的公共点处三相电压向量。

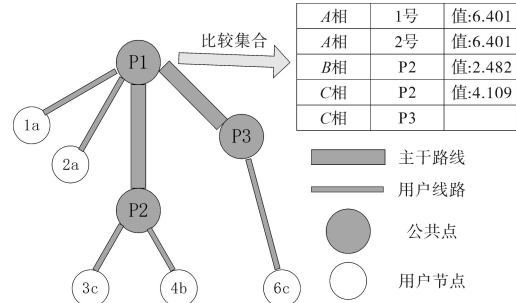


图3 低压配电网拓扑示意图

Fig.3 Schematic diagram of low-voltage distribution network topology

2.2.2 各节点之间线损计算

拓扑各节点之间线损计算,本文涉及出线柜、分支箱、电表箱各节点,利用下面方法进行计算:

1)端与端线损率计算。采集出线柜、分支箱和电表中有功电压、电流信息,分段线损计算如下式:

$$A_5 = (A_1 - B_1)/A_1 \times 100\% \quad (7)$$

$$A = A_2 + A_3 + A_4 - B_2 \quad (8)$$

式中: A_5 、 A_1 、 B_1 分别为分段线损及A、B端供电量; A 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 B_2 分别为供电量、厂供电量、电网送入电量、购入电量、过网电量。

2)出线柜到分支箱线损计算。分支箱感知终端采集各分支箱的进线有功电流,出线柜感知终端采集各出线有功电流,比对出线总电量和出线下级各分支箱的电量,从而计算线损差异。

3)分支箱到表箱线损计算。表箱感知终端采集进线有功电流、电表箱里所有电表的采集有功电流总和,比对两个统计电量,从而计算线损的差异。

4)用户侧线损计算。表箱感知终端采集进线有功电压电流、电表箱里单电表的采集有功电压电流,计算线损差异。

2.3 低压配电网精确线损流程

低压配电网精确线损流程图如图4所示,其中*T*为测试时间段内通过电表采集的时间总数。本文线损分析过程主要由以下4个部分组成:

1)初始化。采集用户电压电流数据、线路阻抗及网络拓扑信息等信息。

2)电损检测。利用采集的信息,通过电压差法检测低压配电网中的电损情况,并对窃电路段

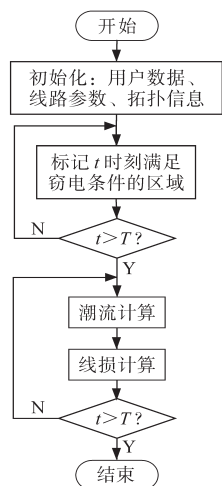


图4 低压配电网线损流程图

Fig.4 Flow chart of line loss of low voltage distribution network

进行标记。为简化计算,在计算用户节点的相电压时先不考虑相角,而在计算非用户节点电压时,各相电压均取标准相角^[15]。

3)潮流计算。假设用户侧功率不变,通过采集的用户、拓扑和线路等数据信息利用前推回代法^[12]进行三相潮流计算(各节点电流、电压不取标准相角)。对设定的采样时刻区域,在判定电损的地方用窃电检测中估算的真实电流值计算,而其他地方采用智能电表采集的电流值计算,从用户节点到根节点依次计算各支路各相电流,每条支路的某相电流均由该支路直接相连的下游支路该相电流累加得到,依次类推,直到计算至根节点^[15]。随后,在每次迭代中从根节点开始逐步向下计算各支路末端的节点电压(末端节点电压由首端节点电压、支路电流、阻抗计算得到),依次类推。计算到用户点时,更新用户电流。若迭代误差小于设定阈值,则结束;否则,更新支路电流,继续迭代^[15]。

4)线损计算。在三相四线制低压配电线路中,当三相负荷电流平衡时,零线电流为零;当三相负荷不平衡时,零线中会有电流通过,且零线截面积较小,故线损增大^[16]。线损计算公式为

$$\Delta P = [(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)R + I_0^2 R_0] \times 10^{-3} \quad (9)$$

其中

$$R_0 = 2R$$

式中: ΔP 为三相负荷电流在不平衡时线路线损, kW; I_0 为零线电流, A; I_A, I_B, I_C 为三相负荷电流, A; R, R_0 分别为相线电阻、零线电阻, Ω 。

2.4 各相线损计算可视化

以巴彦淖尔为试点,通过线损建模所构建的10 kV馈线线损计算线损值对照结果如表1所示。

表1 各相线损值比较

Tab.1 Comparison of line loss of each phase

线段	线损/(kW·h)		
	本文方法	传统方法	实际
1#台区A相线	3.78	3.56	4.07
1#台区B相线	1.62	1.55	1.73
1#台区C相线	3.52	3.49	3.64
2#台区A相线	0.52	0.51	0.535
2#台区B相线	3.52	3.46	3.62
2#台区C相线	0.52	0.51	0.534

由表1可知,与实际消耗情况相比较,本文计算得到的各相线损值更贴近于实际消耗线损值,而采用传统方法得到的线损值相较于实际消耗的电能偏小,误差更大。

在测试线段区本文方法和传统方法的线损率对比图如图5所示。

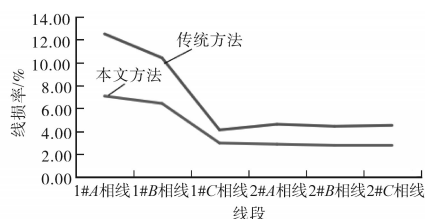


图5 各相线损率比较

Fig.5 Comparison of phase line loss rates

由图5可知,在1#台区A相线、1#台区B相线的线损率明显高于其他几个线段值,表明这两个线段的线损发生异常,需要及时对其进行处理。

图6为内蒙古某地某日10:00—21:00三相的线损分布图,表2为线损详情。

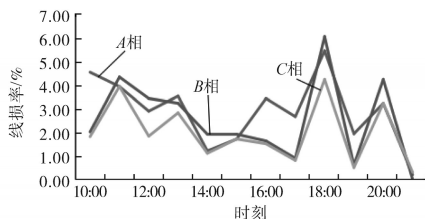


图6 线损趋势图

Fig.6 Line loss trend graph

表2 台区线损详情

Tab.2 Line loss details

线段	线损值/(kW·h)	线损率/%	告警
1#台区A相线	3.78	7.07	分支箱窃电
1#台区B相线	1.62	6.42	电表箱窃电
1#台区C相线	3.52	2.95	无
2#台区A相线	0.52	2.85	无
2#台区B相线	3.52	2.75	无
2#台区C相线	0.52	2.70	无

3 结论

综上所述,本文以巴盟某几个台区为试点,

通过采集的负荷数据,首先计算传统方法与本文方法各相线损,得到本文方法更贴近于实际线损消耗;其次对比本文方法和传统方法得到线损率对比图,显示本文方法得到的线损率降低;最后在系统平台实现线损数据可视化。通过优化线损计算方法,使得线损能更贴近于实际情况,使企业在解决供电经营方面的问题及对企业把握电损实况、提高经济效益具有积极的促进作用。

参考文献

- [1] Xu Yin, Liu Chenchong, Schneider K P, *et al.* Microgrids for service restoration to critical load in a resilient distribution system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 426-437.
- [2] 张义涛, 王泽忠, 刘丽平, 等. 基于灰色关联分析和改进神经网络的 10 kV 配电网线损预测[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1404-1410.
Zhang Yitao, Wang Zezhong, Liu Liping, *et al.* Line loss prediction of 10 kV distribution network based on grey relational analysis and improved neural network[J]. Power Grid Technology, 2019, 43(4): 1404-1410.
- [3] 怀全, 侯小虎, 何良策, 等. 一种含分布式电源的中低压配电网状态估计方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 69-77.
Huai Quan, Hou Xiaohu, He Liangce, *et al.* A state estimation method for medium and low voltage distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 69-77.
- [4] 谢荣斌, 杜帆, 程湘, 等. 三相不平衡及谐波对三相四线低压配电网线损的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 22-30.
Xie Rongbin, Du Fan, Cheng Xiang, *et al.* Influence of three-phase unbalance and harmonics on line loss of three-phase four-wire low-voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 22-30.
- [5] 秦勇明, 张伟, 周荣, 等. 基于径向基函数神经网络的低压配电网三相不平衡附加线损研究[J]. 电气自动化, 2019, 41(5): 45-48.
Qin Yongming, Zhang Wei, Zhou Rong, *et al.* Research on three-phase unbalanced additional line loss of low-voltage distribution network based on radial basis function neural network [J]. Electrical Automation, 2019, 41(5): 45-48.
- [6] 曾江, 李石东. 分时域 10 kV 配电网极限线损计算分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 1-4, 22.
Zeng Jiang, Li Shidong. Calculation and analysis of limit line loss of 10 kV distribution network in time domain[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2019, 56(14): 1-4, 22.
- [7] 李琼林, 刘书铭, 谭甜源, 等. 等值电阻法计算配网损耗的误差量化分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 156-165.
Li Qionglin, Liu Shuming, Tan Tianyuan, *et al.* Quantitative analysis of error in calculating distribution network loss by equivalent resistance method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 156-165.
- [8] Alturki Y A, Lo K L. Real and reactive power loss allocation in pool-based electricity markets[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(4): 262-270.
- [9] 初壮, 白望望, 李钊. 考虑负荷电压静特性的有源配电网潮流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(10): 111-116, 144.
Chu Zhuang, Bai Wangwang, Li Zhao. Power flow calculation of active distribution network considering static characteristics of load voltage[J]. Journal of Power System and Automation, 2018, 30(10): 111-116, 144.
- [10] Chitsaz H, Amjadi N, Zareipour H. Wind power forecast using wavelet neural network trained by improved clonal selection algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89(1): 588-598.
- [11] 张永凯, 马欢, 张伟, 等. 计及峰谷分时的配电线路同期月线损预测方法及应用[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(10): 67-73.
Zhang Yongkai, Ma Huan, Zhang Wei, *et al.* Prediction method and application of monthly line loss in the same period considering peak valley time sharing[J]. Power Grid and Clean Energy, 2017, 33(10): 67-73.
- [12] 胡瑛俊, 章坚民, 刘大业. 基于前推回代法和量测数据资源的多电源供电配电网线损计算[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(12): 55-59.
Hu Yingjun, Zhang Jianmin, Liu Daye. Line loss calculation of multi power supply distribution network based on forward backward substitution method and measurement data resources[J]. Power Automation Equipment, 2009, 29(12): 55-59.
- [13] 董张卓, 张倍倍, 刘魁, 等. 有源配电网新前推回代潮流计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 101-107.
Dong Zhangzhuo, Zhang Beibei, Liu Kui, *et al.* Calculation method of new forward push back generation power flow of active distribution network[J]. Journal of Power System and Automation, 2019, 31(12): 101-107.
- [14] Diaz G, Gomez-Aleixandre J, Coto J. Direct backward/forward sweep algorithm for solving load power flows in AC droop-regulated microgrids[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2016, 7(5): 2208-2217.
- [15] 赵磊. 基于AMI和SCADA数据的中低压配电网线损分析[D]. 天津: 天津大学, 2016.
Zhao Lei. Line loss analysis of medium and low voltage distribution network based on AMI and SCADA data[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [16] He Jun, Zhou Buxiang, Zhang Qin, *et al.* Improved power flow algorithm for distribution networks based on Zbus algorithm and forward/backward sweep method[C]//2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology, 2012.

收稿日期: 2021-05-22

修改稿日期: 2021-06-29