

# 基于窄带物联网（NB-IOT）的低压配电用户侧状态评估技术研究

赵 辉，支瑞峰，徐保红，左琪刚

（国网天水供电公司，甘肃 天水 741000）

**摘要：**随着配电网负荷的快速发展，用户对供电可靠性要求越来越高。目前，供电公司对低压侧供电回路末端状态信息主要依赖用户停电后打入的“95598”客服电话，配合配电网自动化、停电管理等系统进行低压网络故障处理。同时，只能根据停电用户的描述来预判跌落保险或开关的位置，对停电规模、人员力量和抢修计划进行分析，确定抢修优先级，计算现场所需工作力量，预估恢复时间，并管理现场工作。故障处理普遍存在故障判断不全面、抢修不及时、工作强度高和实施成本高等现象。如何快速、准确和全面地采集低压侧供电回路状态信息就显得尤为重要。因此，需要深入研究低压用户侧供电回路状态评估及故障预警技术，实时掌握配电网低压侧供电回路运行状态信息。

**关键词：**阻抗监测；供电回路状态评估；故障预警及判断

## Low voltage power distribution user side state assessment based on narrowband Internet of things (NB-IOT) Technology research

ZHAO Hui, ZHI Ruifeng, XU Baohong, ZUO Qigang

(Tianshui Power Supply Company of State Grid Gansu Electric Power Company, Tianshui 741000, China)

**Abstract:** With the rapid development of distribution network load, users have higher requirements for power supply reliability. At present, the power supply company mainly relies on the “95598” customer service phone number dialed by users after power outages for low-voltage side power supply loop terminal status information, and cooperates with distribution network automation and power outage management systems to handle low-voltage network faults. At the same time, it is only possible to predict the location of the fall fuse or switch based on the description of the power outage user, analyze the scale of the power outage, personnel strength, and emergency repair plan, determine the priority of emergency repair, calculate the work force required on site, estimate the recovery time, and manage it field work. In troubleshooting, there are common phenomena such as incomplete fault judgment, delayed repairs, high work intensity, and high implementation costs. How to quickly, accurately and comprehensively collect the status information of the low-voltage side power supply loop is particularly important. Therefore, it is necessary to in-depth study of low-voltage user-side power supply loop status assessment and fault warning technology, and real-time grasp of the operating status information of the low-voltage side power supply loop of the distribution network.

**Key words:** impedance monitoring; power supply loop status evaluation; fault warning and judgment

## 0 引言

电网运行状态的评估是对电网安全运行监测

的一种必要手段，对电网的运行状态进行评估，不仅可以对电网运行的实时运行状态进行分析，

而且还能对之前的历史数据进行分析,也可以对电网未来的运行状态进行分析评估。通过各种评估手段可以对电网的运行进行筛查,找出电网运行中的薄弱环节,并对其进行修改,降低电网运行的风险,保证电网安全可靠的运行。目前针对电网运行状态的评估有很多,但是其中大部分都是针对输电网领域和中高压配电网的领域,对低压配电网的安全运行评估的研究很少。对于通常所熟知的一般高压输电网来说,这种电网包含了对数据精准完备的采集。通过这些数据,可以从多种角度对输电网运行设备、运行状态进行分析。中压配电网采集到的数据是较为完整的,也可以根据这些数据对其进行评估。

对比高压配电网和中压配电网来看,低压配电网的用户数不胜数,因此也就使得低压配电网的供电线路比中高压配电网要复杂得多,并且低压配电网的供电线路相比较是最为复杂的,线路的质量也存在各种差异,线路上的一些设备会存在不定时的异动。正是因为这些种种的小原因,累加在一起也就导致了一直以来对低压配电网的电网图形、模型很难有一个准确、有效的测量和绘制。并且对于目前的低压配电网来说,因为其线路末端缺少对量测采集装置的配备,仅仅在用户侧安装了智能电能表,导致数据不全面,所以当前对于中高压配电网来说,输电网络的运行状态评估和低压配电网的运行状态评估之间存在一定的差异,对于低压配电网运行状态的评估有着其自身的特点。

目前所统计的数据显示,在国家电网系统的内部已经有26家省公司和76家地市公司对配电自动化开始了建设。截至目前,通过省公司及地市公司的不断建设,已经建设了10 kV的输电线路3.9万条。这些线路主要是建设在网架结构相对成熟的地区,这一举措也使得配电网的自动化覆盖率达到16.2%,对于平常的倒闸操作和非故障地区的恢复供电时间来说,所需的操作时间也大幅度减少。

由此可见,国内配电网自动化研究及应用主要集中在中压侧,在低压供电回路状态评估及故

障预警技术方面的应用还处于空白。

## 1 窄带物联网

### 1.1 窄带物联网的定义

众所周知,互联网具有一个重要的分支——窄带物联网。而且,目前来看,窄带物联网已经成为了低功耗广域的标准,而这一标准的成立,通过了3GPP组织的肯定。窄带物联网名字的由来是因为其自身是一种针对于物联网涉及的窄带射频技术<sup>[1]</sup>,而窄带物联网的主要特点包括室内覆盖、成本较低、功耗较低和连接范围广等。正是因为其种种特点,从而使得窄带物联网可以在GSM网络和LTE网络中广泛应用。

### 1.2 窄带物联网的应用

对目前的社会来说,物联网拥有着巨大的潜力去改变一个企业甚至整个城市,其对于社会的经济效益具有很大的影响力。但与此同时,安全稳定的连接是能够捕捉到全部潜在物联网的首要前提,在此之上还可以进行更深层次的合作<sup>[2-3]</sup>。对于窄带物联网的应用主要还是基于它自身端对端的解决方案,针对低数据速率、大规模的终端数目以及广覆盖要求等典型的M2M应用场景,使得窄带物联网具有非常广阔的市场。

### 1.3 窄带物联网的优势

早在前几年,WiFi和蓝牙技术是窄带物联网的技术支撑,这也就导致了在当时窄带物联网具有很低的传输速率,同时也会消耗大量的电能。但是相比之下,广域的互联网所采用的光纤在使用过程中会带来极大的优势,但是也只是适用于连接摄像头之类的宽带终端。而普通的2G/3G/4G对于低容量的传感器来讲是仍然适用的,但是对于低功耗成本这一要求来讲还是比较困难的。基于以上种种原因,2016年仅仅只有6%的物联网终端选择接入到运营商网络。若是想让整个城市都成为一个大的网络结构,那就需要运营商的配合。这也就催生了NB-IOT技术,基于其自身的各种特点,使得NB-IOT在智能门

窗等方面有着非常广阔的市场前景。物联网架构图如图1所示。

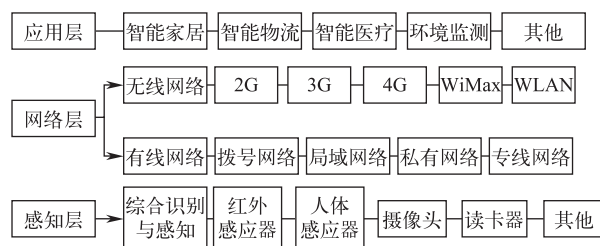


图1 物联网架构图

Fig. 1 Internet of things architecture

在NB-IOT的优势中, 首当其冲的就是它自身的并发连接数是之前的数倍。并且在最新的NB-IOT标准中, 能够实现的最大的并发连接数是5万个。正是因为这些连接数的增多, 才使得NB-IOT技术能够对频谱资源进行更深层次的效率利用<sup>[4-5]</sup>。

除去增多的并发连接数, 在NB-IOT技术中能够引起人们广泛关注的就是增强的覆盖度。众所周知, 针对物联网技术来说, 封闭固定的应用场景是经常能够遇见的, 所以由于其工作的环境导致对最弱的网络信号的探测能力提出了非常严格的要求。但是在NB-IOT中这种覆盖灵敏度得到了大幅度的增强, 可以达到之前的10倍之多。

最后, 值得注意的是, NB-IOT技术对功耗实现了大幅度的降低, 就目前的功耗而言, 只达到了2G的10%, 而且在未来还能够对其进行进一步的提升。

总的来说, NB-IOT因为其自身的超低功耗及低成本, 可以使其在智能家居、智慧电能表等方面拥有极其广阔的市场。但是在此之前, 物联网与LTE之间一直存在着技术上质的差距<sup>[7]</sup>, NB-IOT技术的出现刚好解决了技术上的难题, 并且为物联网与LTE网络之间的合作提供了无限的可能。

## 2 低压侧供电回路状态评估

利用低压配电用户侧状态评估终端对配电网用户侧的运行状态进行有效监测, 可以尽早判断故障的类型, 精准确定故障的方位, 并对故障点进行维修, 以此来减轻故障带来的损失, 提升工

作效率及用户满意度, 进一步提高供电可靠性。对低压侧供电回路的状态评估的目的是实现故障预判, 即当低压侧用户阻抗计量值过大时, 及时报警, 根据计量值的越限程度预判故障类型, 发现用户侧存在的潜在风险。配电台区阻抗示意图如图2所示。

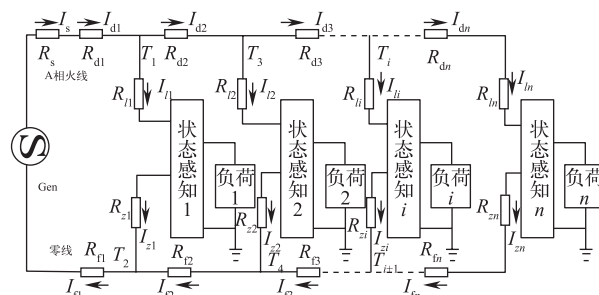


图2 配电台区阻抗示意图

Fig. 2 Impedance diagram of distribution station area

由图2可看出, 每个状态感知终端通过T接线路、负荷与配电变压器形成回路。其中, Gen为配电变压器等效电源;  $R_s$ 为配电变压器等效阻抗;  $R_{d1}$ 为配电变压器A相出线至用户侧T接点 $T_1$ 的低压线路等效阻抗;  $T_i \sim T_{i+1}$ 表示用户侧通过状态感知终端接入A相火线和零线的接入点; 虚线表示接入 $i=(1, 2, \dots, n)$ 个用户侧智能电能表;  $R_{d2}$ 、 $R_{d3}$ 和 $R_{dn}$ 为A相火线相邻用户侧T接点之间的等值阻抗,  $R_{f1}$ 为变压器零线出线至用户侧T接点的低压等效阻抗;  $R_{f2}$ 、 $R_{f3}$ 和 $R_{fn}$ 为零线相邻用户侧接点之间的等效阻抗; 状态感知终端表示接入低压线路的用户侧电能表; 负荷表示用户侧低压用户的等效负荷;  $R_{fi}$ 为状态感知终端在火线的接入点 $T_i$ 与状态感知终端之间的等效阻抗;  $R_{zi}$ 为状态感知终端在零线的接入点与状态感知终端之间的等效阻抗;  $I_s$ 、 $I_{di}$ 、 $I_{fi}$ 、 $I_{zi}$ 和 $I_{fi}$ 为流过各阻抗的电流值。

各用户的阻抗随着各个时刻用电设备使用情况不同而发生相应变化, 但台区配电网中的用户阻抗短期内不会发生变化, 若该配电网中用户阻抗有大幅度的变动, 则表示配电网内用户的线路运行出现故障。按照以上方法对低压配电台区的运行状态进行评估<sup>[7]</sup>, 可以快速、有效地发现故障并将其排除。

### 3 台区运行状态评估及故障预判

#### 3.1 智能电能表在故障处理中的应用

当电网发生故障时，电力公司会及时通过电力用户拨打过来的电话询问故障的发生地。同时为了缩短故障的处理时间，给电力用户带来更好的服务，电力公司会通过更多的故障报修电话对故障发生的地点以及此次故障所波及的区域进行精准的确认。在对故障的地点进行了确认后，会及时地派遣相关维修人员赶往维修地点，通过故障发生时电能表中所有的数据和故障指示器对故障灯的发生点进行二次判断，并及时进行维修。

随着智能电能表的进一步升级，目前市面上的智能电表大多都含有智能传感器，这也就意味着智能电能表会及时对这些信息进行汇总整理，工作人员便可以快速地通过这些数据对故障的发生地点有一个大致的判断。通过智能电能表和地理信息系统的相结合，便可以根据拓扑关系较为简单地得出每个故障点之间的关系。除此之外，在维修人员对故障维修时，电力公司调度中心的工作人员可以对电能表发送相关的指令，以此对故障的发生进行二次判断，这样也能够减少对故障的错误报告。在对故障进行维修后，智能电能表也会上报通电的信息。这种存在于智能电能表和电力公司的工作人员之间的双向互动，不仅对故障是否修复有着确认功能，而且还可以对多充电网故障的存在性进行检测。

#### 3.2 基于阻抗测量的状态评估方法

当前，国内台区配电网的技术装备水平较低，故障发生次数较多，要想缩短故障导致的停电时间，需配置智能电能表。智能电能表具备远方抄表功能，可方便实现对用户侧线路电压、电流值的实时监测，进而提高供电系统运行控制的可靠性<sup>[8]</sup>。

利用电压计量值矩阵 $U_M$ 来收集台区变压器连接的智能电能表收集到的当前时刻电压计量值，该矩阵形式为

$$U_M = \begin{bmatrix} U_{1,1} & U_{1,2} & \cdots & U_{1,m} & \cdots & U_{1,96} \\ U_{2,1} & U_{2,2} & \cdots & U_{2,m} & \cdots & U_{2,96} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{i,1} & U_{i,2} & \cdots & U_{i,m} & \cdots & U_{i,96} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{j,1} & U_{j,2} & \cdots & U_{j,m} & \cdots & U_{j,96} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， $U_M$ 为电压计量值矩阵；智能电能表每15 min采集一次电压计量值，每天可采集到96个电压计量数据； $U_{i,m}$ 为第*i*个电能表第*m*次采集到的电压计量值；*i*为智能电能表的编号，*i*=1,2,⋯,*j*；*j*为台区变压器连接的智能电能表总数；*m*为采集到的电压计量值序号，*m*=1,2,⋯,96。

利用电流计量值矩阵 $I_M$ 来收集台区变压器连接的智能电能表收集到的当前时刻电流计量值，该矩阵形式为

$$I_M = \begin{bmatrix} I_{1,1} & I_{1,2} & \cdots & I_{1,m} & \cdots & I_{1,96} \\ I_{2,1} & I_{2,2} & \cdots & I_{2,m} & \cdots & I_{2,96} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{i,1} & I_{i,2} & \cdots & I_{i,m} & \cdots & I_{i,96} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{j,1} & I_{j,2} & \cdots & I_{j,m} & \cdots & I_{j,96} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， $I_M$ 为电流计量值矩阵；智能电能表每15 min采集一次电流计量值，每天可采集到96个电流计量数据； $I_{i,m}$ 为第*i*个电能表第*m*次采集到的电流计量值，*i*为智能电能表的编号，*i*=1,2,⋯,*j*；*j*为台区变压器连接的智能电能表总数；*m*为采集到的电流计量值序号，*m*=1,2,⋯,96。

利用阻抗计量值矩阵 $R_M$ 来收集台区变压器连接的智能电能表收集到的当前时刻阻抗计量值，该矩阵形式为

$$R_M = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \cdots & R_{1,m} & \cdots & R_{1,96} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \cdots & R_{2,m} & \cdots & R_{2,96} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{i,1} & R_{i,2} & \cdots & R_{i,m} & \cdots & R_{i,96} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{j,1} & R_{j,2} & \cdots & R_{j,m} & \cdots & R_{j,96} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_{i,m} = \begin{cases} \frac{U_{i,m+1} - U_{i,m}}{I_{i,m} - I_{i,m+1}} (I_{i,m} - I_{i,m+1}) \neq 0, U_{i,m+1} \neq 0, U_{i,m} \neq 0 \\ -1 (U_{i,m+1} = 0, I_{i,m+1} = 0) \text{ or } (U_{i,m} = 0, I_{i,m} = 0) \\ -2 (U_{i,m+1} \neq 0, I_{i,m+1} = 0) \text{ or } (U_{i,m} \neq 0, I_{i,m} = 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $R_M$ 为阻抗计量值矩阵; 智能电能表每15 min采集一次阻抗计量值, 每天可采集到96个阻抗计量数据;  $I_{i,m}$ 为第*i*个电能表第*m*次采集到的阻抗计量值, *i*为智能电能表的编号,  $i=1,2,\dots,j$ ; *j*为台区变压器连接的智能电能表总数; *m*为采集到的阻抗计量值序号,  $m=1,2,\dots,96$ 。

电压计量值矩阵 $U_M$ 、电流量值矩阵 $I_M$ 和阻抗计量值矩阵 $R_M$ 的矩阵元素数量相同, 随着采集次数的累加, 矩阵内各元素按照采集次序进行更新。

通过用户侧阻抗计量值矩阵 $R_M$ 即可对低压配电网的运行状态进行评估分析, 具体为:

1) 按照矩阵元素顺序, 利用用户侧阻抗计量值矩阵 $R_M$ 中的第*i*行计量值进行下列评估分析。

2) 当阻抗计量值 $R_{i,1}$ 之前有*g*个阻抗计量值为-1时, 意味着该电能表前方线路发生了断线故障, *g*设为3。

3) 当阻抗计量值 $R_{i,1}$ 之前有*g*个阻抗计量值为-2时, 意味着该用户侧的用电设备没有使用, *g*设为3。

4) 当阻抗计量值 $R_{i,1}$ 之前有*h*个阻抗计量值为-2时, 表示该用户侧的用电设备长时间没有启动, 应该派遣工作人员查明具体原因, 该情况下时间段为1~3个月, *h*取值范围可为2 880~8 640。

5) 当阻抗计量值超过损耗警戒值 $K_1$ 的次数超过报警次数标准值 $SK_1$ 时, 表示该智能电能表上游回路存在线路老化情况, 已达到报警限值, 须及时检修更换。具体描述为

$$F_1 = \sum_{k=1}^n A_k$$

$$A_k = \begin{cases} 1 & R_{i,m} \geq K_1 \\ 0 & R_{i,m} < K_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $F_1$ 为阻抗计量值超过损耗警戒值 $K_1$ 的次数,  $k=1,2,\dots,n$ 。

6) 当回路阻抗值都不满足2)~5)所述条件时, 表示该智能电能表的前方回路运行正常。

7) 重复步骤1)~6), 直到用户侧阻抗计

量值矩阵中的全部元素都判断完成。

运用上述方法, 可基于智能电能表采集的电压与电流数据, 通过电流与电压的变化速率生成回路阻抗, 通过智能电能表前方回路阻抗的变化对低压配电网的运行状态进行评估分析。

## 4 算例验证及分析

对接入同一配电变压器的客户回路阻抗进行分析可以发现共性故障。图3为配电台区阻抗状态示意图。回路电阻监视如图4所示。图4中彩色的圆圈表示测量的阻抗*X*在正常范围内。在 $Y=X+$ 的情形下(多个用户显示阻抗升高), 意味着到配电变压器的距离越来越远(一般情况下每100 m增加0.03 Ω, 但一般在0.1~0.2 Ω)或者说明下户线已经老化(>0.2 Ω)。

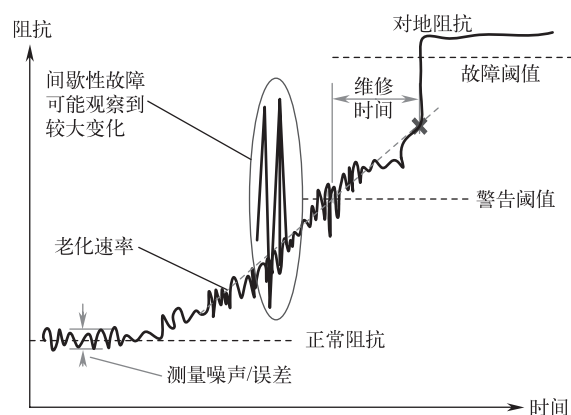


图3 配电台区阻抗状态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of impedance state of distribution station area

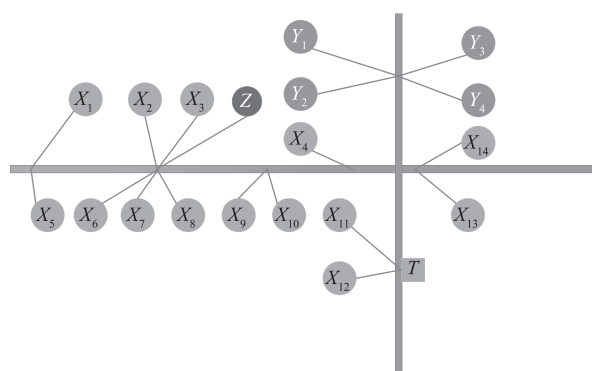


图4 回路电阻监视

Fig. 4 Loop resistance monitoring

每天对样本进行估算处理, 以确定当天每个

客户的阻抗估计值,如下表所示。当使用智能电能表15 min数据采集时,每天可获得最多96个阻抗估计值。

表 智能电表数据  
Tab. Smart meter data

| 用户 | 电表编号        | 计算阻抗/ $\Omega$ | 现场测量阻抗/ $\Omega$ | 现场检查结果         |
|----|-------------|----------------|------------------|----------------|
| 3  | 6001164782  | 5.1            | 4.4              | 中性线故障(断线)      |
| 6  | 60011328942 | 4.7            | N/A              | 电线杆上中性线未连接(断开) |
| 9  | 6001165891  | 2.2            | N/A              | 保险丝严重老化        |

在配电网中,计算出选定用户侧每天的阻抗,通过阈值设定,可定位出线路老化或故障点。提前发现故障类型并定位,及时安排现场检修,减少设备故障,提升工作效率及用户满意度。

## 5 结束语

为减轻台区配电网内智能电能表和集中器的负载,减少数据通信流量,本文基于窄带物联网(NB-IOT)技术的配电台区状态评估终端可实时采集电压、电流信号(或通过RS 485方式读取智能电能表数据),创建电压计量值矩阵、电流计量值矩阵,分别储存台区变压器连接的智能电能表一天内监测到的96个电压、电流计量值(每15 min采集一次),然后利用电压计量值矩阵、电流计量值矩阵求取阻抗计量值矩阵,以记录台区变压器连接的智能电能表前方线路的阻抗变化,建立低压配电网回路阻抗模型,判断当前回路供电情况,是否存在断线故障。

## 参考文献

- [1] 王宜怀, 张建, 刘辉. 窄带物联网NB-IoT应用开发共性技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [2] 宋洪儒, 王宜怀, 杨凡. 基于窄带物联网的智能路灯控制系统设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(3): 113-116.
- [3] 袁玉英, 罗永刚, 杨禾牧. 基于NB-IoT的物联网智能电能表设计[J]. 山东电力技术, 2020, 47(9): 31-33, 38.
- [4] 袁玉英, 罗永刚, 杨禾牧. 基于NB-IoT的物联网智能电能表设计[J]. 山东电力技术, 2020, 47(9): 31-33, 38.
- [5] 廉继红, 贾凯莉, 王延年. 智能纺织空调云平台搭建与仿真[J]. 西安工程大学学报, 2019, 33(4): 427-432.
- [6] 祁兵, 夏琰, 李彬, 等. 基于边缘计算的家庭能源管理系统: 架构、关键技术及实现方式[J]. 电力建设, 2018, 39(3): 33.
- [7] 周毅, 杨镜非, 王钰楠. 基于可信性理论的主动配电网运行风险动态评估[J]. 电气自动化, 2016, 38(3): 47-49, 56.
- [8] 王钰楠, 杨镜非, 何也帅, 等. 基于复杂网络理论的主动配电网多级运行风险快速评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 65-71.

## 作者简介

赵辉(1977—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电网供电可靠性。

(收稿日期: 2021-09-18)