

「负荷监测」

负荷监测系统在配电网运行特性分析中的应用

文/国网上海市电力公司金山供电公司 陈 龙 唐丹红 陈云峰
上海博英信息科技有限公司 刘 涌 袁秋实

配电网中大量10 kV配变负荷数据的获取是准确进行配电网运行分析的基础，负荷监测系统可实时监测配电网中10 kV配变负荷的数值，为准确进行配电网潮流计算和配电网运行特性分析提供了数据来源。研究了负荷监测系统在配电网运行特性分析中的应用。首先，介绍了负荷监测系统的组成和功能；其次，给出了基于负荷监测系统的配变负荷模型；然后，给出求解配电网潮流的前推回代计算方法；最后，以松江电网实际的一条配电出线为例，基于负荷监测系统数据对配电网运行特性进行详细分析，讨论了负荷类型、线路长度和线路类型等对配电网运行特性的影响。

配电网潮流计算是对配电网运行特性分析的最重要工具。通过配电网潮流计算可以得到配电网所有节点的电压相角数值和全网有功网损数值。计算结果可帮助电网运行管理人员更清晰地了解电网的运行情况，并为电网的优化运行提供重要的数据支撑。

目前限制配电网潮流计算推广应用的最关键因素是配电网中大量10 kV配变负荷数据的获取。由于配电网直接面对大量不同种类用户，因此数据量庞大且很难准确获取。因此配电网潮流计算目前在各供电公司的应用并不广泛。

近年来，配电网中负荷信息的获取工作有了很大的改进，负荷监测系统的安装为配电网潮流计算提供了大量的负荷数据信息，也为配电网潮流的精确计算提供了重要数据基础。负荷监测系统能够获取指定配电馈线上的杆变、箱变和箱变电站低压侧的有功、无功和电压数值，结合电能量采集及运行管理系统（TMRS）中的高供高量用户电量数据，可以实现指定馈线上所有负荷数据的获取。将以负荷监测系统所采集的负荷数据为基础，通过对配电网中10 kV配变负荷进行负荷数

学建模，使用前推回代法潮流计算，得到基于负荷监测系统的配电网运行特性分析方法。

负荷监测系统

负荷监测系统由安装在配电变压器低压出线侧的负荷监测仪（UI表）、电信部门短信和GPRS系统、供电分公司终端服务器组成。终端数据的发送通过GPRS无线网络发送至互联网，数据服务器接收UI表所发送信息，实现了UI表和供电分公司数据服务器之间的通信。UI表实时采集各个配电变压器的电压、负荷电流和频率值，并将这些数据按照通信规约打包成数据帧发送，最终到达运行中心数据服务器。其结构如图1所示。

基于负荷监测系统的负荷等值模型

配电网10 kV馈线中的用户负荷主要有如杆变用户、箱变用户、箱变电站用户、高供高量用户、配电站用户和开关站用户。其中，杆变用户、箱变用户和箱变电站用户是所有用户负荷中数量最多的类型，可通过负荷监测系统获取其低压侧的有

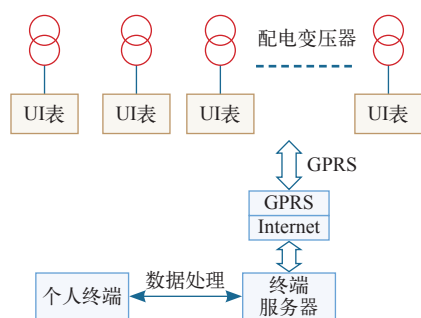


图1 负荷监测系统

有功功率、无功功率和电量数值。配电站用户和开关站用户可以通过DSCADA系统获取用户的有功功率、无功功率和电量信息。高供高量用户可以通过电能采集与管理系统（TMRS）获取用户的有功功率、无功功率和电量信息。在上述系统中，有时无法获取整点的有功无功数值，仅能获取整点的有功无功电量数值，此时可以近似将整点的有功无功电量数值作为整点的有功无功数值。在本项目的配电网潮流计算中，所有负荷点的潮流计算模型均为PO模型。

配电网潮流计算方法

采用基于前推回代法的计算求解配电网潮流分布。

初始化, 即给定平衡节点 (即电源点) 电压, 并为全网其他 PQ 节点赋电压初值 U_i^0 。计算各负荷节点的等效注入有功功率、无功功率

$$S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}$$

式中, S_{Li} 为节点 i 的视在功率; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功功率和无功功率。

第一次前推回代的潮流
计算过程如下。

1) 从网络的末端开始, 逐步前推, 由节点电压 U_i^0 , 求全网各支路功率分布, 前推过程为

$$P_{ij}^{(1)} = P_{Lj}^{(0)} + \sum_{k \in C_i} P_{jk}^{(1)} + \Delta P_{ij}^{(1)}$$

$$Q_{ij}^{(1)} = Q_{Lj}^{(0)} + \sum_{k \in C_i} Q_{jk}^{(1)} + \Delta Q_{ij}^{(1)}$$

式中, $P_{ij}^{(1)}$ 和 $Q_{ij}^{(1)}$ 分别为线路 ij 的有功功率和无功功率; $\Delta P_{ij}^{(1)}$ 和 $\Delta Q_{ij}^{(1)}$ 分别为线路 ij 的线损。

2) 从始端出发, 逐段前推, 由支路功率求各节点电压幅值和相角 $U_i^{(1)}$ 、 $\theta_i^{(1)}$, 即

$$U_j = \sqrt{\left(U_i^{(1)} - \frac{P_{ij}^{(1)}R_{ij} + Q_{ij}^{(1)}X_{ij}}{U_i^{(1)}}\right)^2 + \left(\frac{P_{ij}^{(1)}X_{ij} - Q_{ij}^{(1)}R_{ij}}{U_i^{(1)}}\right)^2}$$

$$\theta_j^{(1)} = \theta_i^{(1)} - \arctan \frac{\frac{P_{ij}^{(1)}X_{ij} - Q_{ij}^{(1)}R_{ij}}{U_i^{(1)}}}{U_i^{(1)} - \frac{P_{ij}^{(1)}R_{ij} + Q_{ij}^{(1)}X_{ij}}{U_i^{(1)}}}$$

式中, R_{ij} 和 X_{ij} 分别为线路 ij 的电阻和电抗。

3) 检查是否已经收敛。利用事先给定的收敛标准判断收敛与否。

$$|\Delta P_i^{(1)}| < \varepsilon_1, \quad |\Delta Q_i^{(1)}| < \varepsilon_1$$

式中, $\Delta P_i^{(1)} = P_i^{(1)} - \sum_{j=1}^{m_i} P_{ij}^{(1)}$ 为节点 i 的有功功率总偏

差; $\Delta Q_i^{(l)} = Q_i^{(l)} - \sum_{j=1}^{m_i} Q_{ij}^{(l)}$ 为节点的无功功率总偏差。

如不满足收敛标准, 将各节点电压计算值作为新的初始值自第二步开始进入下一次迭代。

通过上述迭代过程,即可求得配电网各点的电压和相角数值。

算例分析

以上海市松江区35 kV变电站香泾站10 kV出线香10夏泾线为例,进行基于负荷监测系统的运行特性分析,所选馈线的等效网络接线如图2所示。

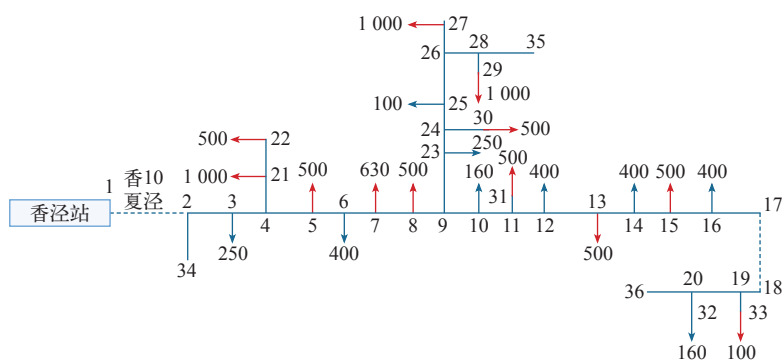


图2 香10夏涇线等效网络接线图

图2中, 实线表示架空线路; 虚线表示电缆; 箭头表示负荷; 箭头旁边的数值表示大用户或杆上变压器的额定容量。

图2中黑色箭头表示配置负荷监测仪的系统变用户,此类用户的有功无功负荷可通过负荷监测系统获取。由于系统变用户所装负荷监测仪采

集的是其低压侧的有功功率、无功功率数值，因此配变自身的有功无功损耗也需要计及。图2中红色箭头表示10 kV大用户，由于其电表计量为高供高量方式，因此不用考虑其内部变压器的损耗，潮流计算时可直接当成负荷处理，其有功功率、无功功率数值来自于电能采集与管理系统（TMRS）。

经过汇总后所有负荷点的节点类型如表1所示。

表1 香10夏泾线负荷节点有功无功数据表

节点编号	节点类型	节点编号	节点类型
1	平衡节点	16	杆变
3	杆变	21	大用户
5	大用户	22	大用户
6	杆变	23	杆变
7	大用户	25	杆变
8	大用户	27	大用户
10	杆变	29	大用户
12	杆变	30	大用户
13	大用户	31	大用户
14	杆变	32	杆变
15	大用户	33	大用户

表1中节点1为平衡节点，其余节点均为负荷节点。未列入表中的所有节点均为中间节点。下面基于负荷监测系统数据，对不同工况下的配电网运行特性进行分析计算。

1. 算例一

松江夏季最高负荷日时，香10夏泾线出线潮流计算。

计算得到系统主要性能评价指标的计算结果如表2所示。

表2 香10夏泾线关键性能评价指标汇总表

项目	有功功率	无功功率
总输出功率/kW(kvar)	4 163.243	1 069.493
总负荷/kW(kvar)	4 121.600	967.600
总损耗/kW(kvar)	41.643	101.893
总线路损耗/kW(kvar)	33.519	27.769
总变压器损耗/kW(kvar)	8.124	74.125
总线损率(%)	1.000	9.527
纯线路损耗比例(%)	19.509	72.747
杆上变压器损耗比例(%)	80.491	27.253
最大电压偏移/V	12.1	
最大相角偏移/(°)	0.311	

从表2可以看出，网络的总有功线损率为1%，线损率并不高，这是由于该配电出线长度较

短，且杆上变压器数量较少，变压器损耗较少。另外，网络的无功线损率远大于有功线损率，这也是配电网的特点，由于配电网出线后的系统变压器和线路上均不配置无功补偿装置，且线路的电阻数值一般会小于电抗数值，造成无功功率在配电线路上的大量传输。还可以看出，在有功线损上，线路上的有功线损要大于变压器自身的有功线损，这是由于该出线上杆变用户较少仅9户，其余12户均为大用户。另外，在无功损耗方面，变压器无功损耗所占比例要高于线路无功损耗所占比例。这是由于变压器自身的励磁电抗为配电网中重要的无功源。

2. 算例二

算例一中馈线负荷主要为大用户，然而实际的配电线路中，特别是老旧配电线路，一般存在数量较多的杆变用户。因此分析大量杆变用户存在情况下的潮流变化规律非常有必要。下面以松江夏季最高负荷日，香10夏泾线大用户全改为杆变为例，进行潮流计算并对比分析其规律。算例二将所有大用户均改为400 kV·A的杆变用户，有功负荷为276 kW，无功负荷为118 kW。

计算得到网络的主要性能评价指标如表3所示。

表3 香10夏泾线关键性能评价指标汇总表

项目	有功功率	无功功率
总输出功率/kW(kvar)	4 362.583	2 121.565
总负荷/kW(kvar)	4 287.600	1 814.9
总损耗/kW(kvar)	74.983	306.665
总线路损耗/kW(kvar)	37.388	30.950
总变压器损耗/kW(kvar)	37.595	275.714
总线损率(%)	1.719	14.455
纯线路损耗比例(%)	49.862	10.093
杆上变压器损耗比例(%)	50.138	89.907
最大电压偏移/V	143	
最大相角偏移/(°)	0.206	

从表3的计算结果可以看出，同算例一的计算结果相比，由于网络中总的有功无功负荷增大，因此网络的总有功无功损耗也有所增加，电压偏移也有所增大。另外，可以看出，同算例一的计算结果相比，网络中变压器产生的有功线损大于线路产生的有功线损，这是由于馈线中杆变的数量增加，杆变的所占损耗比例大大增大。同样变压器的无功损耗占总无功损耗的比例也有很大增加。由于算例二所采用变压器均为新型的低功耗类型的变压器，其损耗较小。对于一些老旧

线路，由于存在着大量的损耗较大的老旧变压器，这将进一步提高配电变压器线损占总线损的比例。

3. 算例三

由于实际的配电网中有很多距离很长的配电线路，如浜12枫围线，其长度为28.72 km，而算例二中香10夏泾线的长度仅为3.74 km。另外，当变电站内的某个开关需要检修停役时，需要对该开关出线后的负荷通过一些联络设备（如联络杆刀，配电站分段开关等）进行倒负荷处理，这将使得原有线路的长度增长，负荷增大。下面对算例一的数据做如下修改：假定网络负荷不变，将线路长度增长为原来4倍，变电站出口电压为10 kV。然后进行配电网潮流计算得到网络各节点的电压相角结果，汇总后得到的系统主要网损指标计算结果如表4所示。

表4 香10夏泾线关键性能评价指标汇总表

项目	有功功率	无功功率
总输出功率/kW(kvar)	4 287.977	1 166.194
总负荷/kW(kvar)	4 121.600	967.600
总损耗/kW(kvar)	166.377	198.594
总线路损耗/kW(kvar)	157.573	129.130
总变压器损耗/kW(kvar)	8.804	69.465
总线损率(%)	3.880	17.029
纯线路损耗比例(%)	94.708	65.022
杆上变压器损耗比例(%)	5.292	34.978
最大电压偏移/V	520	
最大相角偏移/(°)	1.434	

从表4的计算结果可以看出，由于线路长度增加为原来4倍，因此网络的总有功无功损耗增大较多，有功损耗增大为大约原来4倍。因此当负荷一定时，线损和线路长度有着近似的线性关系。另外，由于线路增长，因此线路有功损耗和无功损耗占总损耗比例均大大增加，均超过了变压器的有功无功损耗比例。

4. 算例四

考虑到可靠性和环保的影响，架空线路的电缆化是各供电公司主要的工作内容之一，下面对架空线路电缆化后的线路电压、损耗变化进行，同算例三的假设，网络负荷不变，将线路长度增长为原来4倍，所有架空线均改为纯电缆YJV-400线路，并令变电站出口电压为10 kV，汇总后得到的系统主要网损指标计算结果如表5所示。

从表5可以看出，同算例三相比，网络的有功无功损耗均有大幅减少，特别是线路损耗较少

表5 香10夏泾线关键性能评价指标汇总表

项目	有功功率	无功功率
总输出功率/kW(kvar)	4 148.381	1 071.260
总负荷/kW(kvar)	4 121.600	967.600
总损耗/kW(kvar)	26.781	103.660
总线路损耗/kW(kvar)	18.308	32.448
总变压器损耗/kW(kvar)	8.473	71.212
总线损率(%)	0.646	9.676 471
纯线路损耗比例(%)	68.362	31.302 1
杆上变压器损耗比例(%)	31.638	68.69 789
最大电压偏移/V	70	
最大相角偏移/(°)	0.449	

最大，这是由于纯电缆线路的电阻数值仅为架空线路电阻数值的1/5~1/10，因此线路有功损耗较小。变压器由于其负载不变，因此其有功损耗基本不变。由于线路电抗数值也比架空线电抗数值小一个数量级，因此线路无功损耗所占比例下降较多，小于变压器所占无功损耗比例。

结束语

负荷监测系统的广泛安装为配电网运行特性分析提供了重要的负荷数据来源。主要研究了基于负荷监测系统的配电网运行特性建模和分析方法，并将其应用到上海松江某10 kV馈线的运行特性分析中，通过计算分析可以得出如下电压水平和网损的变化规律如下。

1) 当线路长度适中，杆变数量较少，大用户较多时，线损主要由线路传输功率造成，杆变自身损耗较小，无功损耗较小。

2) 当线路长度适中，杆变数量较多，大用户较少时，线损主要由杆变自身损耗造成，线路传输损耗偏小。

3) 当线路较长时，线损主要由线路传输功率造成，杆变自身损耗偏小，电压降落水平同线路长度的关系最大，同杆变功率关系不大。

4) 当线路较长时，配电线路末端将产生很大的相角差，在合环热翻负荷时不容忽视。

5) 架空线路电缆化可显著提高电压水平，并减少线路损耗。

6) 配电网的无功损耗主要由变压器的无功损耗造成，线路传输造成的无功损耗相对比例偏小。EA

(收稿日期：2017.10.15)

(编辑：刘群焱)