

# 基于本地量测信息的配电变压器静态参数估计

刘健<sup>1,2</sup>, 陈鲁鹏<sup>1</sup>, 张志华<sup>1,2</sup>

(1. 西安理工大学 电气工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100)

**摘要:**为了能够准确、有效地掌握配电变压器的在线运行状态,并及时、正确地评估其健康状况,利用监测装置采集到的配电变压器本地高/低压侧的量测数据,在本地对其静态参数进行可测性估计,遴选有效量测方程辨识配电变压器的静态参数,以此来判断配电变压器的运行状况。算例结果表明:以量测数据之间的距离为标准遴选量测方程辨识得到的配电变压器静态参数估计值的质量更佳,并且参数辨识结果对变压器静态参数的在线动态监测和故障诊断具有应用参考价值。

**关键词:**配电变压器;静态参数;参数估计;可测性;在线监测

**中图分类号:**TM 41;TM 727

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202101002

## 0 引言

配电变压器是配电系统直接面向用户的重要设备,在配电网中数量多、分布广,其运行状态及健康水平关系着电网的安全与稳定<sup>[1]</sup>。因此,能够准确、有效地掌握配电变压器的在线运行状态,并及时、正确地判断其健康状况,为其状态评估、故障诊断、维护检修等方面提供技术支持具有重要的理论与实际指导意义<sup>[2-3]</sup>。

近年来,依据能获得的电气量为参考指标,对配电变压器运行及健康状况进行监测与评估的研究比较丰富,如:通过分析不同类型配电变压器高/低压侧的电压、电流与短路电抗值的关系,提出的配电变压器短路电抗在线检测方法<sup>[4]</sup>,并且将短路电抗值用于反映配电变压器绕组变形程度的诊断<sup>[5-6]</sup>以及利用检测的短路阻抗值来求解配电变压器的短路和开路损耗<sup>[7]</sup>;基于频率响应特性分析变压器绕组匝间短路故障的在线监测方法<sup>[8]</sup>;以短路电抗、短路损耗和空载损耗为主要辨识指标的配电变压器故障在线诊断模型<sup>[9]</sup>;监测负载电流、变压器油、电压等状态的配电变压器故障研判<sup>[10]</sup>;根据在线监测数据对配电变压器状态进行实时评估的方法<sup>[11]</sup>以及用于评估变压器健康状况的健康指数计算模型<sup>[12-14]</sup>、健康状态聚类方法<sup>[15]</sup>等。

配电变压器的静态参数是反映其运行状态的重要指标,对这些参数进行在线估计和分析有助于判断配电变压器当前的情况。文献[16]将馈线终端装置FTU(Feeder Terminal Unit)和配电变压器终端装

置TTU(Transformer Terminal Unit)等监测装置采集到的数据传输至配电自动化主站,在掌握全局数据的基础上,由配电自动化主站对配电网中的配电变压器及支路静态参数进行估计,从而对其是否处于正常状态进行监测。本文在文献[16]的基础上,探索利用配电变压器的量测信息在配电变压器本地估计其静态参数的可行性,以便在配电变压器监测终端上实现配电变压器健康状态监测。

## 1 基本原理

### 1.1 高/低压侧量测信息都可获得的情形

一台配电变压器的待估计三相静态参数包括:变压器绕组电阻 $R_{T,\varphi}$ 、短路电抗 $X_{T,\varphi}$ 、励磁电导 $G_{T,\varphi}$ 以及励磁电纳 $B_{T,\varphi}$ ,共12个,其中 $\varphi$ 表示相别。

由于Dyn11型配电变压器应用更普遍,本文以Dyn11型配电变压器参数估计为例进行论述,Yyn0型配电变压器参数估计模型和方法与之类似,不再赘述。Dyn11型配电变压器的高压侧绕组为三角形连接,3个绕组的励磁电导和励磁电纳分别为 $G_{T,AB}$ 、 $G_{T,BC}$ 、 $G_{T,CA}$ 和 $B_{T,AB}$ 、 $B_{T,BC}$ 、 $B_{T,CA}$ 。

对于Dyn11型配电变压器,流入高压侧各个绕组的复功率 $\tilde{S}_{AB}$ 、 $\tilde{S}_{BC}$ 、 $\tilde{S}_{CA}$ 为:

$$\tilde{S}_{AB} = U_{AB} I_{AB}^*, \quad \tilde{S}_{BC} = U_{BC} I_{BC}^*, \quad \tilde{S}_{CA} = U_{CA} I_{CA}^* \quad (1)$$

其中, $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CA}$ 和 $I_{AB}$ 、 $I_{BC}$ 、 $I_{CA}$ 分别为变压器高压侧3个绕组的电压和电流相量;上标“\*”表示求共轭。

配电变压器低压侧的三相复功率 $\tilde{S}_a$ 、 $\tilde{S}_b$ 、 $\tilde{S}_c$ 为:

$$\tilde{S}_a = P_a + jQ_a, \quad \tilde{S}_b = P_b + jQ_b, \quad \tilde{S}_c = P_c + jQ_c \quad (2)$$

其中, $P_a$ 、 $P_b$ 、 $P_c$ 和 $Q_a$ 、 $Q_b$ 、 $Q_c$ 分别为配电变压器低压侧的三相有功和无功功率。

配电变压器中的励磁有功功率损耗 $\Delta P_{AB}$ 、 $\Delta P_{BC}$ 、 $\Delta P_{CA}$ 为:

$$\begin{cases} \Delta P_{AB} = U_{AB}^2 G_{T,AB}, & \Delta P_{BC} = U_{BC}^2 G_{T,BC} \\ \Delta P_{CA} = U_{CA}^2 G_{T,CA} \end{cases} \quad (3)$$

收稿日期:2020-06-09;修回日期:2020-11-06

基金项目:国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U1766208)

Project supported by the Smart Grid Joint Fund of National Natural Science Foundation of China and State Grid Corporation of China(U1766208)

其中,  $U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CA}$  为配电变压器高压侧 3 个绕组的电压有效值。

配电变压器中的绕组有功功率损耗  $\Delta P_a$ 、 $\Delta P_b$ 、 $\Delta P_c$  为:

$$\Delta P_a = I_a^2 R_{T,a}, \quad \Delta P_b = I_b^2 R_{T,b}, \quad \Delta P_c = I_c^2 R_{T,c} \quad (4)$$

其中,  $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$  为配电变压器低压侧的三相电流有效值。

配电变压器中的励磁无功功率损耗  $\Delta Q_{AB}$ 、 $\Delta Q_{BC}$ 、 $\Delta Q_{CA}$  为:

$$\begin{cases} \Delta Q_{AB} = U_{AB}^2 B_{T,AB}, & \Delta Q_{BC} = U_{BC}^2 B_{T,BC} \\ \Delta Q_{CA} = U_{CA}^2 B_{T,CA} \end{cases} \quad (5)$$

配电变压器的短路电抗无功功率损耗  $\Delta Q_a$ 、 $\Delta Q_b$ 、 $\Delta Q_c$  为:

$$\Delta Q_a = I_a^2 X_{T,a}, \quad \Delta Q_b = I_b^2 X_{T,b}, \quad \Delta Q_c = I_c^2 X_{T,c} \quad (6)$$

各绕组的功率平衡关系可表示为:

$$\begin{cases} S_{AB}^2 = (P_a + \Delta P_{AB} + \Delta P_a)^2 + (Q_a + \Delta Q_{AB} + \Delta Q_a)^2 \\ S_{BC}^2 = (P_b + \Delta P_{BC} + \Delta P_b)^2 + (Q_b + \Delta Q_{BC} + \Delta Q_b)^2 \\ S_{CA}^2 = (P_c + \Delta P_{CA} + \Delta P_c)^2 + (Q_c + \Delta Q_{CA} + \Delta Q_c)^2 \end{cases} \quad (7)$$

将式(1)~(6)代入式(7),可以得到反映待估计量与量测量关系的量测方程,以 AB/a 绕组为例,有:

$$U_{AB}^2 I_{AB}^2 = (P_a + U_{AB}^2 G_{T,AB} + I_a^2 R_{T,a} + Q_a + U_{AB}^2 B_{T,AB} + I_a^2 X_{T,a})^2 \quad (8)$$

BC/b 绕组和 CA/c 绕组与之相似,不再赘述。

式(8)中,  $P_a$ 、 $Q_a$  和  $I_a$  可以通过安装于配电变压器低压侧的 TTU 观测得到,通过在配电变压器高压侧加装电压互感器(TV)可以观测得到  $U_{AB}$  的值,在配电变压器高压侧进线处安装三相电流互感器(TA)并将二次侧接成三角形后接入 TTU,可以观测得到  $I_{AB}$  的值。本文提出的方法全部基于配电变压器的本地量测信息,所有量测信息都可通过配置在配电变压器的同一台 TTU(或融合终端)获得,以保障采样的是同一时刻的值。这些配电变压器高低压侧的量测信息均为已知参量,而待估计的静态参数为未知参量。

由于待估计参数较多,根据同一个时刻采集的量测数据建立的量测方程数远少于待估计参数的个数,但是这些待估计参数都可以认为是在一定时间内不变的量,因此可以根据多个时刻的采样数据建立足够多的量测方程进行求解。这样以一段时间采集足够多的量测信息换取足够多的量测方程,即可达到求解待估计参数的目的。

设基于第  $i$  个时间断面量测数据建立的方程为:

$$f_i(R_{T,\varphi}, X_{T,\varphi}, G_{T,\varphi}, B_{T,\varphi}) = 0 \quad (9)$$

建立目标函数,即:

$$J = \min \sum_{i=1}^M f_i^2(\hat{R}_{T,\varphi}, \hat{X}_{T,\varphi}, \hat{G}_{T,\varphi}, \hat{B}_{T,\varphi}) \quad (10)$$

其中,  $M$  为量测方程个数;  $\hat{R}_{T,\varphi}$ 、 $\hat{X}_{T,\varphi}$ 、 $\hat{G}_{T,\varphi}$  和  $\hat{B}_{T,\varphi}$  为待估计参数的估计值,可以采用非线性最小二乘方法

求解量测方程获得。

为了估计得到  $R_{T,\varphi}$ 、 $X_{T,\varphi}$ 、 $G_{T,\varphi}$  和  $B_{T,\varphi}$  这 12 个参数,可以通过获取不同时间断面上的至少 4 组采样数据后建立量测方程,在采样周期为 1~15 min 的情况下,至少需 4~60 min 完成 1 组参数估计。根据文献[16]提出的配电网静态参数可测性估计方法,在配电变压器高/低压侧电压、电流和功率有效值都可获得的情况下,在多个时刻采样数据,建立足够多的量测方程进行求解,可以判断配电变压器所有的静态参数都可以唯一确定,即所有的静态参数都是“明晰”的。

## 1.2 高压侧量测信息全部缺失的情形

配电变压器一般都配置 TTU,可以量测得到低压侧三相有功功率、无功功率和电压、电流有效值,但是在一些实际情况中,无法获得配电变压器高压侧电压、电流和功率等量测信息。

在这种情形下,根据文献[16]提出的配电网静态参数可测性估计方法,如果仅仅依据配电变压器低压侧的量测信息建立量测方程,在本地判断配电变压器  $R_{T,\varphi}$ 、 $X_{T,\varphi}$ 、 $G_{T,\varphi}$  和  $B_{T,\varphi}$  这些静态参数都不能唯一确定,即这些静态参数是“不确定”的。

因此,在这种情形下就不能基于本地量测信息进行配电变压器的静态参数估计,而要采取文献[16]提出的方法,由数据中心(如配电自动化系统主站)根据整个馈线段全部配电变压器的低压侧量测信息以及该馈线段的各个端点处的馈线终端或站所终端采集到的高压侧(10 kV)电压、电流和功率信息建立量测方程,才能唯一确定该馈线段上全部配电变压器的静态参数和馈线段的静态线路参数,本文不再赘述。

## 1.3 高压侧电流信息可获得的情形

若配电变压器高压侧没有配置高压电能表,则通过在配电变压器高压侧加装电压互感器和电流互感器可获取监测数据,某些情况下加装电流互感器比较容易实现,而加装电压互感器较难实现,因此会出现缺少高压侧电压量测信息而能够获得高压侧电流量测信息的情形。

在这种情形下,根据文献[16]提出的配电网静态参数可测性估计方法,即使可利用配电变压器高压侧电流量测信息和低压侧的量测信息建立量测方程,但因为缺少配电变压器高压侧电压量测信息,在本地判断配电变压器  $R_{T,\varphi}$ 、 $X_{T,\varphi}$ 、 $G_{T,\varphi}$  和  $B_{T,\varphi}$  这些静态参数仍都不能唯一确定,即这些静态参数仍是“不确定”的。

考虑到 10 kV 馈线允许的电压偏差范围较小,对于安装于馈线某一具体位置的一台配电变压器而言,在完成一组参数估计的时间段内(如 15~60 min)其高压侧电压波动更小。因此可以近似认为高压侧电压在此期间不变,从而可以将其和变压

器的参数同样作为静态参数进行估计。考虑到高压侧电压相位对称且不会发生变化,只需估计高压侧电压有效值,相当于增加了3个待估计参数,与可获取配电变压器高压侧电压有效值的情形相比,需再增加由某一时刻的三相量测数据建立的3个量测方程。

将低压侧的量测信息和高压侧电流量测数据代入1.1节中的量测方程,将高压侧电压有效值和变压器静态参数作为待估计参数进行求解,这样就可以在配电变压器本地估计得到其全部等值参数。根据文献[16]提出的配电网静态参数可测性估计方法,采取上述措施后,配电变压器所有的静态参数都可以唯一确定,即所有的静态参数都是“明晰”的。

由于高压侧电压实际上还是有一定的波动,将其作为静态参数处理相当于引入了量测误差,但是10 kV电压等级允许电压偏差范围为 $\pm 7\%$ ,对于一个配电变压器节点而言,在很短的观测周期内,其高压侧电压波动更小。因此,可以在一个时间段内进行多组参数估计,选取各参数估计值的平均值以降低高压侧电压误差的影响。

## 2 有效量测方程的遴选

尽管监测装置(如TTU)的数据采样间隔可以很短,能够获得数量较多的量测方程,但是很短时间段内获得的采样数据往往比较接近,可能有一部分量测方程是不独立的。在量测方程构成的量测空间中,每个量测方程为此高维空间中的一个点,不独立的各个方程则表现为重叠的点。考虑到客观上量测误差的存在,即使不重叠但欧氏距离较近的点对应的量测方程在求解时也容易出现病态,会对参数估计结果造成影响。

为解决这个问题,本文在获得的量测空间中,遴选相互之间欧氏距离较大的量测方程作为有效量测方程,以便达到更好的参数估计效果。

定义量测量的归一化刻度。对于一个量测量 $\omega$ ,设其取值范围为 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ ,则其归一化刻度 $\tilde{\omega}$ 为:

$$\tilde{\omega} = \frac{\omega - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \quad (11)$$

对于一个量测方程对应的一组量测数据 $\mathbf{W}[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_H]$ ,定义其归一化向量为 $\tilde{\mathbf{W}}[\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_H]$ ,其中 $H$ 为量测量的个数。

定义基于第 $i$ 组和第 $j$ 组量测数据构成的量测方程之间的距离 $D_{i,j}$ 为:

$$D_{i,j} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^H (\tilde{\omega}_{i,k} - \tilde{\omega}_{j,k})^2}{H}} \quad (12)$$

设置一个距离阈值 $D_{\text{set}}$ ,在进行参数估计时,要求所用的量测方程间的距离都必须大于 $D_{\text{set}}$ ,以此

为原则进行量测方程遴选。归一化的量测量 $\tilde{\omega}$ 取值范围为 $[0, 1]$ ,则根据式(12)可知,2组量测数据构成的量测方程之间的最大距离 $D_{\text{max}}=1$ 。考虑到有效遴选量测方程的原则,阈值 $D_{\text{set}}$ 可设置在 $[D_{\text{max}}/20, D_{\text{max}}/15]$ 的范围内。

量测方程遴选方法流程图如图1所示,具体步骤为:

(1)以构成量测方程的量测数据为顶点,每2个顶点之间构造一条边,根据式(12)计算2个顶点之间的距离作为其权重,构造得到一个加权无向图;

(2)采用Prim算法获得该加权无向图的最小生成树作为考察方案;

(3)对于考察方案,若其距离最短的边小于 $D_{\text{set}}$ ,转至步骤(4),否则转至步骤(5);

(4)分别删除该距离最短边对应的一个顶点,再分别构建删除顶点后的加权无向图并获得相应的最小生成树,计算得到2个最小生成树中各条边的权重之和,选择权重之和较大的最小生成树作为考察方案,转至步骤(3);

(5)若保留顶点个数大于或等于待估计参数的个数,则终止遴选,即这些顶点对应的量测方程可用于参数估计,否则补充新的量测方程,再返回步骤(1)。

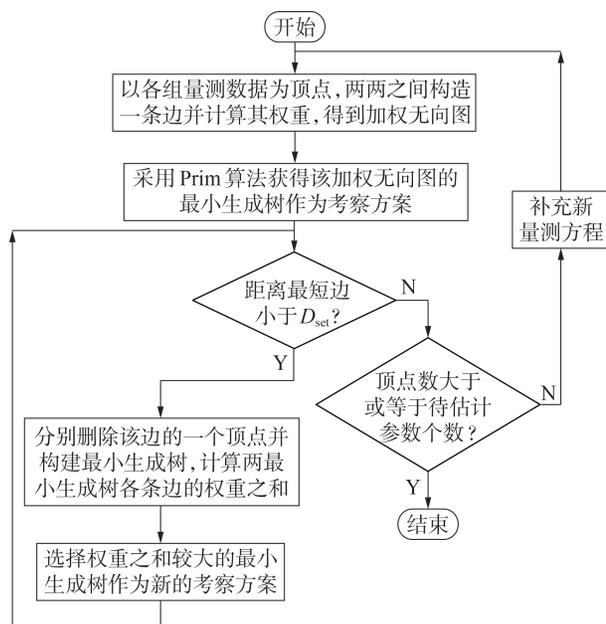


图1 量测方程的遴选流程图

Fig.1 Selection flowchart of measurement equations

## 3 静态参数估计的质量评估

由监测装置(如TTU)在一定时间内获取较多的量测方程后,通过第2节所提方法遴选有效量测方程用于参数估计求解配电变压器的静态参数值,可为变压器健康状态诊断提供参考。

理论上而言,当获取的有效量测方程数大于或等于待估计静态参数的个数时,待估计的静态参数有唯一解。由于存在量测误差且在计算中有一定的迭代误差,因此有效量测方程数越多,估计结果的容错性越强。通过获取多组有效量测方程使静态参数估计结果稳定后,可以进一步评估参数估计的质量。

在获取的有效量测方程数不少于待估计静态参数的个数的基础上,每增加一组有效方程,即可求得一组新的配电变压器静态参数估计结果,从而可以得到一个配电变压器静态参数估计结果的序列,据此可分别计算各个参数的均值 $\bar{x}$ 及标准差 $S$ ,对于第 $i$ 个参数,有:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{i,j} \quad (13)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2} \quad (14)$$

其中, $x_{i,j}$ 为第 $i$ 个静态参数的第 $j$ 个估计结果; $N$ 为序列中所包含的估计结果的组数。

对于第 $i$ 个参数,设 $N=m$ 和 $N=2m$ 时的均值、标准差分别为 $\bar{x}_i^m$ 、 $S_i^m$ 和 $\bar{x}_i^{2m}$ 、 $S_i^{2m}$ ,若式(15)成立则可认为其估计的结果已经稳定,可以输出结果;否则表明其估计的结果尚不稳定,还需进一步收集数据。

$$|\bar{x}_i^m - \bar{x}_i^{2m}| < \varepsilon \ \& \ |S_i^m - S_i^{2m}| < \varepsilon \quad (15)$$

其中, $\varepsilon$ 为预设的阈值,一般可设置为满意的最大估计误差绝对值的1/3~1/2; $m$ 需大于待估计静态参数的个数。

根据样本均值和标准差计算静态参数在95%置信度下的置信区间为:

$$[\bar{x}_i - S_i t_{0.05/2}(N-1), \bar{x}_i + S_i t_{0.05/2}(N-1)] \quad (16)$$

其中, $t_{0.05/2}(N-1)$ 的值可通过查 $t$ 分布表得到。

上述求得的95%置信度下的置信区间为评估参数估计质量的重要指标,将其与配电变压器出厂时的静态参数值进行对比分析,即可反映配电变压器当前的健康状况。

#### 4 算例分析

本节将举例论证所提方法的可行性和有效性。选取配电变压器为S11-M-80/10型三相双绕组变压器,采用Dyn11型接线方式,出厂时归算至高压侧的参数为: $R_T=19.53 \ \Omega$ , $X_T=50 \ \Omega$ , $G_T=1.8 \times 10^{-6} \ \text{S}$ 和 $B_T=7.2 \times 10^{-6} \ \text{S}$ 。配电变压器的本地量测信息都通过配置在配电变压器的同一台TTU(或融合终端)获得,能够采样到同一时刻的值。

算例分析中使用的量测数据来自于各种负荷条件下的潮流计算,配电变压器高低压侧量测装置的综合精度 $\delta=\pm 0.5\%$ (示值相对误差),根据文献[17]提出的方法,以量测精度计算量测数据的置信区间,

在该区间内随机取值以将量测误差包含在内。

首先设置该配电变压器的各个参数与出厂时的参数值相同(即为状态良好的配电变压器)进行参数估计。采用文献[16]提出的基于蒙特卡罗法的参数可测性分析方法,分别在高压侧电压和电流有效值都可量测的情形以及缺少高压侧电压有效值量测并采用1.3节所述措施的情形下,对配电变压器静态参数的可测性进行分析并估计其参数值。

在可测性分析中采用了第2节所述的方法,先充分获取监测装置在某一时段中不同时间断面的量测数据构建量测方程,再利用图1所示的步骤遴选有效量测方程( $D_{\text{set}}$ 设为0.05)进行求解。设置参数 $R_{T,\varphi}$ 、 $X_{T,\varphi}$ 可测性估计的允许精度 $A_1=5\%$ ,参数 $G_{T,\varphi}$ 、 $B_{T,\varphi}$ 可测性估计的允许精度 $A_2=10\%$ ,分析可得2种情形下配电变压器的三相静态参数均是“明晰”的,各个参数的平均相对误差如表1所示。

表1 配电变压器静态参数的估计结果

Table 1 Estimation results of static parameters for distribution transformer

配电变压器静态参数	高压侧可量测		缺少高压侧电压量测	
	估计值	相对误差/%	估计值	相对误差/%
$R_{T,A}$	19.871 $\Omega$	1.75	20.207 $\Omega$	3.47
$X_{T,A}$	49.013 $\Omega$	1.97	48.795 $\Omega$	2.41
$G_{T,AB}$	$1.91 \times 10^{-6} \ \text{S}$	6.11	$1.85 \times 10^{-6} \ \text{S}$	2.78
$B_{T,AB}$	$7.57 \times 10^{-6} \ \text{S}$	5.14	$7.69 \times 10^{-6} \ \text{S}$	6.80
$R_{T,B}$	19.325 $\Omega$	1.05	19.026 $\Omega$	2.58
$X_{T,B}$	51.024 $\Omega$	2.05	48.913 $\Omega$	2.17
$G_{T,BC}$	$1.93 \times 10^{-6} \ \text{S}$	7.22	$1.96 \times 10^{-6} \ \text{S}$	8.89
$B_{T,BC}$	$7.42 \times 10^{-6} \ \text{S}$	3.06	$7.06 \times 10^{-6} \ \text{S}$	1.94
$R_{T,C}$	19.221 $\Omega$	1.58	20.004 $\Omega$	2.43
$X_{T,C}$	48.275 $\Omega$	3.45	48.158 $\Omega$	3.68
$G_{T,CA}$	$1.89 \times 10^{-6} \ \text{S}$	5.00	$1.92 \times 10^{-6} \ \text{S}$	6.67
$B_{T,CA}$	$7.51 \times 10^{-6} \ \text{S}$	4.30	$6.92 \times 10^{-6} \ \text{S}$	3.89

在算例中,高压侧电压幅值的实际波动范围是标称值的-3.64%~-0.92%,由表1可见,相比于可以实际量测高压侧电压的情形,缺少高压侧电压量测数据而近似认为其有效值不变进行估计得到的各个参数估计结果的相对误差总体上略有增加,但仍具有参考价值。

采用第2节所述的方法遴选有效量测方程,求解得到的各个参数估计结果的均值、标准差及95%置信度下的置信区间如表2所示。

若不采用第2节所述的方法遴选有效量测方程,计算各个参数估计的均值、标准差及置信区间如表3所示。

表2和表3所采用的是针对同一台正常运行的配电变压器的量测数据。对比分析表2和表3可知,采用第2节所述的方法遴选有效量测方程进行参数估计所得的配电变压器静态参数在95%置信度下

表 2 配电变压器静态参数的置信区间

Table 2 Confidence interval of static parameters for distribution transformer

配电变压器静态参数	$\bar{x}$	S	置信区间
$R_{T,A} / \Omega$	19.693	0.640	[18.411, 20.975]
$X_{T,A} / \Omega$	49.021	1.290	[46.429, 51.613]
$G_{T,AB} / S$	$1.86 \times 10^{-6}$	$8.41 \times 10^{-8}$	$[1.69 \times 10^{-6}, 2.03 \times 10^{-6}]$
$B_{T,AB} / S$	$7.39 \times 10^{-6}$	$1.81 \times 10^{-7}$	$[7.03 \times 10^{-6}, 7.75 \times 10^{-6}]$
$R_{T,B} / \Omega$	19.295	0.612	[18.069, 20.521]
$X_{T,B} / \Omega$	50.219	1.323	[47.569, 52.869]
$G_{T,BC} / S$	$1.92 \times 10^{-6}$	$6.60 \times 10^{-8}$	$[1.79 \times 10^{-6}, 2.05 \times 10^{-6}]$
$B_{T,BC} / S$	$7.52 \times 10^{-6}$	$2.44 \times 10^{-7}$	$[7.03 \times 10^{-6}, 8.01 \times 10^{-6}]$
$R_{T,C} / \Omega$	20.106	0.723	[18.658, 21.554]
$X_{T,C} / \Omega$	49.510	1.131	[47.245, 51.775]
$G_{T,CA} / S$	$1.89 \times 10^{-6}$	$7.64 \times 10^{-8}$	$[1.74 \times 10^{-6}, 2.04 \times 10^{-6}]$
$B_{T,CA} / S$	$7.32 \times 10^{-6}$	$2.04 \times 10^{-7}$	$[6.91 \times 10^{-6}, 7.73 \times 10^{-6}]$

表 3 配电变压器静态参数的置信区间(随机选取方程)

Table 3 Confidence interval of static parameters for distribution transformer(select equation randomly)

配电变压器静态参数	$\bar{x}$	S	置信区间
$R_{T,A} / \Omega$	20.103	0.855	[18.390, 21.816]
$X_{T,A} / \Omega$	48.575	1.622	[45.326, 51.824]
$G_{T,AB} / S$	$1.90 \times 10^{-6}$	$1.16 \times 10^{-7}$	$[1.67 \times 10^{-6}, 2.13 \times 10^{-6}]$
$B_{T,AB} / S$	$7.50 \times 10^{-6}$	$3.05 \times 10^{-7}$	$[6.89 \times 10^{-6}, 8.11 \times 10^{-6}]$
$R_{T,B} / \Omega$	19.753	0.862	[18.026, 21.480]
$X_{T,B} / \Omega$	49.561	1.708	[46.140, 52.982]
$G_{T,BC} / S$	$1.89 \times 10^{-6}$	$8.92 \times 10^{-8}$	$[1.71 \times 10^{-6}, 2.07 \times 10^{-6}]$
$B_{T,BC} / S$	$7.58 \times 10^{-6}$	$3.70 \times 10^{-7}$	$[6.84 \times 10^{-6}, 8.32 \times 10^{-6}]$
$R_{T,C} / \Omega$	19.938	0.820	[18.295, 21.581]
$X_{T,C} / \Omega$	50.186	1.658	[46.865, 53.507]
$G_{T,CA} / S$	$1.94 \times 10^{-6}$	$9.28 \times 10^{-8}$	$[1.75 \times 10^{-6}, 2.13 \times 10^{-6}]$
$B_{T,CA} / S$	$7.44 \times 10^{-6}$	$3.11 \times 10^{-7}$	$[6.82 \times 10^{-6}, 8.06 \times 10^{-6}]$

的置信区间更窄,参数估计结果的质量更高。

为了定量验证本文所提方法的有效性,结合实际中遇到的常见缺陷,设置了同一台配电变压器的 A 相绕组电阻参数和 B 相短路电抗参数分别偏离其出厂时的参数值 19.53  $\Omega$  和 50  $\Omega$ , 表示其存在不同类型的缺陷。根据第 2 节所述的方法遴选有效量测方程进行参数估计计算,求解配电变压器绕组电阻和短路电抗参数的均值、标准差及在 95% 置信度下的置信区间如表 4 所示。

表 4 配电变压器非正常运行时的静态参数估计结果

Table 4 Estimation results of static parameters for distribution transformer under abnormal operation  
单位:  $\Omega$ 

配电变压器静态参数	$\bar{x}$	S	置信区间
$R_{T,A}$	31.018	0.751	[29.516, 32.520]
$X_{T,A}$	48.725	1.127	[46.471, 50.979]
$R_{T,B}$	19.179	0.586	[18.007, 20.351]
$X_{T,B}$	79.255	1.180	[76.895, 81.695]
$R_{T,C}$	19.314	0.645	[18.024, 20.604]
$X_{T,C}$	50.652	1.206	[48.240, 53.064]

表 4 中参数估计得到的配电变压器 A 相绕组电阻参数  $R_{T,A}$  和 B 相短路电抗参数  $X_{T,B}$  的置信区间均明显偏离其出厂时的参数值,表明参数估计结果能够反映该配电变压器存在一定的缺陷。一般地,若某相绕组电阻偏大,可推测该相绕组可能有断匝缺陷;若某相短路电抗偏大,则该相绕组存在变形的可能,需要进一步诊断并及时排除故障。

## 5 结论

(1) 利用配电变压器高/低压侧能够获取的量测信息可在本地对其静态参数进行可测性估计,并辨识其参数值。若受限于量测配置无法获取高压侧电压量测信息,可近似认为短时间内高压侧电压有效值不变,将其和变压器参数一样作为静态参数进行估计,得到的配电变压器静态参数估计结果仍具有应用参考价值。

(2) 以量测数据之间的距离为标准遴选有效量测方程,辨识得到的配电变压器静态参数估计值在 95% 置信度下的置信区间更窄,参数估计结果的质量更高。

(3) 通过对比配电变压器静态参数的估计值和出厂时的参数值可推断其当前的健康状况,对配电变压器在线动态监测和故障诊断具有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] JEONG S C, KIM J W, PARK P G, et al. A pattern-based fault classification algorithm for distribution transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2483-2492.
- [2] 李刚, 于长海, 刘云鹏, 等. 电力变压器故障预测与健康管理的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 156-167.  
LI Gang, YU Changhai, LIU Yunpeng, et al. Challenges and prospects of fault prognostic and health management for power transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 156-167.
- [3] 黄翌, 汪泓, 谭阳红, 等. 基于健康度和重要度的配电网运行风险评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 136-141.  
HUANG Zhao, WANG Feng, TAN Yanghong, et al. Operational risk assessment based on health and importance indexes for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 136-141.
- [4] 王明林, 陈民铀, 赖伟, 等. 一种改进的配电变压器短路电抗在线检测方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 127-132.  
WANG Minglin, CHEN Minyou, LAI Wei, et al. Improved method of online measuring for distribution transformer short circuit reactance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 127-132.
- [5] 何为, 刘以刚, 胡国辉, 等. 基于短路电抗法的配电变压器绕组变形在线诊断[J]. 电测与仪表, 2014, 51(14): 47-51, 109.  
HE Wei, LIU Yigang, HU Guohui, et al. On-line diagnosis of the distribution transformer winding deformation based on the short-circuit reactance method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(14): 47-51, 109.
- [6] 范竞敏, 曹建, 丁家峰. 电力变压器绕组状态实时监测算法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 81-85.

- FAN Jingmin, CAO Jian, DING Jiafeng. Real-time monitoring algorithm of power transformer windings status[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 81-85.
- [7] 陈民铀, 李霞, 王平, 等. 配电变压器短路和开路损耗在线测量系统[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(3): 36-41.  
CHEN Minyou, LI Xia, WANG Ping, et al. System of online measuring short-circuit loss and open-circuit loss of distribution transformer[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(3): 36-41.
- [8] BEHJAT V, VAHEDI A, SETAYESHMEHR A, et al. Diagnosing shorted turns on the windings of power transformers based upon online FRA using capacitive and inductive couplings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2123-2133.
- [9] 杨志淳, 周任飞, 沈煜, 等. 基于并行化大数据流及迁移学习的配电变压器故障在线辨识-诊断模型[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1697-1706.  
YANG Zhichun, ZHOU Renfei, SHEN Yu, et al. On-line fault identify and diagnosis model of distribution transformer based on parallel big data stream and transfer learning[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1697-1706.
- [10] JAISWAL G C, BALLAL M S, TUTAKNE D R. Health index based condition monitoring of distribution transformer[C]// International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems. Trivandrum, Kerala, India: IEEE, 2017: 1-5.
- [11] 杨志淳, 靖晓平, 乐健, 等. 基于MI-PSO-BP算法的配电设备状态实时评估方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 108-113.  
YANG Zhichun, JING Xiaoping, LE Jian, et al. Real-time condition assessment method based on MI-PSO-BP algorithm for distribution equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 108-113.
- [12] 张楠, 袁海文, 马钊, 等. 基于层次分析结构的配电变压器健康指数评价方法[J]. 供用电, 2016, 33(1): 14-20.  
ZHANG Nan, YUAN Haiwen, MA Zhao, et al. A health index evaluation method for distribution transformers based on hierarchical structure[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(1): 14-20.
- [13] AZMI A, JASNI J, AZIS N, et al. Evolution of transformer health index in the form of mathematical equation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 687-700.
- [14] JAISWAL G C, BALLAL M S, VENIKAR P A, et al. Genetic algorithm-based health index determination of distribution transformer[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018, 28(5): 1-12.
- [15] 李洁珊, 王朝硕, 章禹, 等. 基于历史信息挖掘的变压器健康状态聚类方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 94-99.  
LI Jieshan, WANG Chaoshuo, ZHANG Yu, et al. A clustering method for transformer health state based on historical information mining[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 94-99.
- [16] 刘健, 陈鲁鹏, 张志华. 基于蒙特卡罗法的配电网静态参数可测性估计[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3235-3240.  
LIU Jian, CHEN Lupeng, ZHANG Zhihua. Estimation of static parameters testability for distribution network based on Monte Carlo method[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3235-3240.
- [17] 刘健, 陈鲁鹏, 张志华. 考虑量测误差影响的配电网静态参数可测性估计[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1481-1487.  
LIU Jian, CHEN Lupeng, ZHANG Zhihua. Estimation of static parameters testability for distribution network considering the effect of measurement errors[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1481-1487.

#### 作者简介:



刘健

刘健(1967—),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为配电网及其自动化技术(**E-mail**: powersys@263.net);

陈鲁鹏(1993—),男,山东曲阜人,博士研究生,主要研究方向为电力系统的参数估计(**E-mail**: chenlp@stu.xaut.edu.cn);

张志华(1987—),男,安徽池州人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为配电网及其自动化技术(**E-mail**: zzhtsky123@163.com)。

(编辑 李玮)

## Static parameter estimation for distribution transformer based on local measurement information

LIU Jian<sup>1,2</sup>, CHEN Lupeng<sup>1</sup>, ZHANG Zhihua<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to grasp the online operation state of distribution transformer accurately and effectively, and evaluate its health conditions timely and correctly, the testability of static parameters for distribution transformer is estimated locally by using the measurement data of high and low voltage sides of the distribution transformer, which is acquired from monitoring devices. Meanwhile, these static parameters are identified by selecting effective measurement equations, so as to judge the operation state of distribution transformer. The case results show that the selection of measurement equations based on the distance between measurement data can receive better quality of static parameter estimation for distribution transformer. In addition, the identification results have application reference value for the online dynamic monitoring and fault diagnosis of transformer static parameters.

**Key words:** distribution transformer; static parameters; parameter estimation; testability; online monitoring