

基于 WAMS/SCADA 混合量测的电网参数辨识与估计

陈晓刚¹, 易永辉¹, 江全元¹, 曹一家¹, 陶 佳¹, 蒋正威^{1,2}

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 浙江电力调度通信中心, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 针对目前电网参数辨识与估计方法存在的数值稳定性变差、易发散及易受残差污染干扰等问题,提出了一种基于混合量测的电网参数辨识与估计方法。该方法首先利用广域测量系统(WAMS)的测量数据计算相对残差,初步判断是否存在参数错误,然后利用相量测量单元(PMU)能够测量电压和电流相量的特性,建立支路两端变量之间的直接联系,对存在参数错误的支路进行辨识,并在此基础上使用智能优化算法估计支路参数。在 IEEE 39 测试系统上的仿真实验表明,该方法只需安装约 1/2 总母线数的 PMU 即可对全网传输线路和变压器进行参数辨识与估计。

关键词: 参数辨识; 广域测量系统; 相量测量单元; 监控与数据采集(SCADA)系统

中图分类号: TM744

0 引言

现代电力系统中的潮流计算和状态估计都建立在系统开关量和网络元件参数正确的基础之上。在实际工程中,由于缺少实测参数而直接采用设计参数,以及线路改建、运行环境变化、对变压器的分接头位置与补偿电容器容量掌握不准确等原因,都容易导致运行人员对电网参数掌握不准确。而电网参数错误会严重降低状态估计在局部区域的计算精度,进而影响基于状态估计的各种高级应用系统的工作效能。

目前基于监控与数据采集(SCADA)系统或基于广域测量系统(WAMS)与 SCADA 系统混合量测^[1-2]的参数辨识方法主要有 2 种:增广状态估计法和残差灵敏度分析法^[3-6]。增广状态估计法将待估计的参数作为参数状态量,将其与原有的节点状态量(节点电压相量)一起进行状态估计,因其需要增加状态量的维数,意味着降低了原有的量测冗余度并存在计算时间变长及收敛性变差的问题。残差灵敏度分析法利用残差与错误参数之间的联系通过多次迭代对错误参数进行修正,该方法的优点是不需要对现有的状态估计程序进行修改,但是需要更多的迭代次数,并且同样需要预先确定错误参数的位置。而残差污染的存在则增大了定位存在参数错误

支路的难度,限制了上述 2 种方法的应用和效能。文献[7]提出基于支路两侧同步相量、利用最小二乘法对支路参数进行参数辨识,能够有效地解决残差污染的问题,但是需要在支路两侧均配置相量测量单元(PMU)。

本文提出了一种基于 WAMS/SCADA 混合量测的非线性电网参数辨识方法。该方法充分利用了 PMU 能够测量支路两端电压和电流相量的特性,构建支路两端变量间的直接联系,并以此为基础使用智能优化方法对支路参数进行估计。借助该方法只需安装约 1/2 总母线数的 PMU,即可实现对全网任意支路的在线参数辨识与估计。

1 将 PMU 相量引入支路参数辨识与估计

1.1 PMU 测量量的引入

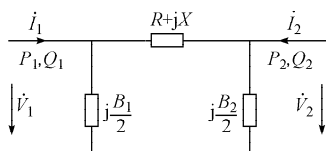
目前电力系统已广泛部署的 SCADA 系统能够提供的信息通常有 P, Q, U (少部分系统提供 $|\dot{I}|$),但这些变量不足以通过基尔霍夫定理构建支路两侧物理量间的直接联系。因此,基于 SCADA 数据的状态估计需要借助牛顿-拉夫逊法等方法迭代求解非线性方程组,以获得各母线的电压相量。

PMU 能够直接测量相量 $\dot{V}$ 和 $\dot{I}$ 。只要支路的一侧或者两侧配置有 PMU,即可以通过基尔霍夫定理构建支路两端物理量之间的直接联系。

1.2 支路两端测量量之间的联系

在潮流计算和状态估计中,传输线路和非标准变比双绕组变压器通常使用 π 形线路模型和简化的非标准变比双绕组变压器的等值模型表示。2 种模型可以用非对称 π 形等效线路模型统一表示,如图 1 所示。

收稿日期: 2007-09-27; 修回日期: 2007-12-23。
国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217902); 国家自然科学基金资助项目(50507018, 50595414, 60421002); “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA02A01); 教育部科学技术研究重大项目(305008)。

图1 非对称 π 形等效线路模型Fig. 1 Asymmetric π type equivalent transmission line model

下面分 2 种量测方式对支路两端变量之间的联系进行讨论。

1) 支路两端均装有 PMU

这种量测方式下可以直接测量的变量有 $\dot{V}_1, \dot{I}_1, \dot{V}_2, \dot{I}_2$ 。根据基尔霍夫定律有:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - (R + jX)(\dot{I}_1 - j\frac{B_1}{2}\dot{V}_1) \quad (1)$$

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 + (j\frac{B_1}{2}\dot{V}_1 + j\frac{B_2}{2}\dot{V}_2) \quad (2)$$

2) 支路一端装有 PMU 而另一端只能通过远程终端单元(RTU)测量

这里假设 PMU 配置于母线 1, RTU 配置于母线 2, 则可以直接测量的变量有 $\dot{V}_1, \dot{I}_1, P_2, Q_2, U_2$, 其中 U_2 为 $\dot{V}_2$ 的幅值。同样可由 $\dot{V}_1$ 和 $\dot{I}_1$ 计算得 $\dot{V}_2$ 和 $\dot{I}_2$, 如式(1)和式(2)所示。

继而有:

$$P + jQ = \dot{V}_2 \dot{I}_2^* \quad (3)$$

显而易见, 如果要构建全网任意支路两端变量间的直接联系, 则必须保证每条支路至少有一端母线能被 PMU 直接测量。文献[8]所提出的考虑 $N-1$ 情况的直接最小生成树法和考虑 $N-1$ 情况的迭代最小生成树法均能满足这一要求。

2 基于智能优化的参数辨识与估计

本文方法的基本思路是: 首先基于 WAMS 测量数据计算相对残差, 进而对是否存在参数错误进行初步判断, 然后使用 WAMS/SCADA 混合量测数据计算每条支路的测量量误差, 从而辨识出存在参数错误问题的支路, 最后基于 WAMS/SCADA 混合量测数据使用智能优化方法估计支路的正确参数。

2.1 基于相对残差的参数错误判断

在 WAMS 中通常使用线性状态估计, 一个 n 个节点、 m 个测量量的电力系统可以用线性量测方程表示:

$$\mathbf{Z}_{\text{meas}} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{Z}_{\text{meas}}$ 为 m 维 PMU 测量量; $\mathbf{H}$ 为 $m \times (2n-1)$

维量测雅可比矩阵; $\mathbf{x}$ 为 $2n-1$ 维电压状态向量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为 m 维量测噪声向量。

带权重最小二乘法的线性状态估计可表示为:

$$\mathbf{x}_{\text{est}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{H}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{Z}_{\text{meas}}) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}_{\text{est}}$ 为线性状态估计得到的电压向量; $\mathbf{W}$ 为权重矩阵。

为了量度线性状态估计的计算误差, 这里对测量值和由线性状态估计得到的由电压相量计算而来的测量量进行比较^[9], 它们之间的差别使用相对残差来衡量。相对于通常使用的残差, 相对残差能够更灵敏地描述数值相对较小的测量量的变化。下文所指残差均为相对残差, 定义如下:

$$R_{\text{rela}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{z_i - \mathbf{H}_i \mathbf{x}_{\text{est}}}{z_i} \right| \quad (6)$$

式中: R_{rela} 为相对残差; n 为测量量的数目; z_i 为第 i 个测量量; $\mathbf{H}$ 为测量值与待求量之间的关联系数矩阵。

测量误差会严重影响基于相对残差的支路参数错误判断法的效果。因此, 本文基于多时间断面数据状态估计法^[4], 提出将多个时间断面所采集的数据同时放入一次残差计算来降低测量误差对残差计算结果的影响。该方法的计算公式同式(6), 需要修改的是 $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{Z}_{\text{meas}}$ 。修改后的 $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{Z}_{\text{meas}}$ 中, 分别以 $\mathbf{H}_k'$ 和 $\mathbf{Z}_{\text{meas},k}$ 代表第 k 个时间断面线性状态估计中的量测雅可比矩阵和测量量向量。

当系统中不存在参数错误时 R_{rela} 应该为一较小的值, 否则 R_{rela} 会显著增大。该方法的优点在于计算速度快、计算量小, 其缺点是只有量测冗余度大于 1 的支路发生参数错误才会影响该指标。所以该方法的使用必须满足条件: 支路的两端都必须能被 PMU 直接或者间接测量, 后者指由相邻母线电压相量间接计算能获得该母线的电压相量。

2.2 基于测量量误差的参数错误支路辨识

1.2 节已经说明可以通过支路一端的变量结合网络参数计算出另一端的变量, 现以函数形式表示如下:

$$(\dot{V}_2', \dot{I}_2') = F(\dot{V}_1, \dot{I}_1, R, X, B_1, B_2) \quad (7)$$

$$(P_2', Q_2', U_2') = G(\dot{V}_1, \dot{I}_1, R, X, B_1, B_2) \quad (8)$$

式中: $\dot{V}_2'$ 为计算得到的母线 2 的电压相量, 其余带“'”的变量含义与此相同; F, G 为函数。

定义一个新的指标, 用测量量误差 D 表示支路一端变量和通过支路另一端变量计算而来的该端变量之间的差别。考虑到实际的测量装置(PMU 和 RTU)会引入一定的测量误差, 这里也通过采集多

组数据求平均值的方式降低误差的影响。对应于 2 种量测方式测量量误差有 2 种定义:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\text{Re}(\dot{V}_{2i} - \dot{V}_{2i}')}{\text{Re}(\dot{V}_{2i})} \right)^2 + \left(\frac{\text{Im}(\dot{V}_{2i} - \dot{V}_{2i}')}{\text{Im}(\dot{V}_{2i})} \right)^2 + \left(\frac{\text{Re}(\dot{I}_{2i} - \dot{I}_{2i}')}{\text{Re}(\dot{I}_{2i})} \right)^2 + \left(\frac{\text{Im}(\dot{I}_{2i} - \dot{I}_{2i}')}{\text{Im}(\dot{I}_{2i})} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{P_{2i} - P_{2i}'}{P_{2i}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{2i} - Q_{2i}'}{Q_{2i}} \right)^2 + \left(\frac{U_{2i} - U_{2i}'}{U_{2i}} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中: N 为支路两侧同时采集的数据组的数量。

如果 D 显著偏大,则可以判定该支路有参数错误;反之,则代表参数正确。

2.3 基于智能优化的支路参数估计

在辨识出存在参数错误的支路后,整个问题就演变为最优化问题,即以采集的多组测量量为观测向量,寻找最优支路参数使得测量量误差 D 最小。

对于传输线路,需要估计的参数是 $R, X, B^{[3]}$,可表述为如下的带约束优化问题。

$$\begin{cases} O = \min D \\ \text{s. t. } R_{\min} < R < R_{\max} \\ X_{\min} < X < X_{\max} \\ B_{\min} < B < B_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

其中,参数的上下限需要根据实际情况确定。

对于非标准变比两相变压器,需要估计的参数是 X 和变比 $K^{[3]}$,同样可以表述为带约束的优化问题:

$$\begin{cases} O = \min D \\ \text{s. t. } X_{\min} < X < X_{\max} \\ K_{\min} < K < K_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

由于 D 的计算具有高非线性特征,难以用常规方法求解该最优问题。因此,本文选择使用遗传算法^[10]进行求解。参数设置为:初始种群数为 1 000,采用浮点编码,最大迭代次数为 100,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.05。

2.4 基于智能优化的参数辨识流程

基于智能优化的网络参数辨识和估计方法总流程如图 2 所示。

3 算例仿真与分析

3.1 测试算例及 PMU 配置方案

将 IEEE 39 测试系统的标准数据作为低负荷

运行方式,在此基础上增加 10% 负荷作为高负荷运行方式。用于参数辨识与估计的数据是分别在高、低负荷运行方式下各采集 96 组数据并在其中加入高斯噪声形成的。线性状态估计及相对残差计算均以标准数据为基础进行,同样加入高斯噪声来模拟测量装置的误差。本文取 RTU 的测量精度为 0.02, PMU 电压测量精度为 0.002, PMU 电流测量精度为 0.005, PMU 相角测量精度为 0.1°。

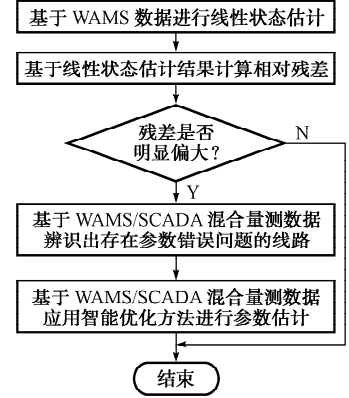


图 2 参数辨识和估计的流程

Fig. 2 Flowchart of parameter identification and estimation

这里使用考虑 $N-1$ 情况的直接最小生成树法^[8]生成 PMU 配置方案,如图 3 所示。选用该方法的原因是该方法能够保证每条支路至少有一端母线能够被 PMU 直接测量。根据需要在母线 38 上增加一台 PMU,目的是形成变压器支路同时被 2 个 PMU 观测的量测场景。

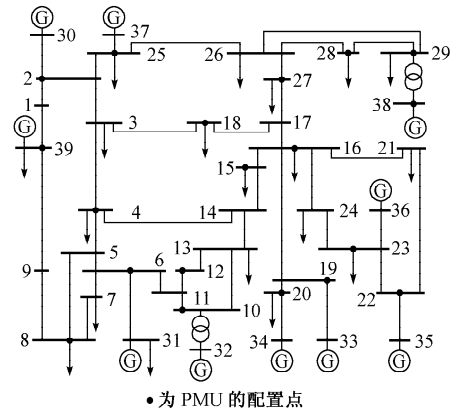


图 3 PMU 配置方案

Fig. 3 PMU placement set

3.2 基于残差分析的错误支路判断

正如 2.1 节中的分析,由于线性状态估计的测量冗余度较低,所以并不是每条支路的参数错误都能够被残差反映出来。仿真结果表明,在 IEEE 39

系统中虽然存在参数错误但是对残差没有影响的支路有:2-30,25-37,6-31,10-32,20-34,19-33,22-35,共计7条,占总支路数的15%。这些支路的共同特征是只能被一个PMU直接或者间接测量。

表1给出了部分传输线路和变压器支路参数错误对线性状态估计残差的影响,计算使用了20个时间断面的数据。无错误参数时最大相对残差为 8.58×10^{-13} 。由表1可见,对于能够辨识的支路,所有的参数错误均导致残差显著偏大。对于变压器支路而言,非标准变比 K 和 X 的影响都比较明显,而传输线路的 X 对残差的影响最为明显。这个结论与文献[3]中的结论一致。

表1 参数错误对线性状态估计残差的影响
Table 1 Impact of parameter error on residual of linear state estimation

含错误参数的支路	参数名	真值	错误值	相对残差
1-2	K	1.070 0	1.000 0	0.073
	X	0.000 7	0.001 4	0.032
17-18	R	0.003 5	0.007 0	0.008
	X	0.041 1	0.082 2	0.019
	B	0.698 7	1.397 4	0.009

3.3 支路参数辨识与估计

本实验分别选择了传输线路28-29和25-26进行参数辨识,其分别代表了2种量测方式,即支路两端均有PMU和支路一端有PMU。

首先,使用测量量误差指标对存在参数错误问题的线路进行辨识。表2中比较了在2种量测方式下各参数有10%错误时,相应测量量误差的大小。2种量测方式下 R 对测量量误差的影响都很小,这是因为 R 的值相对较小,导致其对系统潮流的影响较小;而 X 和 B 的数值要大得多,因而相对影响也大。如表2中数据所示,利用测量量误差 D 能够有效地辨识出存在参数错误的传输线路。

表2 传输线路参数的辨识与估计
Table 2 Identification and estimation of transmission line parameters

目标支路	参数错误支路辨识		参数估计值与真实值的相对误差		
	误差类型	D	R	X	B
29-38	无参数误差	2.940×10^{-4}			
	R 有10%误差	4.162×10^{-4}	0.080 9	2.64×10^{-4}	6.00×10^{-5}
	X 有10%误差	0.075			
	B 有10%误差	0.002			
	无参数误差	0.001 2			
25-26	R 有10%误差	0.001 4	0.347 0	3.36×10^{-3}	1.13×10^{-3}
	X 有10%误差	0.020 1			
	B 有10%误差	0.028 3			
	无参数误差	0.001 2			

然后,分析基于智能优化算法的参数估计精度。表2给出了估计得到的线路参数与真实线路参数的相对误差。无论是哪种量测方式, R 的估计精度最低, X 次之, B 最好。其可能的原因是在参数估计中参数的数值大小决定了其估计的精度,数值越大精度越高。总体来说,两边均配置PMU的方式比一端配置PMU的方式估计精度要高。

3.4 变压器参数辨识与估计

同样选择2条变压器支路29-38和10-32,分别代表支路两端均有PMU和支路一端有PMU这2种量测方式。

首先,使用测量量误差指标对参数错误支路进行辨识。如表3所示,2种量测方式下 K 对测量量误差的影响都比 X 大,这主要是因为变压器的变比在无功潮流计算中是以平方项出现的。由表3数据可知,在2种量测方式下测量量误差 D 均能显著反映变压器参数错误。

表3 变压器参数的辨识与估计
Table 3 Identification and estimation of transformer parameters

目标支路	参数错误支路辨识		参数估计值与真实值的相对误差	
	误差类型	D	K	X
29-38	无参数误差	1.02×10^{-4}		
	K 有2%误差	0.009 7	3.60×10^{-4}	1.16×10^{-4}
	X 有10%误差	0.005 0		
10-32	无参数误差	0.001 2		
	K 有2%误差	0.007 3	4.75×10^{-4}	1.19×10^{-3}
	X 有10%误差	0.003 4		

然后,比较在2种量测方式下不同量测精度对变压器参数估计精度的影响。变压器的有载调压每挡一般为2%,2.5%,5%等,所以对于变压器非标准变比 K 只要能准确估计到百分位即可。表3中实验结果表明该方法能够对 K 的百分位进行准确估计。与 K 比较, X 能获得更高的估计精度,这是因为 K 真正需要估计的是其百分位,而 X 则是整个数值。无论是对 X 还是 K 的估计,两端配置PMU的量测方式均比一端配置PMU的方式能取得更高的估计精度。

3.5 辨识与估计的计算时间

在处理器为P4 3.06 GHz的PC机上,判断一条支路是否存在参数错误的耗时约0.02 s,估计一条支路参数的耗时约2 s。由于对各条支路的参数辨识和估计是相互独立的,因此可以采用并行计算进一步提高计算效率。

4 结语

本文提出了一种基于WAMS/SCADA混合量

测的电力网络参数辨识与估计方法。仿真实验表明,该方法具有不存在收敛性问题、不受残差污染干扰、计算速度快等特点。但是,该方法无法区分参数错误与量测错误,这也是下一阶段的研究课题。

参考文献

- [1] 李强,周京阳,于尔铿,等. 基于混合量测的电力系统状态估计混合算法. 电力系统自动化,2005,29(19):31-35.
LI Qiang, ZHOU Jingyang, YU Erkeng, et al. A hybrid algorithm for power system state estimation based on PMU measurement and SCADA measurement. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 31-35.
- [2] 秦晓辉,毕天姝,杨奇逊. 计及 PMU 的混合非线性状态估计新方法. 电力系统自动化,2007,31(4):28-32.
QIN Xiaohui, BI Tianshu, YANG Qixun. A new methods for hybrid non-linear state estimation with PMU. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 28-32.
- [3] 于尔铿. 电力系统状态估计. 北京:水利水电出版社,1985.
- [4] ALI A, GOMEZ E A. Power system state estimation: theory and implementation. New York, NY, USA: Marcel Dekker Inc, 2004.
- [5] 何桦,柴京慧,卫志农,等. 基于量测残差的改进参数估计方法. 电力系统自动化,2007,31(4):33-36.
HE Hua, CHAI Jinghui, WEI Zhinong, et al. Improved method of parameter estimation based on measurement residuals. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 33-36.
- [6] LIU W, WU F, LUN S. Estimation of parameter errors from measurement residuals in state estimation. IEEE Trans on

Power Systems, 1992, 7(1): 81-89.

- [7] 胡志坚,陈允平,徐玮,等. 基于微分方程的互感线路参数带电测量研究与实现. 中国电机工程学报,2005,25(2):28-33.
HU Zhijian, CHEN Yunping, XU Wei, et al. Principles and realization of live line measurement of parameters of transmission lines with mutual inductance based on differential equations. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 28-33.
- [8] DENEGRI G B, INVERNIZZI M, MILANO F. A security oriented approach to PMU positioning for advanced monitoring of a transmission grid// Proceedings of International Conference on Power System Technology: Vol 2, Oct 13-17, Kunming, China: 793-803.
- [9] REYNALDO F N. State estimation and voltage security monitoring using synchronized phasor measurements. Blacksburg, VA, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [10] HOUCK C R, JOINES J, KAY M G. A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation [EB/OL]. [2007-09-01]. <http://www.ise.ncsu.edu/mirage/GAToolBox/gaot/papers/gaotv5.ps>.

陈晓刚(1980—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:基于 WAMS 的电力系统大规模灾变预防与控制。E-mail: carlcxg1980@126.com

易永辉(1969—),男,博士研究生,主要研究方向:数字化变电站及电力系统广域保护等。E-mail: yyh6006@163.com

江全元(1975—),男,副教授,主要研究方向:电力系统稳定与控制。E-mail: qyj@zju.edu.cn

Network Parameter Identification and Estimation Based on Hybrid Measurement of WAMS/SCADA

CHEN Xiaogang¹, YI Yonghui¹, JIANG Quanyuan¹, CAO Yijia¹, TAO Jia¹, JIANG Zhengwei^{1,2}

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Electric Power Dispatching and Communication Center, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Conventional parameter identifying methods always encounter numerical instability, divergence and residual contamination. This paper proposes a new method to overcome these problems. First, the relative residual is worked out with measurement from the wide-area measurement system (WAMS) to preliminarily judge the existence of parameter error. Then the new method makes full use of the voltage and current phasors gathered by phasor measurement units (PMUs) to establish a direct relationship among the variables at both ends of the branch, with which, the branches with parameter errors can be identified and their parameters estimated with the optimization method as well. Simulation results on the IEEE 39-bus system show that all the parameters of transmission lines and transformers in a power grid can be monitored as long as half of the buses are equipped with PMU.

This work is jointly supported by Special Fund of the Basic Research Program of China (No. 2004CB217902), the National Natural Science Foundation of China (No. 50507018, 50595414, 60421002), the Grand Project of the National Eleventh-Five Year Research Programs of China (No. 2006BAA02A01) and the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (No. 305008).

Key words: parameter identification; wide-area measurement system (WAMS); phasor measurement unit (PMU); supervisory control and data acquisition (SCADA)