

基于 Karush-Kuhn-Tucker 最优条件的 电网可疑参数辨识与估计

曾兵, 吴文传, 张伯明

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机工程与应用电子技术系),
北京市 海淀区 100084)

A Method to Identify and Estimate Network Parameter Errors Based on Karush-Kuhn-Tucker Condition

ZENG Bing, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment
(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Network parameter errors may strongly deteriorate the accuracy of state estimation results and affect both reliability and accuracy of other applications, thus state estimation program should possess the function to recognize and estimate element parameters. In this paper, firstly, based on Lagrangian algorithm an iterative method to identify incorrect parameters is proposed to generate branch parameter set to be modified; then a parameter estimation method based on the sensitivity of parameter to objective function, which represents how the parameters affect the quality of the state estimation solution, is researched, and for the chosen distrustful branch this method calculate the sensitivity of parameters of distrustful branch to objective function of state estimation; finally, the variable step-size successive approximation method is used to estimate the parameters of distrustful branch. This method eschews the numerical stability in traditional methods, so it is practicable. The results of IEEE 14-bus system and IEEE 30-bus systems show that the proposed method is corrective.

KEY WORDS: network parameter errors identification; network parameter estimation; Karush-Kuhn-Tucker (KKT) condition

摘要: 电网元件参数的误差会导致能量管理系统的状态估计结果不准确, 从而影响其他应用结果的可靠性和精确性, 因此状态估计程序应当具有辨识和估计元件参数的功能。首先基于拉格朗日乘子的可疑支路辨识法, 提出了一种迭代辨识算法, 用于生成待修正的支路参数集; 然后研究了基于参数-目标函数灵敏度的参数估计方法, 该方法针对选出的可疑支

路, 计算出可疑支路参数对状态估计目标函数的灵敏度; 最后利用变步长逐次逼近法估计可疑支路参数, 该方法避免了传统方法的数值稳定性问题, 具有很高的实用价值。IEEE 14 和 IEEE 30 标准算例系统验证了所提出方法的正确性。

关键词: 可疑参数辨识; 参数估计; Karush-Kuhn-Tucker 条件

0 引言

自 20 世纪 70 年代状态估计引入调度中心后^[1-2], 已成为调度自动化系统的核心和基石。网络分析和基于网络分析的优化决策与控制都依赖于状态估计的结果。因此状态估计结果必需尽可能地接近真实值, 且要具备高可靠性以满足电网在线决策与控制的需求, 确保现今电力供应的安全性和可靠性^[3-5]。而电网元件参数的误差会导致能量管理系统(energy management system, EMS)的状态估计结果不准确, 影响其他应用结果的可靠性和精确性, 因此状态估计程序应当具有辨识和估计元件参数的功能^[2,6]。

电网参数估计主要包括 2 个关键技术: 一是可疑参数的辨识; 二是参数值的估计。

在可疑参数辨识方面, 文献[7]提出了基于灵敏度的错误参数辨识方法, 已在实际系统中得到应用, 但计算结果可信度不高; 文献[8]提出了一种基于拉格朗日乘子的可疑参数辨识方法, 具有较高的可靠性。本文采用此方法初步确定可疑支路集, 并通过对其辨识结果的分析, 提出了一种迭代辨识算法。

对于电网元件参数的估计, 有载调压变压器变比的估计在 EMS 中的应用已较为成熟^[9-11]。而支路

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50707013); 国家电网公司科技项目。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50707013).

阻抗参数估计的实用化研究则相对较少,通常估计支路阻抗参数最直接的方法是将支路阻抗参数作为状态变量增广到状态估计中进行计算^[12]。由于量测对参数的求导分量容易导致雅可比矩阵条件数跃升,故增广参数后的状态估计数值稳定性显著变差。

文献[13]提出了一种改进方法,即可疑支路潮流补偿量代替可疑支路参数,使状态估计获得无偏的估计结果。而这种方法只可以在一定程度上改善数值稳定性问题。在现场应用中^[14],采用该方法经常会出现支路参数不可估计或者估计结果不合理等问题,数值稳定性仍然较差。文献[15]利用Tabu方法寻求最优解,进行电网支路参数估计。该方法数值稳定性较好,但因为其搜索无方向性,计算速度较慢。

本文首先采用文献[8]提出的方法,实现可疑参数的辨识,通过对其辨识结果的讨论分析,提出了一种迭代辨识算法,用于生成待修正的支路参数集。然后提出一种基于参数-目标函数灵敏度的参数估计方法。该方法首先根据实际的电网模型和实时量测数据,针对可疑支路计算出可疑支路参数对状态估计目标函数的灵敏度,然后采用变步长逐次逼近法,估计出可疑支路的参数,最后修正可疑支路的参数,从而提高应用软件的可靠性和精确性。需要指出的是,本文采用的可疑参数辨识和估计的方法基于同一个数学基础——Karush-Kuhn-Tucker (KKT)最优条件。本文中IEEE 14和IEEE 30系统算例的具体参数配置参见文献[16]。

1 可疑支路辨识

1.1 基于拉格朗日乘子的可疑支路辨识法

参数估计首先要确定可疑支路集。本文首先采用基于拉格朗日乘子的可疑支路辨识法^[8]确定可疑支路集,然后针对其存在的问题,提出一个判断准则,当满足此判断准则时,按估计值修正支路参数,否则支路参数恢复为初始值。

考虑加权最小二乘估计模型

$$\begin{aligned} \min J(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2} \mathbf{r}^T \mathbf{W} \mathbf{r} \\ \text{s.t.} \quad \mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{p}_e &= \mathbf{0} \end{aligned}$$

其中: $\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)$ 是量测残差向量; \mathbf{z} 是量测向量; $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e)$ 是量测对应的系统状态量和线路参数误差

的非线性函数向量; \mathbf{x} 是系统状态向量,包含电压幅值和电压相角; \mathbf{p}_e 是网络参数误差向量; \mathbf{W} 是权重对角阵; $\mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) = \mathbf{0}$ 是零注入节点的等式约束; $\mathbf{p}_e = \mathbf{0}$ 是参数误差的等式约束。

构造拉格朗日乘子

$$L = \frac{1}{2} \mathbf{r}^T \mathbf{W} \mathbf{r} - \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{c}(\mathbf{x}, \mathbf{p}_e) - \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{p}_e$$

式中 $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\lambda}$ 分别是零注入节点和参数误差的等式约束对应的拉格朗日乘子向量,其具体元素值分别为 $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\lambda}$ 。

应用KKT优化条件,可获得量测残差 \mathbf{r} 、零注入等式约束对应的拉格朗日乘子 $\boldsymbol{\mu}$ 和与参数误差有关的拉格朗日乘子 $\boldsymbol{\lambda}$ 的计算公式。将 $\boldsymbol{\lambda}$ 正则化为 $\boldsymbol{\lambda}^N$,正则化拉格朗日乘子 $\boldsymbol{\lambda}^N$ 可作为判别对应支路参数是否可疑的判据:当 $\boldsymbol{\lambda}^N$ 大于其数据门槛,可认为该乘子所对应的参数为可疑参数,并将该支路选进可疑支路集。

1.2 讨论

基于拉格朗日乘子的参数辨识法通过求解参数约束的拉格朗日乘子来判断该参数是否为可疑参数。这种方法的主要优点是能够同时计算出正则化量测残差和错误参数对应的拉格朗日乘子的具体数值,因此可以同时辨识量测和参数错误,数值稳定性较好。

在量测误差较小的情况下,该方法可以可靠辨识错误参数。以IEEE 30系统为例,在无量测误差的条件下,将原有线路 L_{10-20} 的电抗参数改为原来的80%(线路 L_{a-b} 表示由节点 a 到节点 b 的线路),最后得到的可疑支路辨识结果见表1。

表1 无量测误差单支路参数辨识结果
Tab. 1 Identification results of single line's parameters without measurement errors

可疑支路集	L_{10-20}	L_{19-20}	L_{15-18}	L_{18-19}
乘子数值	6.7118	5.8466	5.3870	5.0349

由表1可以看出,可疑支路集中线路 L_{10-20} 参数对应的拉格朗日乘子的数值最大。另外3条正常线路受线路 L_{10-20} 的影响成为可疑支路。只要对乘子数值最大的线路 L_{10-20} 做参数估计并修正其参数,其他正常线路乘子数值会自动减小,并移出可疑支路集。

本文重点考虑存在量测误差的情况:由于量测误差和元件参数误差同样影响状态估计的结果,所以量测误差会对参数辨识结果产生一定影响。一般情况下,量测误差标准差越小,参数错误辨识效果

越好。

1) 单可疑支路辨识。

将原有线路 L₁₂₋₁₄ 的电抗参数改为原来的 4 倍，分别考虑量测误差标准差是 0.001、0.005、0.01、0.05 的情况，最后得到的可疑支路辨识结果如表 2 所示。由表 2 可见，当量测误差标准差小于 0.01 时，错误线路 L₁₂₋₁₄ 所对应的乘子数值最大，对该线路进行参数估计即可修正该线路参数；而当量测误差标准差为 0.01 时，正常线路 L₉₋₁₁ 所对应的乘子数值最大，由于参数估计程序会先对乘子数值最大的支路进行参数估计，因此可能会出现正常线路参数被误改，错误线路参数修正不完全的现象。

表 2 考虑量测误差的单支路参数辨识结果
Tab. 2 Identification results of single line's parameters considering measurement errors

标准差	参数辨识结果			
0.001	可疑支路集	L ₁₂₋₁₄	L ₁₄₋₁₅	L ₁₂₋₁₅
	乘子数值	35.5608	12.4336	12.1653
0.005	可疑支路集	L ₁₂₋₁₄	L ₁₂₋₁₅	L ₁₂₋₁₃
	乘子数值	38.2550	15.7942	14.5205
0.01	可疑支路集	L ₉₋₁₁	L ₁₂₋₁₄	L ₁₂₋₁₅
	乘子数值	49.8252	32.7672	14.9380
0.05	可疑支路集	L ₁₄₋₁₅	L ₁₂₋₁₃	L ₉₋₁₁
	乘子数值	136.1435	113.2357	100.2096

2) 多可疑支路辨识。

将原有线路 L₁₂₋₁₄、L₁₂₋₁₆、L₁₀₋₂₂ 的电抗参数改为原来的 4 倍，分别考虑量测误差标准差是 0.001、0.005、0.01、0.05 的情况，最后得到的可疑支路辨识结果如表 3 所示。从表 3 可以看出，当量测误差标准差小于 0.01 时，错误线路所对应的乘子数值最大，而当量测误差标准差为 0.01 时，正常线路 L₁₀₋₁₇、L₉₋₁₁ 和 L₁₀₋₂₁ 所对应的乘子数值比错误线路 L₁₂₋₁₆ 大，因此同样会出现正常线路参数被误改、错误线路参数修正不完全的现象。

从表 2 和 3 可以看出，当量测误差标准差不大于 0.01 时，错误参数支路在可疑支路集内，辨识结

表 3 考虑量测误差的多支路参数辨识结果
Tab. 3 Identification results of multiple lines' parameters considering measurement errors

标准差	参数辨识结果						
0.001	可疑支路集	L ₁₀₋₂₂	L ₁₂₋₁₄	L ₁₂₋₁₆	L ₁₆₋₁₇	L ₁₀₋₂₁	L ₁₂₋₁₅
	乘子数值	41.998	37.864	32.199	29.431	22.579	21.870
0.005	可疑支路集	L ₁₀₋₂₂	L ₁₂₋₁₄	L ₁₂₋₁₆	L ₁₆₋₁₇	L ₁₂₋₁₅	L ₁₀₋₂₁
	乘子数值	43.775	38.817	29.884	25.312	24.472	21.107
0.01	可疑支路集	L ₁₀₋₂₂	L ₁₀₋₁₇	L ₁₂₋₁₄	L ₉₋₁₁	L ₁₀₋₂₁	L ₁₂₋₁₆
	乘子数值	41.055	37.237	36.7954	34.1054	28.073	27.253
0.05	可疑支路集	L ₂₉₋₃₀	L ₁₄₋₁₅	L ₂₁₋₂₂	L ₁₀₋₂₁	L ₂₂₋₂₄	L ₂₄₋₂₅
	乘子数值	157.550	128.070	96.870	94.114	82.886	75.342

果是可靠的。一般情况下，系统的量测误差标准差可以达到 0.01 以上，因此该方法可以有效得到可疑支路集。但是可疑支路集中的支路参数最终是否接受修正还需要新的判断算法。

1.3 迭代判别法

可疑支路参数被修正后重新计算对应的拉格朗日乘子 λ^N ，若同时满足如下判断准则，则该参数接受修正：

- 1) 参数修正后，该线路对应的拉格朗日乘子 λ^N 比原来明显减小。
- 2) 参数修正后，所有线路对应的最大拉格朗日乘子 λ^N 比原来明显减小。

根据此判断准则，本文提出如图 1 所示的参数辨识估计流程。流程中的参数估计部分将在本文第 2 部分详细介绍。首先采用基于拉格朗日乘子的参数辨识法确定可疑支路集，对于可疑支路集里的每条支路，按照其对应拉格朗日乘子由大至小逐个进行参数估计并判定，若参数修正后满足判断准则，则接受参数修正，新的参数值即为估计值；若不满足，则不接受修正，参数值恢复为原初始值。

以表 2 和 3 中标准差为 0.01 的可疑支路集为例，对 2 表中可疑支路集中的线路进行参数估计的结果如表 4 和 5 所示。从表中可以看出，判断准则

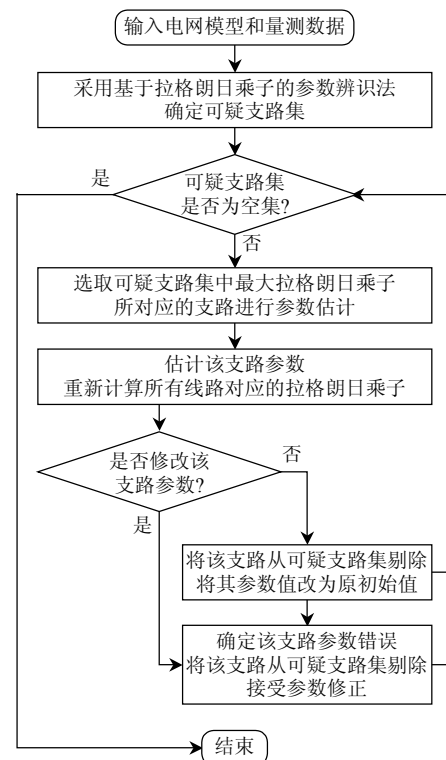


图 1 参数辨识流程

Fig. 1 Flow chart of parameter identification

表 4 考虑判断准则的单支路参数估计结果

Tab. 4 Estimation results of single line's parameters considering criterion

修正次数	线路	电抗 真值/pu	初始值/pu	电抗 估计值/pu	修正前线路 对应的乘子	修正后线路 对应的乘子	修正前所有线路 最大乘子	修正后所有线路 最大乘子	是否修正
1	L ₉₋₁₁	0.208 0	0.208 0	0.508 0	49.825 2	81.069 8	49.825 2	81.069 8	否
2	L ₁₂₋₁₄	0.255 9	1.023 6	0.248 6	32.767 2	2.029 2	49.825 2	49.820 0	是

表 5 考虑判断准则的多支路参数估计结果

Tab. 5 Estimation results of multiple lines' parameters considering criterion

修正次数	线路	电抗 真值/pu	初始值/pu	电抗 估计值/pu	修正前线路 对应的乘子	修正后线路 对应的乘子	修正前所有线路 最大乘子	修正后所有线路 最大乘子	是否修正
1	L ₁₀₋₂₂	0.149 9	0.599 6	0.149 6	41.054 7	0.311 1	41.054 7	37.000 9	是
2	L ₁₀₋₁₇	0.084 5	0.084 5	0.484 5	37.000 9	4.326 3	37.000 9	37.438 3	否
3	L ₁₂₋₁₄	0.255 9	1.023 6	0.273 6	36.749 0	2.655 9	37.000 9	36.071 6	是
4	L ₉₋₁₁	0.208 0	0.208	0.019 8	34.055 6	25.711 6	36.071 6	41.425 7	否
5	L ₁₂₋₁₆	0.198 7	0.794 8	0.204 8	25.464 5	1.533 2	36.071 6	34.096 2	是

避免了可疑支路集中的正常支路参数的误修正,保证了参数辨识与估计的准确性。

2 参数估计

2.1 参数-目标函数灵敏度

参数-目标函数灵敏度是指电网支路参数对状态估计目标函数值的灵敏度,反映了状态估计残差值随支路参数变化而变化的情况。文献[17]基于加权最小二乘状态估计模型,利用优化原理中的 KKT 条件给出了线路参数对状态估计残差目标函数的灵敏度计算方法。

根据该方法可得到线路电阻 r 、电抗 x 、线路充电电容 b_{ij} 和线路变压器变比 T_{ij} 对残差目标函数值 J 的灵敏度 $\frac{\partial J}{\partial r_{ij}}$ 、 $\frac{\partial J}{\partial x_{ij}}$ 、 $\frac{\partial J}{\partial b_{ij}}$ 和 $\frac{\partial J}{\partial T_{ij}}$ 。

由于参数-目标函数灵敏度很好地反映了参数调整对估计结果的影响程度,且没有数值稳定性问题。因此本文把灵敏度法引入参数估计中,解决了传统参数估计方法的数值稳定性问题。

2.2 灵敏度性质

本文以 IEEE 14 系统线路 L₁₋₅ 的电抗参数为例(真值为 0.223),将线路 L₁₋₅ 的电抗值以 0.001 为间隔在区间[0.211,0.235]内摄动,求解该线路在不同电抗值下的参数-目标函数灵敏度。

图 2 显示了该支路的参数-目标函数灵敏度随

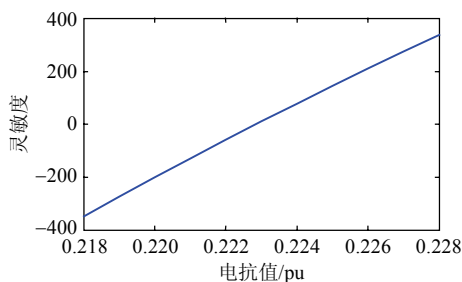


图 2 参数灵敏度曲线

Fig. 2 Curve of the parameter sensitivity

其参数值变化的情况。由图 2 可知,电阻参数为真值 0.223 时,灵敏度接近为 0,说明参数越接近真值,其变化对残差的变化影响越小。这个性质可以用来设定参数估计的收敛判定,即当灵敏度接近 0 时,该线路的参数已接近真值,停止修正迭代。

2.3 参数估计流程

参数对残差目标函数的灵敏度可以用于可疑参数的估计。灵敏度方法不存在数值稳定性和可观测性问题,且可以利用多组历史数据进行辨识和估计。对于单一数据断面,可以建立如下线性规划模型:

$$\min J(\mathbf{x}, \mathbf{a}^0) + \mathbf{S}_{Ja}^T \Delta \mathbf{a} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \Delta \underline{a}_i \leq \Delta a_i \leq \Delta \bar{a}_i, \quad i \in \psi$$

其中: \mathbf{a}^0 是初始参数向量; \mathbf{S}_{Ja}^T 是参数灵敏度向量; $\Delta \mathbf{a}$ 是参数修正向量; Δa_i 是第 i 个参数的本次修正量, $\Delta \underline{a}_i$ 、 $\Delta \bar{a}_i$ 分别为第 i 个参数的下调和上调的步长限制,此步长限制会自动随着参数灵敏度符号改变而缩为原来的一半; ψ 表示参数可疑支路集合。

如果系统存储了大量的历史数据断面,则参数估计算法需要修改式(1)为

$$\min \sum_{t \in \Omega} (J(\mathbf{x}, \mathbf{a}^0, t) + \mathbf{S}_{Ja}^T(t) \Delta \mathbf{a}) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \Delta \underline{a}_i \leq \Delta a_i \leq \Delta \bar{a}_i, \quad i \in \psi$$

其中: t 为某一断面; Ω 为所有历史数据断面的集合。

3 算例分析

3.1 IEEE 14 节点系统参数估计

用图 1 所示的流程图分别对 IEEE 14 节点系统中的线路参数进行辨识与估计,并将估计值与真值比较,验证其结果的正确性(表中 R 为线路电阻, X 为线路电抗, X_t 为变压器电抗, T_t 为变压器变比, C 为线路充电电容)。

本文利用变步长逐次逼近方法达到目标函数值即系统残差最小。在每一次迭代中,参数值根据

灵敏度结果修正一次, 修正后状态估计的残差目标函数值减小, 对应的灵敏度也减小, 残差目标函数值达到最优。当量测误差标准差为 0.001 时, 估计参数值接近真值, 见表 6~9。

表 6 IEEE 14 节点系统单支路阻抗参数估计结果

Tab. 6 Estimated results of single line's parameters of IEEE 14-node system

线路	参数	设定值/pu	估计值/pu	真值/pu
L ₉₋₁₄	R	0.3	0.125 0	0.127
L ₇₋₉	X	0.4	0.173 8	0.174

表 7 IEEE 14 节点系统多支路阻抗参数估计结果

Tab. 7 Estimated results of multiple lines' parameters of IEEE 14-node system

线路	参数	设定值/pu	估计值/pu	真值/pu
L ₉₋₁₄	R	0.1	0.125 0	0.127 0
L ₉₋₁₀	X	0.2	0.087 5	0.084 5
L ₁₀₋₁₁	X	0.3	0.200 0	0.192 0

表 8 变压器电抗和变比估计结果

Tab. 8 Estimated results of transformer's parameters

线路	参数	设定值/pu	估计值/pu	真值/pu
L ₂₋₃	X_t	0.35	0.198 0	0.198
L ₁₋₂	T_t	1.0 0	0.932 3	0.932

表 9 线路充电电容估计结果

Tab. 9 Estimated results of line's shunt susceptance

线路	参数	设定值/pu	估计值/pu	真值/pu
L ₁₋₅	C	-0.20	-0.049 6	-0.049
L ₂₋₄	C	-0.15	-0.033 8	-0.034

图 3 给出了 IEEE 14 系统单支路参数估计的具体迭代数据(线路 L_{4,7} 为可疑支路, 初始电抗参数是 0.4, 参数真值是 0.209)。由图 3 可以看出, 残差目

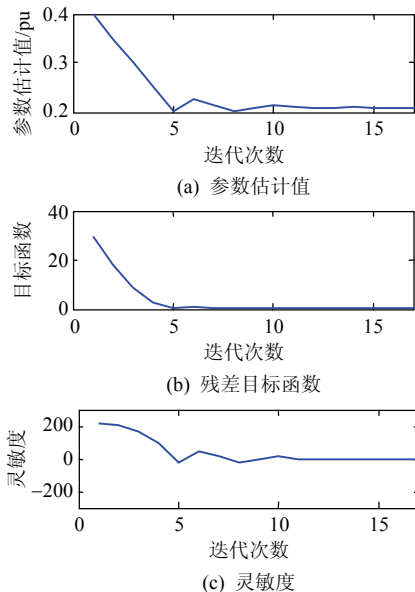


图 3 迭代过程中参数估计值、目标函数和灵敏度的变化趋势

Fig. 3 The variation curves of estimated parameter's value, objective function and sensitivity during the iteration process

标和可疑支路的灵敏度在迭代过程中基本是单调递减的, 具有很好的收敛性。

3.2 IEEE 30 节点系统参数估计

用图 1 所示的流程图分别对 IEEE 30 系统中的参数进行辨识与估计, 并将估计值与真值相比较, 验证参数估计的正确性。

从表 10~12 的估计结果可以看出, 当量测误差标准差为 0.001 时, 本文方法估计出的设备参数精度是可接受的。

表 10 IEEE 30 节点系统单支路阻抗参数估计结果

Tab. 10 Estimated results of single line's parameters of IEEE 30-node system

线路	参数	设定值/pu	估计值/pu	真值/pu
L ₂₂₋₂₄	R	0.3	0.112 5	0.115
L ₁₀₋₂₂	X	0.4	0.150 0	0.149 9

表 11 IEEE 30 节点系统多支路阻抗参数估计结果

Tab. 11 Estimated results of multiple lines' parameters of IEEE 30-node system

线路	参数	设定值/pu	估计值/pu	真值/pu
L ₁₀₋₂₂	R	0.3	0.071 9	0.072 7
L ₁₂₋₁₄	X	0.4	0.250 0	0.255 9
L ₅₋₇	X	0.3	0.116 7	0.116 0

表 12 变压器电抗、变比和线路充电电容估计结果

Tab. 12 Estimated results of transformer's parameters and line's shunt susceptance

线路	参数	设定值/pu	估计值/pu	真值/pu
L ₁₋₃	X_t	0.3	0.556 3	0.556 0
L ₃₋₄	T_t	0.9	0.962 5	0.968 0
L ₅₋₇	C	-0.2	-0.012 5	-0.010 2

需要指出的是, 当量测误差较大时, 本文所提方法的估计结果可能会偏离真值。这是所有现存估计方法的共性问题, 也是由问题的性质所决定的。

如表 13 所示, 我们设计了 4 种不同量测误差分布情况, 对线路 L_{2,5} 的电抗参数进行估计(电抗真值为 0.198 3)。这 4 种量测的标准差分别是 0.001、0.005、0.01 和 0.05。很明显, 当量测的标准差不大于 0.01 时, 可以得到可接受的参数估计结果; 而标准差较大时, 结果偏离真值较远, 精确度降低。

表 13 不同量测误差分布条件下的参数估计结果

Tab. 13 Parameter estimated results under different measurement errors

标准差	L _{2,5} 电抗的估计值/pu	与真值的偏差/pu
0.001	0.198 4	0.000 1
0.005	0.200 8	0.002 5
0.01	0.205 2	0.006 9
0.05	0.094 5	-0.103 8

4 结论

针对目前比较有效的基于拉格朗日的可疑参

数辨识法,提出了一种迭代辨别方法,提高了辨识的可靠性。更重要的是,通过引入了参数-目标函数灵敏度的概念和计算,实现了一种可疑参数的估计方法。该方法没有数值稳定性问题,具有现场应用的前景。

参考文献

- [1] Schweppe F C, Wildes L J. Power system static state estimation, part I: exact model[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, PAS-89(1): 120-125.
- [2] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 53-60.
Li Bijun, Xue Yusheng, Gu Jinwen, et al. Status quo and prospect of power system state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 53-60(in Chinese).
- [3] 胡学浩. 智能电网: 未来电网的发展态势[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.
Hu Xuehao. Smart grid: A development trend of future power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 1-5(in Chinese).
- [4] 林宇峰, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8-14.
Lin Yufeng, Zhong Jin, Wu Felix. Discussion on smart grid supporting technologies[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 8-14(in Chinese).
- [5] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
Chen Shuyong, Song Shufang, Li Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7 (in Chinese).
- [6] 王凤萍. 对能量管理系统建设的几点建议[J]. 电网技术, 2000, 24(2): 77-79.
Wang Fengping. Some suggestion on construction of energy management system[J]. Power System Technology, 2000, 24(2): 77-79(in Chinese).
- [7] 杨滢. 拓扑错误辨识与参数估计的理论分析和算法研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [8] Zhu J. A identification of network parameter errors[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 586-592.
- [9] Cutsem T, Quintana V. Network parameter estimation using online data with application to transformer tap position estimation[J]. IEEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 1988, 135(1): 31-40.
- [10] Handschin E, Kliokys E. Transformer tap position estimation and bad data detection using dynamic signal modeling[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 810-817.
- [11] 王兴, 刘广一, 于尔铿. 基于变比变化检测的变压器抽头位置跟踪估计算法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 162-165.
Wang Xing, Liu Guangyi, Yu Erkeng. Transformer tap position tracing estimation based on turn ratio changing detection[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 162-165(in Chinese).
- [12] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 189-207.
- [13] Liu W H E, Wu F F, Liu S M. Estimations of parameter errors form measurement residuals in state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 81-89.
- [14] 杨滢, 孙宏斌, 张伯明, 等. 集成于 EMS 中的参数估计软件的开发与应用[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 43-49.
Yang Ying, Sun Hongbin, Zhang Boming, et al. Development and application of parameter estimation software integrated into EMS[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 43-49(in Chinese).
- [15] 宁辽逸, 孙宏斌, 吴文传, 等. 基于状态估计的电网支路参数估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 7-12.
Ning Liaoyi, Sun Hongbin, Wu Wenchuan, et al. State estimation based branch parameter estimation method for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 7-12(in Chinese).
- [16] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 324-328.
- [17] Minguez R, Conejo A J. State estimation sensitivity analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 1080-1091.



曾兵

收稿日期: 2009-09-26.

作者简介:

曾兵(1985—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统状态估计, E-mail: cengb07@mails.tsinghua.edu.cn;

吴文传(1973—),男,副教授,博士,主要从事调度中心自动化系统的研究和教学工作, E-mail: wuwench@tsinghua.edu.cn;

张伯明(1948—),男,教授,博士生导师, CSEE 和 IEEE 高级会员,主要从事电力系统分析、控制中心计算机应用的教学研究工作, E-mail: zhangbm@tsinghua.edu.cn.

(责任编辑 王晔)