

混合整数线性规划形式的抗差状态估计方法

陈艳波¹, 马进², 陈茜¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 悉尼大学 电气与信息学院, 澳大利亚 悉尼 NSW2006)

摘要: 现有的抗差状态估计方法一般要求解非线性非凸优化问题, 并用基于梯度的方法予以求解, 难以保证获得全局最优解, 且可能存在收敛性问题。基于精确线性化量测方程提出了一种混合整数线性规划形式的抗差状态估计方法。首先通过引进辅助状态向量和辅助量测向量, 得到了线性量测方程; 通过引入代表量测量是否为正常量测量的二值变量, 将线性量测方程变为线性量测不等式; 最后求取一个可使尽可能多的正常量测量来支持的状态向量。所提方法抗差能力强, 从数学上可保证获得全局解; 无需非线性迭代。仿真算例验证了所提方法的有效性和高效性。

关键词: 电力系统; 抗差估计; 状态估计; 不良数据辨识; 混合整数线性规划; 混合整数非线性规划; 收敛性

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.005

0 引言

电力系统状态估计 SE(State Estimation)是能量管理系统 EMS(Energy Management System)的基础和核心, 是电网安全运行的重要保障^[1-2]。SE 算法最早由 Schweppe 和 Wildes 在 1970 年提出^[3], 至今已有多种 SE 方法。目前在国内外广泛应用的 SE 方法是加权最小二乘法 WLS(Weighted Least Squares)^[3]及在此基础上提出的快速分解法 FDSE(Fast Decoupled State Estimation)^[4]。WLS 和 FDSE 的优点是原理简单、计算效率高; 缺点是抗粗差能力弱, 易受不良数据的影响^[5]。为此一般需要在 WLS 和 FDSE 之后加上一个基于残差的不良数据辨识环节, 如最大标准化残差 LNR(Largest Normal Residual)方法^[6-7]或估计辨识法^[8-10]等。LNR 方法和估计辨识法对单一不良数或弱相关的多不良数据具有较好的辨识能力, 而对强相关的多不良数据(包括杠杆点不良数据)的辨识能力不强^[6-7]。

除 WLS 和 FDSE 之外, 人们还提出了抗差状态估计 RSE(Robust State Estimation), 在估计过程中自动抑制不良数据。已提出的 RSE 方法主要包括加权最小绝对值估计 WLAV(Weighted Least Absolute Value)^[11-12]、二次线性估计 QL(Quadratic-Linear)、二次常数估计 QC(Quadratic-Constant)^[13-15]等。近年来提出的以合格率最大为目标的状态估计 MNMR(Maximum Normal Measurement Rate)^[16-18]、指数型目标函数状态估计 MES(Maximum Exponential

Square)^[19]、最大指数绝对值状态估计 MEAV(Maximum Exponential Absolute Value)^[20-21]、t 型抗差状态估计^[22]、电力系统线性状态追踪方法^[23]、双线性抗差状态估计方法^[24]以及量测噪声自适应抗差状态估计方法^[25]均属于 RSE 的范畴。

最近国外学者提出了一种混合整数非线性规划 MINP(Mixed Integer Nonlinear Programming)形式的 RSE 方法^[26](以下简称为 MINP)。MINP 的优点是对包括杠杆点不良数据在内的多不良数据具有很好的抑制能力。MINP 的缺点是: 在数学上, MINP 要求解非线性非凸优化问题, 采用基于梯度的方法求解时, 从理论上难以保证获得全局解; MINP 的计算效率很低, 难以满足大规模网络的实时计算要求。以上缺点可归因于 SE 量测方程的非线性, 若能采用某种变换将 SE 的原始非线性量测方程精确变换为线性化的量测方程, 则以上 2 个缺点有望得到解决。

由国外学者提出的双线性状态估计 BSE(Bilinear State Estimation)方法^[27-29]给出了 SE 量测方程的精确线性化方法。若将 BSE 中的精确线性化量测方程应用于 MINP, 则其变为混合整数线性规划 MILP(Mixed Integer Linear Programming)模型。MILP 不仅具有良好的抗差性和收敛性, 而且从数学上可保证获得全局最优解, 并具有较高的计算效率。

1 MINP 概述

一般地, SE 的非线性量测方程可表示为:

$$z = h(x) + \varepsilon \quad (1)$$

其中, $z \in \mathbf{R}^m$ 为量测向量, 一般包括支路功率量测、节点注入功率量测及节点电压幅值量测等, m 为测量的总个数; $x \in \mathbf{R}^n$ 为包括所有节点电压幅值和

收稿日期: 2014-10-28; 修回日期: 2015-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407069)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407069)

相角(参考节点相角除外)的状态变量向量,本文简称为状态向量, $n=2N-1$, N 为网络中节点的总数目; $\mathbf{h}: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$ 为状态向量到量测向量的非线性映射,即量测表达式; $\mathbf{e} \in \mathbf{R}^m$ 为量测误差向量。

文献[26]基于量测不确定度理论,认为每个量测量均具有不确定性,任意量测量均可看作位于以量测值为中心的区间中,用公式可表示为:

$$z_i - t_i^- \leq h_i(\mathbf{x}) \leq z_i + t_i^+ \quad i=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

其中, $h_i(\mathbf{x})$ 为 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 的第 i 个分量; z_i 为 $\mathbf{z}$ 的第 i 个分量; t_i^- 和 t_i^+ 分别为用以衡量量测不确定度的下界和上界,它们可根据量测仪表的性能评定。

文献[26]认为,若所有的量测量均位于其容许的不确定区间内,则存在一个状态向量估计值,使得所有的量测量均满足式(2);然而由于量测量中不可避免会含有不良数据,它们对应的量测估计值 $h_i(\hat{\mathbf{x}})$ ($\hat{\mathbf{x}}$ 为状态向量估计值)不满足式(2),即此时不存在一个状态向量而使得所有的量测量均满足式(2)。为了将所有的量测量(包括正常量测和不良数据)表示为统一的不确定形式,文献[26]引入如下表式:

$$z_i - t_i^- - Mb_i \leq h_i(\mathbf{x}) \leq z_i + t_i^+ + Mb_i \quad i=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

其中, M 为充分大的标量; b_i 为量测量 z_i 对应的 0/1 二值变量,对于正常量测 $b_i=0$,对于不良数据 $b_i=1$ 。

基于式(3),文献[26]提出的 MINP 模型如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^m b_i \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} h_i(\mathbf{x}) \leq z_i + t_i^+ + Mb_i \\ h_i(\mathbf{x}) \geq z_i - t_i^- - Mb_i \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (4)$$

MINP 模型(4)的意义是:通过估计一个状态向量,使得尽可能多的量测量能够相互匹配。

2 MILP 方法

2.1 MILP 提出的动机和思路

MINP 问题的根本原因在于量测方程的非线性(如式(1)所示),如果能采用某种变换将非线性量测方程(1)精确变化为线性量测方程,则 MINP 模型(4)将变为 MILP 问题,则全局寻优性和计算效率等问题均可得到解决。

文献[27-29]通过引进辅助状态向量和辅助量测向量,得到了如下形式的量测方程:

$$\tilde{\mathbf{z}} = \mathbf{B}\mathbf{y} + \tilde{\mathbf{e}} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{y} = \{U_i, K_{ij}, L_{ij}\} \in \mathbf{R}^{N+2b}$ 为辅助状态向量, $U_i = U_{mi}^2$ 为电压幅值的平方项, U_{mi} 为节点 i 的电压幅值, $K_{ij} = U_{mi}U_{mj} \cos \theta_{ij}$ 和 $L_{ij} = U_{mi}U_{mj} \sin \theta_{ij}$ 为支路 ij (i 和 j 为支路两端节点)对辅助状态向量的贡献, $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 为支路 ij 两端的相角差; $\tilde{\mathbf{z}} = \{U_i, P_{ij}, Q_{ij}, P_i, Q_i, I_{ij}^2\} \in \mathbf{R}^m$ 为

量测向量, P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为支路 ij 的有功和无功量测, P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的注入有功和注入无功量测, I_{ij}^2 为支路 ij 的电流幅值量测的平方项, I_{ij} 为支路 ij 的电流幅值量测; $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{m \times (N+2b)}$ 为常数雅可比矩阵,其非零元由支路(包括变压器)的导纳参数和变比决定; $\tilde{\mathbf{e}} \in \mathbf{R}^m$ 为噪声矢量; b 为支路的总数目(并联支路等效为一条支路处理)。

BSE 第 1 阶段基于式(5)构建了 WLS 模型,可得到辅助状态向量 $\mathbf{y}$ 的估计值,进一步利用其第 2 和第 3 阶段得到 SE 原始状态向量 $\mathbf{x}$ 的估计值。

对比式(1)和式(5)可发现,辅助状态向量和辅助量测向量的引入使得 SE 的原始非线性量测方程(1)变为精确线性化的量测方程(5),若将其应用于 MINP,则可解决 MINP 存在的问题。

2.2 MILP 的建模和求解

2.2.1 MILP 第 1 阶段

考虑到量测量的不确定性,式(5)可改写为如下形式:

$$\tilde{z}_i - \tilde{t}_i^- - Mb_i \leq \mathbf{B}_i \mathbf{y} \leq \tilde{z}_i + \tilde{t}_i^+ + Mb_i \quad i=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

其中, $\mathbf{y}$ 为式(5)中的辅助状态向量,其第 i 个分量为 y_i ; $\mathbf{B}_i$ 为式(5)中 $\mathbf{B}$ 的第 i 行; $\tilde{t}_i^-$ 和 $\tilde{t}_i^+$ 分别为用以衡量量测不确定度的下界和上界; M 为任意充分大的标量; b_i 为量测量 y_i 对应的 0/1 二值变量,对于正常量测 $b_i=0$,对于不良数据 $b_i=1$ 。

将线性化量测不等式(6)应用于 MINP,可得 MILP 模型如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^m b_i \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \mathbf{B}_i \mathbf{y} \leq \tilde{z}_i + \tilde{t}_i^+ + Mb_i \\ \mathbf{B}_i \mathbf{y} \geq \tilde{z}_i - \tilde{t}_i^- - Mb_i \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (7)$$

MILP 模型式(7)可采用商用软件 CPLEX^[30]求解,即可辨识不良数据,并可得到辅助状态向量的估计值(记为 $\hat{\mathbf{y}}$),进一步可采用 BSE 的第 2 阶段和第 3 阶段^[27-29]得到 SE 的原始状态向量 $\mathbf{x}$ 的估计值,但本文不采用此法,以下给出一种更为高效的 MILP 第 2 阶段和第 3 阶段的建模方法。

2.2.2 MILP 第 2 阶段

MILP 的第 2 阶段采用如下形式的非线性变换:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{g}}(\hat{\mathbf{y}}) \quad (8)$$

其中, $\tilde{\mathbf{u}} = \{U_{mi}, \theta_{ij}^{(c)}, \theta_{ij}^{(s)}\}$ 为伪量测向量, $\theta_{ij}^{(c)} = \arccos[K_{ij} / (U_{mi}U_{mj})]$, $\theta_{ij}^{(s)} = \arcsin[L_{ij} / (U_{mi}U_{mj})]$, $U_{mi} = \sqrt{U_i}$ 。

利用非线性变换(8)可得到所有节点电压幅值的估计值以及所有支路两端电压相角差的估计值(一条支路可得到 2 个相角差估计值)。MILP 第 3 阶段的任务是利用所有支路两端电压相角差的估计

值估计除参考节点外的所有节点的相角。

2.2.3 MILP 第 3 阶段

理论上,所有支路两端电压相角差的估计值与所有节点相角的关系为:

θ_b=Aθ (9)

其中,θ_b={(θ_{ij}^(c)+θ_{ij}^(s))/2}∈R^b为伪量测量向量;θ=[θ₂,⋯,θ_N]^T∈R^{N-1}为除参考节点外的所有节点相角组成的向量(设节点 1 为参考节点);A={a_{ij}} (1≤i≤b, 1≤j≤N-1)为降阶支路-节点关联矩阵(不包括参考节点对应列),其元素由式(10)决定。

a_{ij}=⎧⎩1 节点j为支路i发端节点
-1 节点j为支路i收端节点
0 其他 (10)

由于θ_b由MILP的第1和第2阶段的估计值计算得到,因此式(9)并不严格成立。可将由MILP的第1和第2阶段得到的θ_b看作含有噪声的伪量测,从而可得:

θ_b=Aθ+τ (11)

其中,τ∈R^b为噪声矢量。

显然,式(11)可用WLS或WLAV估计θ,这里采用WLS进行估计,可得如下估计模型:

min J(θ)=(θ_b-Aθ)^TW_θ(θ_b-Aθ) (12)

其中,W_θ为对角权重矩阵,其对角元素取决于噪声τ的方差。

严格意义上,W_θ的对角元素应通过误差传播理论由式(8)得到,本文采用简化处理方法,令W_θ=I,则由模型(12)可得正则方程:

A^TAθ=A^Tθ_b (13)

由于矩阵A的条件数一般较小,可直接采用正交分解法求解式(13)。模型式(13)属于二次规划QP(Quadratic Programming)问题,也可使用CPLEX求解,即可得到所有节点相角的估计值。

综上可得MILP的计算步骤如下。

步骤1 形成矩阵B、A;形成常数雅可比矩阵B及降阶支路-节点关联矩阵A。

步骤2 求解LP;利用CPLEX求解模型式(7)。

步骤3 非线性变换:运行非线性变换式(8),得到所有节点电压幅值的估计值以及所有支路两端电压相角差的估计值(一条支路可得到2个相角差估计值)。

步骤4 求解QP;利用CPLEX求解模型式(12),得到所有节点相角的估计值。

步骤5 结束。

本文提出的MILP与MINP的理论基础相同。与MINP相比,MILP具有以下3个特点。

(1)模型仅需要求解1个MILP问题、1个非线

性变换及1个QP问题,从数学上可保证获得全局最优解。

(2)算法无需非线性迭代,故不存在收敛性问题。

(3)第1阶段和第3阶段均可使用CPLEX求解,计算效率很高^[30]。而与BSE相比,本文提出的方法具有良好的抗差性,可有效辨识包括杠杆点不良数据在内的多不良数据;而BSE仅可辨识单一不良数据或弱相关的多不良数据。

3 算例分析

本节以一个3节点系统及IEEE系统对所提MILP的性能进行测试,测试环境为PC机,CPU为Intel(R) Core(TM) i3 M370,主频为2.40 GHz,内存为4.00 GB。

3.1 3节点系统算例测试

3.1.1 正确性测试

首先以图1所示的3节点系统进行测试,支路参数及量测量(均为标么值)分别如表1和表2所示,其中节点1为参考节点。

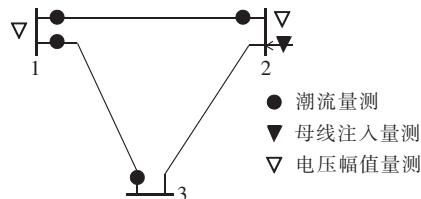


图1 3节点系统单线图及量测配置图

Fig.1 One-line diagram and measurement configuration of 3-bus system

表1 3节点系统支路参数

Table 1 Branch parameters of 3-bus system

支路		电阻	电抗	充电电纳b _c
首端节点	末端节点			
1	2	0.01	0.03	0
1	3	0.02	0.05	0
2	3	0.03	0.08	0

表2 3节点系统量测值

Table 2 Measurements of 3-bus system

序号	量测量	量测值	噪声标准差	序号	量测量	量测值	噪声标准差
1	U _{m1}	1.0040	4×10 ⁻³	7	P ₁₃	1.1720	8×10 ⁻³
2	U _{m2}	0.9680	4×10 ⁻³	8	Q ₁₃	0.6650	8×10 ⁻³
3	P ₁₂	0.8880	8×10 ⁻³	9	P ₃₁	-1.1360	8×10 ⁻³
4	Q ₁₂	0.5640	8×10 ⁻³	10	Q ₃₁	-0.5740	8×10 ⁻³
5	P ₂₁	-0.8770	8×10 ⁻³	11	P ₂	-0.4930	1×10 ⁻²
6	Q ₂₁	-0.5310	8×10 ⁻³	12	Q ₂	-0.3010	1×10 ⁻²

a. 非线性WLS及MINP估计结果。

对图1所示的3节点系统,在如表2所示的量测集下,WLS经过4次迭代后收敛(收敛精度为10⁻⁶),其估计结果如表3所示(表中电压幅值为标么值;为便于比较,表3同时给出了状态变量的真值)。MINP

表 3 WLS 和 MILP 得到的状态向量估计值
Table 3 Estimated state vectors by WLS and MILP

节点 i	状态变量					
	真值		WLS 估计结果		MILP 估计结果	
	U_{mi}	θ_i/rad	U_{mi}	θ_i/rad	U_{mi}	θ_i/rad
1	1.0000	0	0.9987	0	0.9931	0
2	0.9732	-0.0217	0.9731	-0.0217	0.9675	-0.0217
3	0.9431	-0.0482	0.9430	-0.0481	0.9370	-0.0483

的估计结果与 WLS 的估计结果几乎完全一致,表中未再列出。

b. MILP 估计结果。

采用本文提出的 MILP 时,第 1、2 阶段的估计结果如表 4 所示(表中, y_i 和 $\tilde{u}_i$ 分别为向量 $\mathbf{y}$ 和 $\tilde{\mathbf{u}}$ 的第 i 维, $\hat{y}_i$ 和 $\hat{u}_i$ 分别为 y_i 和 $\tilde{u}_i$ 的估计值)。MILP 第 3 阶段的估计结果已列于表 3 中。

表 4 MILP 第 1 阶段和第 2 阶段得到的估计结果
Table 4 Estimations obtained at first and second stages of MILP

序号	y_i	$\hat{y}_i$	$\tilde{u}_i$	$\hat{u}_i$
1	U_{m1}^2	0.9864	U_{m1}	0.9932
2	U_{m2}^2	0.9360	U_{m2}	0.9675
3	U_{m3}^2	0.8782	U_{m3}	0.9371
4	$U_{m1}U_{m2}\cos\theta_{12}$	0.9607	θ_{12}	0.0214
5	$U_{m1}U_{m3}\cos\theta_{13}$	0.9297	θ_{13}	0.0479
6	$U_{m2}U_{m3}\cos\theta_{23}$	0.9063	θ_{23}	0.0269
7	$U_{m1}U_{m2}\sin\theta_{12}$	0.0210	θ_{12}	0.0218
8	$U_{m1}U_{m3}\sin\theta_{13}$	0.0453	θ_{13}	0.0487
9	$U_{m2}U_{m3}\sin\theta_{23}$	0.0237	θ_{23}	0.0262

由表 3 可见,系统正常运行时 MILP 得到的状态向量估计值与 WLS 及 MINP 得到的估计值相差不大。在计算效率方面,MILP 是 MINP 的近 11 倍(具体地,两者的计算耗时分别是 7 ms 和 76 ms),MILP 是 WLS 的 4 倍。而 MILP 的第 2 和第 3 阶段的计算效率是 BSE 第 2 和第 3 阶段效率的 1.5 倍。

3.1.2 全局寻优性测试

前文中已经指出,MILP 可以从理论上确保获得全局最优解,而已有的非线性非凸形式的 SE 方法则无法从理论上确保获得全局最优解,本小节将给出算例证明。

仍以图 1 所示的 3 节点系统为例,考虑一组电压水平较低的情形,此时量测量如表 5 所示(事实上,

表 5 3 节点系统另一组量测值
Table 5 Another measurement set of 3-bus system

序号	量测量	量测值	噪声标准差	序号	量测量	量测值	噪声标准差
1	U_{m1}	1.0000	4×10^{-3}	7	P_{13}	19.9930	8×10^{-3}
2	U_{m2}	0.7549	4×10^{-3}	8	Q_{13}	11.4821	8×10^{-3}
3	P_{12}	9.1845	8×10^{-3}	9	P_{31}	-9.3618	8×10^{-3}
4	Q_{12}	6.1364	8×10^{-3}	10	Q_{31}	15.0958	8×10^{-3}
5	P_{21}	-7.9643	8×10^{-3}	11	P_2	-0.3277	1×10^{-2}
6	Q_{21}	-2.4761	8×10^{-3}	12	Q_2	-0.5105	1×10^{-2}

此时系统发生了静态电压失稳现象),量测量皆为标幺值。分别使用 WLS 以及 MILP 进行估计,前者经过 18 次迭代后收敛(收敛精度为 10^{-6})。状态变量真值、WLS 的估计结果以及 MILP 的估计结果如表 6 所示。

表 6 WLS 及 MILP 估计结果
Table 6 Estimated state vectors by WLS and MILP

节点 i	状态变量					
	真值		WLS 估计结果		MILP 估计结果	
	U_{mi}	θ_i/rad	U_{mi}	θ_i/rad	U_{mi}	θ_i/rad
1	1.0000	0	0.9941	0	1.0000	0
2	0.7551	-0.2876	-0.7450	-16.0000	0.7551	-0.2877
3	0.7705	-1.5370	-0.7698	315.7542	0.7704	-1.5372

由表 6 可见,WLS 收敛于其中一个没有实际物理意义的局部最优解;而本文提出的 MILP 则得到了具有实际物理意义的全局最优解,从而验证了理论分析的正确性。

3.1.3 抗差性测试

将支路 1-3 的电抗值缩小为原值的 1/10(则节点 1 附近的量测量变为杠杆点);同时在表 2 中的量测量 Q_{13} 上增加 10% 的噪声以模拟不良数据,此为含杠杆点不良数据的情形。分别使用 WLS+LNR (WLS 带 LNR 辨识不良数据环节)及本文提出的 MILP 进行估计。

当用 WLS+LNR 进行估计时,首次得到的最大标准化残差对应的量测量为 P_2 ;删去 P_2 ,再次运行 WLS+LNR,此时得到的最大标准化残差对应的量测量为 Q_{31} 。

由此可见,对于此含有杠杆点不良数据的算例,WLS+LNR 发生了残差污染和残差淹没现象,导致不良数据辨识失败。而运用本文提出的 MILP 则正确地辨识出不良数据 Q_{13} ,从而证明了 MILP 可以有效抑制包括杠杆点不良数据在内的不良数据,显示了良好的抗差性。

3.2 IEEE 系统算例测试

3.2.1 抗差性能测试

当噪声标准差为 0.001 p.u.时,对 IEEE 各测试系统,由 MILP 得到的电压幅值和电压相角的最大估计误差(分别用 $\|\Delta U_m\|$ 和 $\|\Delta\theta\|$ 表示)如表 7 所示,其中 $\|\Delta U_m\|$ 为标幺值。

由表 7 可见,在所有的测试中 MILP 的估计结果均正确。而随着噪声标准差的减小,由 MILP 得到的状态向量的最大估计误差也随之减小,从而证明了 MILP 的估计值逼近于真值。当在以上各测试系统中随机叠加 5% 比例的不良数据时,MILP 得到的状态向量的最大估计误差基本不变,从而证明了 MILP 具

表 7 MILP 得到的状态变量的最大估计误差

Table 7 Maximum estimation deviations of MILP

系统	最大估计误差	
	$\ \Delta U_m \ $	$\ \Delta \theta \ / \text{rad}$
IEEE 9	1.0×10^{-3}	1.5×10^{-3}
IEEE 14	2.1×10^{-3}	3.1×10^{-3}
IEEE 30	2.4×10^{-3}	3.0×10^{-3}
IEEE 39	3.7×10^{-3}	4.1×10^{-3}
IEEE 57	4.0×10^{-3}	5.1×10^{-3}
IEEE 118	4.2×10^{-3}	4.3×10^{-3}
IEEE 300	5.9×10^{-3}	4.8×10^{-3}

有良好的抗差性。

进一步在 IEEE 300 节点系统中,将支路 1-5 电抗缩小为原来的 1/10(则节点 1 附近的量测量变为杠杆点),同时设置 4 个强相关不良数据(P_1 、 Q_1 、 P_{15} 和 Q_{15}),然后分别采用 WLAV 和 MILP 进行估计,估计结果如表 8 所示,量测量皆为标么值。由表 8 可见,WLAV 无法有效辨识杠杆点不良数据;而 MILP 则对杠杆点不良数据具有很好的抑制性,显示了良好的抗差性。

表 8 IEEE 300 节点系统 WLAV 及 MILP 估计结果

Table 8 Estimation results of WLAV and MILP for IEEE 300-bus system

量测量	真值	量测量	WLAV		MILP	
			估计值	残差	估计值	残差
P_1	-0.9000	-0.8100	0.0000	-0.8100	-0.8996	0.0896
Q_1	-0.4900	-0.4413	0.0000	-0.4413	-0.4902	0.0489
P_{15}	4.2934	3.8593	2.8736	0.9857	4.2930	-0.4337
Q_{15}	1.0140	0.9134	0.7983	0.1151	1.0141	-0.1007

3.2.2 计算效率测试

文献[26]指出,MINP 的计算效率特别低,对规模稍大系统的计算效率要求也难以满足。本小节分别在不同规模的 IEEE 系统上对 MINP 和 MILP 进行了多次测试,不同系统对应的量测量的个数及平均计算耗时如表 9 所示,MILP 平均计算耗时与系统规模的关系如图 2 所示。由图 2 可见,MILP 的平均计算耗时与系统规模近似成正比,故 MILP 适应于大规模系统的在线应用。

表 9 不同 IEEE 测试系统中量测量的个数及平均计算耗时

Table 9 Measurement quantity and average time consumption for different IEEE bus systems

系统规模	量测量个数	MINP 计算耗时/ms	MILP 计算耗时/ms
IEEE 9	60	567	63
IEEE 14	119	1416	118
IEEE 30	251	2175	145
IEEE 39	298	2939	173
IEEE 57	480	8632	411
IEEE 118	1067	29781	1144
IEEE 300	2533	102295	2495

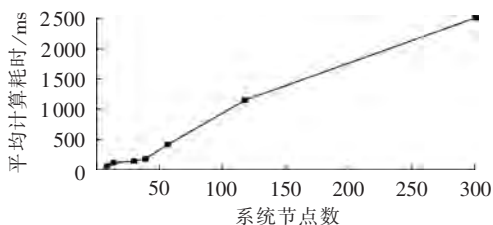


图 2 MILP 平均计算耗时与系统规模的关系

Fig.2 Relationship between average time consumption by MILP and system size

4 结语

针对已有状态估计存在的难以保证全局最优解及可能收敛困难等问题,本文提出了 MILP 形式的状态估计方法,该方法的优点是:(1)对包括杠杆点不良数据在内的多不良数据具有良好的抑制能力,显示了良好的抗差性;(2)从理论上可确保获得全局最优解;(3)不存在收敛性问题;(4)模型可采用商业软件 CPLEX 进行求解,具有很高的计算效率。

参考文献:

[1] 印永华,郭剑波,赵建军,等. 美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术,2003,27(10):8-11.
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
[2] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术,2003,27(9):T2-T6.
HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America power grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): T2-T6.
[3] SCHWEPPE F C, WILDES J. Power system static state estimation, part I~III[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1): 120-135.
[4] GARCIA A, MONTIELLI A, ABREU P. Fast decoupled state estimation and bad data processing[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(5): 1645-1652.
[5] 丁俊健,何光宇,梅生伟,等. 电力系统抗差状态估计研究综述[J]. 电工电能新技术,2011,30(3):59-64.
QI Junjian, HE Guangyu, MEI Shengwei, et al. A review of power system robust state estimation [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2011, 30(3): 59-64.
[6] ABUR A, EXPOSITO A G. Power system state estimation: theory and implementation[M]. New York, USA: Marcel Dekker, 2004.
[7] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
[8] XIANG N D, WANG S Y, YU E K. A new approach for detection and identification of multiple bad data in power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(2): 454-462.
[9] 徐玮韡,刘东,柳劲松,等. 考虑质量标签的多数据源配电网状态估计算法[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):78-81,86.
XU Weiwei, LIU Dong, LIU Jinsong, et al. State estimation based on quality tag for distribution network with multiple data

- sources[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4): 78-81,86.
- [10] 冯迎宾,李智刚,王晓辉. 海底观测网电力系统状态估计[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):80-83,89.
FENG Yingbin,LI Zhigang,WANG Xiaohui. State estimation for power system of seafloor observatory network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):80-83,89.
- [11] WEI Hua,SASAKI H,KUBOKAWA J. An interior method for power system weighted nonlinear L1 norm static state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1998,13(2):617-623.
- [12] 郭伟,单渊达. 基于原-对偶内点算法的 WLAV 状态估计[J]. 电力系统自动化,1999,23(4):32-35.
GUO Wei,SHAN Yuanda. Weighted least absolute value state estimation based on primal-dual interior point algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(4):32-35.
- [13] MERRILL H M,SCHWEPPE F C. Bad data suppression in power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1971,PAS-90(6):2718-2725.
- [14] BALDICK R,CLEMENTS K A,PINJO D Z,et al. Implementing non-quadratic objective functions for state estimation and bad data rejection[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1997,12(1):376-382.
- [15] 郭伟,单渊达. M 估计方法及其在电力系统状态估计中的应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):26-31.
GUO Wei,SHAN Yuanda. M-estimation and its application in power system state estimation[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(9):26-31.
- [16] 何光宇,董树锋. 基于测量不确定度的电力系统状态估计(1): 结果评价[J]. 电力系统自动化,2009,33(19):21-24.
HE Guangyu,DONG Shufeng. Power system static state estimation based on uncertainty of measurement (part one):result evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(19):21-24.
- [17] 何光宇,董树锋. 基于测量不确定度电力系统状态估计(2): 方法研究[J]. 电力系统自动化,2009,33(20):32-36.
HE Guangyu,DONG Shufeng. Power system static state estimation based on uncertainty of measurement (part two):a new method [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(20):32-36.
- [18] 何光宇,董树锋. 基于测量不确定度电力系统状态估计(3): 算法比较[J]. 电力系统自动化,2009,33(21):28-31.
HE Guangyu,DONG Shufeng. Power system static state estimation based on uncertainty of measurement (part three): algorithms compared[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(21):28-31.
- [19] 郭焯,张伯明,吴文传. 指数型目标函数电力系统抗差状态估计的解法与性能分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(7): 89-95.
GUO Ye,ZHANG Boming,WU Wenchuan. Solution and performance analysis to a robust state estimation method with exponential objective function[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(7):89-95.
- [20] CHEN Yanbo,LIU Feng,HE Guangyu,et al. Maximum exponential absolute value approach for robust state estimation[C]//IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON). Auckland,New Zealand:IEEE,2012:1-6.
- [21] 付艳兰,陈艳波,姚锐,等. 基于最大指数绝对值目标函数的抗差状态估计方法[J]. 电网技术,2013,37(11):3166-3171.
FU Yanlan,CHEN Yanbo,YAO Rui,et al. A robust state estimation approach based on objective function of maximum exponential absolute value[J]. Power System Technology,2013,37(11):3166-3171.
- [22] 颜全椿,卫志农,徐泰山,等. 基于 Gauss-Markov 模型的电力系统 t 型抗差状态估计[J]. 电力自动化设备,2014,34(6): 135-140.
YAN Quanchun,WEI Zhinong,XU Taishan,et al. Robust t-type state estimation based on Gauss-Markov model for power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6): 135-140.
- [23] 陈艳波,陈茜,马进,等. 电力系统线性状态追踪方法[J]. 电网技术,2015,39(2):472-477.
CHEN Yanbo,CHEN Qian,MA Jin,et al. A novel linear state tracking approach of power systems[J]. Power System Technology,2015,39(2):472-477.
- [24] 陈艳波,马进. 一种双线性抗差状态估计方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(6):41-47.
CHEN Yanbo,MA Jin. A bilinear robust state estimation method for power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(6):41-47.
- [25] 陈艳波,马进,文一字. 一种电力系统量测噪声自适应抗差状态估计方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):66-73.
CHEN Yanbo,MA Jin,WEN Yiyu. An adaptive robust state estimation approach for measurement noise[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(8):66-73.
- [26] IRVING M R. Robust state estimation using mixed integer programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(3):1519-1520.
- [27] GOMEZ-QUILES C,de la VILLA J A,GOMEZ-EXPOSITO A. A factorized approach to WLS state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(3):1724-1732.
- [28] GOMEZ-EXPOSITO A,GOMEZ-QUILES C,de la VILLA J A, et al. Bilinear power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(1):493-501.
- [29] GOMEZ-QUILES C,GIL H A,de la VILLA J A,et al. Equality-constrained bilinear power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(2):902-910.
- [30] LODI A. MIP computation,ser. 50 years of integer programming 1958-2008 [M]. JÜNGER M ed. Berlin,Germany:Springer-Verlag,2009:619-645.

作者简介:



陈艳波

陈艳波(1982—),男,河南西峡人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统状态估计、电力系统稳定与控制(E-mail:yanbochen2008@sinacom);

马进(1975—),男,山西太原人,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

陈茜(1991—),女,北京人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统状态估计。

(下转第49页 continued on page 49)

Protection failure boundary model of impedance relay
with positive-sequence voltage polarization

JIANG Aihua¹,XUE Chen²

(1. College of Electrical Engineering,Guangxi University,Nanning 530004,China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Corporation Maintenance Company,Chengdu 610000,China)

Abstract: A set of protection failure boundary model with the fault distance and transition resistance size as its core factors is proposed to evaluate the transition resistance toleration of impedance relay and investigate its improper operation due to the transition resistance. The impedance relay with positive-sequence voltage polarization is explicitly analyzed,which has stable protection zone and excellent toleration for transition resistance. The maximum transition resistance that the relay can tolerate is defined as the protection failure boundary resistance. The protection failure boundary resistance and corresponding fault distance are calculated based on the protection failure boundary model to draw the curve of protection failure boundary resistance. The concept of protection failure coefficient is introduced to assess the toleration for transition resistance and risk. Results of PSCAD simulation show the proposed model can precisely figure out the maximal transition resistance a relay can tolerate.

Key words: relay protection; protection failure; fault location; transition resistance; positive-sequence voltage; impedance relay; models

(上接第 31 页 continued from page 31)

Robust state estimation in form of mixed integer linear programming

CHEN Yanbo¹,MA Jin²,CHEN Qian¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,North China Electric Power University,Beijing 102206,China;2. School of Electrical and Information Engineering,

University of Sydney,Sydney NSW2006,Australia)

Abstract: The existing robust state estimation approaches normally apply the gradient-based methods to solve the problems of nonlinear and non-convex optimization,which cannot guarantee the globally optimized solution and may not be convergent. A method of robust state estimation in the form of mixed integer linear programming is proposed based on the exact linear measurement equations. An auxiliary state vector and an auxiliary measurement vector are introduced to obtain the linear measurement equations;a binary variable used to identify a measurement as normal or abnormal is then introduced to transform the linear measurement equations into the linear measurement inequalities;a state vector supported by the normal measurements as more as possible is finally estimated. Without nonlinear iteration,the proposed approach has excellent robustness to mathematically guarantee the globally optimized solution. Simulative results demonstrate its effectiveness and efficiency.

Key words: electric power systems; robust estimation; state estimation; bad-data identification; mixed integer linear programming; mixed integer nonlinear programming; convergence