

基于集合论估计的电网状态辨识

(二) 基于区间约束传播的求解方法

王彬¹, 董树锋², 王治华³, 何光宇⁴

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东省广州市 510600; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 3. 国网上海市电力公司电力调度控制中心, 上海市 200122; 4. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240)

摘要: 量测误差有界情况下的状态辨识模型是典型的约束满足问题,且变量和约束均可以区间的形式给出。因此可采用区间分析的方法来求解该约束满足问题。文中首先通过常规的区间约束传播算法来求解该模型,然而得到的结果局部相容且具有较大的保守性。为解决该问题,提出了改进的区间约束传播算法,一方面在区间约束传播算法中引入单调性,有效消除了单调变量出现多次带来的保守性;另一方面通过增加冗余约束,对原有约束集进行扩展,在较大程度上消除了区间约束传播算法的局部相容性所带来的保守性。

关键词: 状态估计; 集合论估计; 区间约束传播; 改进区间约束传播

0 引言

文献[1]提出了基于集合论估计理论进行状态辨识的解决思路,建立了基于集合论的统一模型,充分考虑了状态辨识中可用的信息,描述了状态集合和量测量集合的基本形式。本文将进一步对量测误差有界情况下状态辨识模型的求解方法进行讨论。

在量测误差有界的情况下,状态辨识的目标在于求解满足约束条件的状态变量的下限值 x^- 和上限值 x^+ ,并进一步求解满足约束条件的量测变量的下限值 z^- 和上限值 z^+ 。设计求解算法时应主要考虑以下三点原则。①结果的可信性:保证所有满足约束的状态解均隶属于区间 $[x^-, x^+]$,所有满足约束的量测解均隶属于区间 $[z^-, z^+]$,否则一旦出现解的遗漏,就可能导致结果未包含系统的真实状态,此时结果可信性得不到保证;②结果的保守性:在保证结果可信性的情况下,应得到尽可能小的解区间,否则解区间过大,不能充分反映所有信息,将不利于后续的应用;③求解的高效性:应选择计算效率较高的求解算法,以满足状态可信辨识实时在线应用的要求。

由于量测误差有界情况下的状态可信辨识模型是典型的约束满足问题,且变量和约束均可以区间的形式给出,因此可采用区间分析的方法^[2-3]来求解

该约束满足问题,即通过区间约束传播算法不断收缩状态区间和量测区间。该方法计算效率高,结果具有可信性,但存在一定的保守性,需结合电力系统的特点提出改进措施来消减结果的保守性。

在文献[4]提出的基于改进区间约束传播来求解状态区间方法的基础上,本文全面阐述了区间约束传播的理论及其在电网状态辨识中的应用。论述了改进算法,并论证了其对于消除保守性的有效性,最后通过更为详实的算例证明了所述方法对于求解误差有界情况下的状态可信辨识模型具有高效性、低保守性等特点。

1 区间约束传播

针对约束满足问题^[5],不同的学者提出了不同的收缩算子,其中区间约束传播方法^[6-10]是较为高效的一种。下文将介绍区间约束传播的基本思想、具体收缩过程和保守性分析。

1.1 区间约束传播的基本思想

当一个变量的取值发生变化时,可能会通过变量之间的约束关系,对其他变量的取值或取值范围产生影响,即形成了约束传播的过程。因此,可通过对变量的不同赋值方式来触发约束传播过程,从而消除不满足约束的值。特别地,在约束传播过程中可采用区间运算的方式来消除不满足约束的值,称之为区间约束传播。

1.2 区间约束传播过程

约束满足问题 (constraint satisfaction

收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2016-01-06。

上网日期: 2016-01-21。

国家自然科学基金资助项目(51207136)。

problem, CSP)^[5]可表示为一个三元组 (X, D, C) , 其中 X 为变量集, D 为变量的域(D_i 为 X_i 的域), C 为关于变量集 X 的有限约束集合。如果变量的域以区间的形式给出,则可转化为

$$H: (f(x) = y, x \in [x], y \in [y]) \quad (1)$$

式中: $x \in \mathbb{R}^n$ 为变量集,区间向量 $[x]$ 为变量的初始域;函数 $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ 表征变量之间的约束集; $y \in \mathbb{R}^m$ 可用于表征不同的约束形式,如对于第 i 个约束,若为等式约束,则 $[y_i] = [0, 0]$,若为不等式约束,以 $f_i(x) \geq 0$ 为例,则 $[y_i] = [0, M]$,其中 M 为足够大的正数。

设约束满足问题的解集合为 $\chi = \bigcap_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} \chi_j$, π_i 为将解集合 χ 投影到变量 x_i 所在坐标轴的操作算子。考察变量 x_i 和约束 j (即 $f_j(x) = y_j$),假设存在函数 g_i^j ,使得

$$f_j(x) = y_j \Leftrightarrow x_i = g_i^j(x^{(i)}, y_j) \quad (2)$$

成立,则称 g_i^j 为 x_i 相对于约束 j 的解函数。其中 $x^{(i)} = (x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)^T$ 。

根据式(1)可知

$$\pi_i(\chi) \subseteq [g_i^j]([x^{(i)}, [y_j]]) \cap [x_i] \quad (3)$$

其中 $[x^{(i)}] = ([x_1], [x_2], \dots, [x_{i-1}], [x_{i+1}], \dots, [x_n])^T$, $[g_i^j]$ 为 g_i^j 某种形式的区间扩展函数,一般选取为自然区间扩展函数。

遍历所有的变量和约束,并令

$$[\hat{x}_i] = [g_i^j]([x^{(i)}, [y_j]]) \cap [x_i] \quad (4)$$

即可求得一次收缩后的区间向量 $[\hat{x}]$ 。由于在收缩过程中,变量的区间在不断变化,约束 j 对变量区间的收缩可能传播到约束 $1 \sim j-1$,从而影响到这些约束中其他变量的区间,因此在完成一次收缩后需重新遍历所有的变量和约束,即存在迭代收缩的过程。迭代过程的终止条件可采用区间向量 $[\hat{x}]$ 和初始区间向量 $[x]$ 的相对距离指标 r 是否小于给定数值 ζ 来衡量,相对距离指标 r 的具体形式为:

$$r([x][\hat{x}]) = \max_i \max_{x_i \in [x_i]} \max \left\{ 0, \frac{x_i - \hat{x}_i^+}{|\hat{x}_i^+|}, \frac{\hat{x}_i^- - x_i}{|\hat{x}_i^-|} \right\} \quad (5)$$

在实际应用中,经常出现不存在解函数 g_i^j ,此时可通过引入中间变量的方式将约束进行拆分。以约束 $e^x + x = y$ 为例,变量 x 不存在解析形式的解函数,可引入变量 $z = e^x$,其初始区间 $[z] = [-M, M]$ (M 为足够大的正数),并将约束拆分为两个子约束 $\{e^x - z = 0, x + z = y\}$,此时变量 x 和 z 均存在解函数。引入中间变量的方法概念直观、操作便捷,但由于中间变量的引入,将使得同一变量的不同函数形式被作为独立变量来处理,会带来相关性问题,参见1.3节。

1.3 区间约束传播的保守性分析

文献[11]将区间约束传播方法应用于电力系统状态估计,但并未解决保守性的问题。下文将对区间约束传播的保守性进行分析。

区间约束传播得到的结果是局部相容的,因为其在收缩时,对每一个约束单独进行处理,忽略了不同约束之间相同变量的关系。本质上是约束间变量的相关性,使得结果具有保守性。

为消除局部相容带来的保守性问题,引入冗余约束 $g(x) = z$ 。虽然冗余约束没有引入任何新的信息,但其变量的组织形式与原约束不同,可加强约束传播的过程,从而有望消除或减少局部相容带来的保守性。

综上所述,区间约束传播方法的优点在于只需迭代进行区间运算,无需进行基于分支定界的区间二分,计算效率高;缺点则在于所得结果仅局部相容,而非全局相容,结果具有保守性。

1.4 状态辨识模型的约束满足问题形式

状态辨识模型中,量测量 $z = h(x)$,另有物理约束 $g(x) = 0$ 和 $l(x) \geq 0$ 。结合约束满足问题的上述表示形式(式(1)),可将状态辨识问题写成约束满足问题的一般形式,具体为

$$H: \begin{cases} z - h(x) \\ g(x) \\ l(x) \end{cases} = y \in \begin{cases} [0, 0] \\ [0, 0] \\ [0, M] \end{cases}, \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \in \begin{pmatrix} [x^{(0)}] \\ [z^{(0)}] \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: $[z^{(0)}]$ 为由量测误差界确定的量测变量的初始区间, $[x^{(0)}]$ 为状态变量的初始区间,可根据运行经验进行选取,如节点电压幅值可选取为 $[0.5, 1.5]$,节点电压相角可选取为 $[-\pi, \pi]$ 。

求解约束满足问题,即为消除变量域 D 中不满足约束集 C 的变量值。因此,通过把状态辨识模型写成约束满足问题的形式(式(6)),就可以采用区间约束传播来求解。

2 改进区间约束传播

为解决区间运算中相关性带来的保守性,学者提出了不同的区间扩展函数形式,以得到保守性更小的运算结果。

考虑单调性的区间扩展函数,可完全消除单调变量出现多次的相关性问题所带来的保守性,即对于多次出现的变量在给定区间域内均为单调变量的函数 f ,其考虑单调性的区间扩展函数就是最优区间扩展函数。此外,考虑单调性的区间扩展函数,无法消除非单调变量出现多次的相关性问题所带来的保守性,即对于多次出现的变量在给定区间域内均为非单调变量的函数 f ,其考虑单调性的区间扩展

函数与自然区间扩展函数一致。

文献[12-14]将考虑单调性的区间扩展函数应用到区间约束传播算法,提出了考虑单调性的区间约束传播算法的基本思路,但并未给出其有效性的数学证明。本文则给出了考虑单调性的区间约束传播算法有效性的数学证明(限于篇幅,参见附录A),本节将对应用考虑单调性的区间约束传播算法来求解误差有界情况下的状态辨识问题进行讨论。

2.1 引入单调性

分析量测方程和潮流方程中是否存在单调变量。在电力系统运行中,一般认为有功功率与节点电压相角强相关,且功角差越大,传输的有功功率越大;无功功率与节点电压幅值强相关,无功功率从电压偏高的节点传输到电压偏低的节点。可见,量测方程和潮流方程中存在单调性,下文将具体介绍此两类单调变量。

1) 有功功率对节点电压相角的单调性

以支路有功功率 P_{ij} 为例,考察其对节点电压相角 θ_i 和 θ_j 的偏导数:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} = -\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} = v_i v_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (7)$$

式中: θ_{ij} 为支路 ij 的电压相角差; g_{ij} 和 b_{ij} 分别为支路 ij 的电导和电纳; v_i 和 v_j 为节点电压幅值的状态量。

在电力系统中,满足 $v_i > 0, v_j > 0$ 。对于常规的输电线路,满足 $b_{ij} < 0, |g_{ij}| \ll |b_{ij}|$,以及 $|\theta_{ij}|$ 很小。因此,可推得

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} > 0 \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

即支路有功功率对节点电压相角具有单调性。对于一些特殊的输电线路,该结论不一定成立。但这部分特殊线路在电力系统所占比例很小,即对大部分线路而言,均满足式(8)。

2) 无功功率对节点电压幅值的单调性

以支路无功功率 Q_{ij} 为例,考虑其对节点电压幅值量测量 V_i 和 V_j 的偏导数:

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = -2v_i(b_{ij} + b_{ij}^{sh}) - v_j(g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = -v_i(g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (10)$$

式中: b_{ij}^{sh} 为支路 ij 的接地电纳。

在电力系统中,各节点电压均在额定电压附近运行,因此 $v_i \approx 1.0, v_j \approx 1.0$ 。对于常规的输电线路,

满足 $|b_{ij}^{sh}| \ll |b_{ij}|$ 。因此,可推得

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} > 0 \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

即支路无功功率对节点电压幅值具有单调性。

同理,可将上述有关单调性的结论推广到节点注入功率,即 $\partial P_i / \partial \theta_i > 0, \partial P_i / \partial \theta_j < 0, \partial Q_i / \partial V_i > 0, \partial Q_i / \partial V_j < 0, \forall j \in I$,其中, P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的注入有功和无功功率, I 为与节点 i 相连的节点集合。

基于上述结论,对表征有功功率的量测方程或潮流方程进行区间约束传播时,可将关联系节点的电压相角作为单调变量;对表征无功功率的量测方程或潮流方程进行区间约束传播时,可将关联系节点的电压幅值作为单调变量。

2.2 增加冗余约束

1.3节指出,通过恰当地选取冗余约束,可在一定程度上消除局部相容带来的保守性^[15]。针对状态辨识模型,量测变量之间存在着间接的约束关系,如对于节点,其注入功率和支路功率的和恒为零,对于支路,有功网损和无功网损存在近似的比例关系等。下文将根据量测方程推导出3类冗余约束,分别为节点功率平衡约束、支路功率平衡约束和支路相角差约束。

1) 节点功率平衡约束

节点注入功率和与节点关联的支路功率应保持平衡,即

$$P_i = \sum_{j \in I} P_{ij} + g_i^{sh} V_i^2 \quad (12)$$

$$Q_i = \sum_{j \in I} Q_{ij} + b_i^{sh} V_i^2 \quad (13)$$

式中: g_i^{sh} 和 b_i^{sh} 分别为节点 i 的接地电导和接地电纳。

对于节点 i ,建立节点功率平衡约束的前提是量测集中包含节点 i 的注入功率量测,以及与节点 i 关联的所有支路在节点 i 侧的支路功率量测。

2) 支路功率平衡约束

根据量测方程,可得到网损的表达式为:

$$P_{ij} + P_{ji} = (g_{ij} + g_{ij}^{sh})V_i^2 + (g_{ij} + g_{ji}^{sh})V_j^2 - 2V_i V_j g_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (14)$$

$$Q_{ij} + Q_{ji} = -(b_{ij} + b_{ij}^{sh})V_i^2 - (b_{ij} + b_{ji}^{sh})V_j^2 + 2V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (15)$$

利用式(14)和式(15),消除 $\cos \theta_{ij}$,可得

$$b_{ij}(P_{ij} + P_{ji}) + g_{ij}(Q_{ij} + Q_{ji}) = (b_{ij}g_{ij}^{sh} - g_{ij}b_{ij}^{sh})V_i^2 + (b_{ij}g_{ji}^{sh} - g_{ij}b_{ji}^{sh})V_j^2 \quad (16)$$

同理,可得到首末端功率差值的表达式为:

$$P_{ij} - P_{ji} = (g_{ij} + g_{ij}^{sh})V_i^2 - (g_{ij} + g_{ji}^{sh})V_j^2 - 2V_iV_jb_{ij}\sin\theta_{ij} \quad (17)$$

$$Q_{ij} - Q_{ji} = -(b_{ij} + b_{ij}^{sh})V_i^2 + (b_{ij} + b_{ji}^{sh})V_j^2 - 2V_iV_jg_{ij}\sin\theta_{ij} \quad (18)$$

利用式(17)和式(18),消除 $\sin\theta_{ij}$,可得

$$g_{ij}(P_{ij} - P_{ji}) - b_{ij}(Q_{ij} - Q_{ji}) = (g_{ij}^2 + b_{ij}^2)(V_i^2 - V_j^2) + b_{ij}b_{ij}^{sh}V_i^2 - b_{ij}b_{ji}^{sh}V_j^2 \quad (19)$$

式(16)和式(19)即为表征支路功率平衡的冗余约束。对于支路 ij ,建立支路功率平衡约束的前提是量测集中包含该支路首末端的功率量测。

3)支路的电压相角差约束

由于区间约束传播对不同的约束进行独立处理,使得同一变量及其某种函数形式在不同的约束间被作为独立变量,从而带来了保守性。在量测方程和潮流方程中,以支路的电压相角差 θ_{ij} 及其正弦 $\sin\theta_{ij}$ 、余弦 $\cos\theta_{ij}$ 形式出现最为频繁,因此需要针对其建立冗余约束,具体为

$$\begin{cases} \theta_{ij} = -\theta_{ji} \\ \cos\theta_{ij} = \cos\theta_{ji} \\ \sin\theta_{ij} = -\sin\theta_{ji} \\ \cos^2\theta_{ij} + \sin^2\theta_{ij} = 1 \end{cases} \quad (20)$$

将由式(12)、式(13)、式(16)、式(19)和式(20)组成的冗余约束 $r(x) = 0$ 加入到原问题中,可得到新的约束满足问题,即

$$H: \begin{pmatrix} z - h(x) \\ g(x) \\ l(x) \\ r(x) \end{pmatrix} = y \in \begin{pmatrix} [0,0] \\ [0,0] \\ [0,M] \\ [0,0] \end{pmatrix}, (x) \in \begin{pmatrix} [x^{(0)}] \\ [z^{(0)}] \end{pmatrix} \quad (21)$$

2.3 求解步骤

由以上讨论,可得到基于改进区间约束传播的状态可信辨识求解步骤如下。

步骤 1:初始化。根据误差界值信息,确定量测变量的初始区间 $[z^{(0)}]$;根据运行经验,确定状态变量的初始区间 $[x^{(0)}]$;根据零注入节点的分布,确定潮流方程约束 $g(x) = 0$;根据量测配置情况,确定冗余约束 $r(x) = 0$ 。从而,形成约束满足问题的基本模型(式(21))。

步骤 2:单调性校验。对于表征有功功率的约束,校验约束函数对节点电压相角是否具有单调性,对于表征无功功率的约束,校验约束函数对节点电压幅值是否具有单调性。

步骤 3:区间收缩。对于任意约束,若存在单调性变量,且单调性变量出现多次,则采用考虑单调性

的区间约束传播算法进行一次收缩;若不存在单调性变量,或单调性变量仅出现一次,则采用区间约束传播算法进行一次收缩。

步骤 4:迭代。将步骤 3 中收缩后的区间作为新的初始区间,重复进行步骤 3,并判断收缩前后的区间是否满足迭代终止条件 $r([x^{(k)}], [x^{(k+1)}]) \leq \zeta$,若满足,终止迭代。

基于改进区间约束传播的状态可信辨识求解方法具有以下特点。

1)结果具有可信性。在区间收缩过程中,用区间序列从外围不断逼近真实的解集合,直到收敛,因此收敛过程中,不存在解的遗漏。

2)结果保守性较小。考虑单调性的区间扩展函数可消除同一约束中变量多次出现带来的保守性;引入冗余约束可消除不同约束间变量多次出现带来的保守性。因此,本文提出的改进方法可较大程度地消除保守性。结果保守的程度可参见第 3 节算例分析部分。

3)计算效率高。从收缩过程可以看出,可同时得到状态变量和量测变量的区间,此外收缩过程仅涉及区间运算,不涉及优化模型的求解,因此计算效率高,能够满足状态可信辨识实时在线应用的要求。

3 算例分析

本节将从结果可信性、结果保守性和计算效率 3 个方面,来对比分析本文所提出的基于改进区间约束传播算法的求解方法(简记为 ICP++)与现有的基于常规区间约束传播算法的求解方法(简记为 ICP)的性能。

对标准测试系统,通过在潮流结果的基础上添加幅值为 2% 的均匀分布的误差,形成量测数据。相应地,量测误差的界设定为 $[-0.02z_t, 0.02z_t]$,其中 z_t 为潮流解。

对于基于区间分析的求解方法,量测变量的初始区间 $[z^{(0)}]$ 可根据量测误差的界值设定为 $[z - 0.02|z_t|, z + 0.02|z_t|]$ 。状态变量中节点电压幅值的初始区间设定为 $[0.5, 1.5]$ (标么值),节点电压相角的初始区间设定为 $[-\pi, \pi]$ 。区间约束传播的收敛精度为 $\zeta = 10^{-5}$ 。

3.1 结果可信性测试

结果可信性是指结果应包含所有满足约束条件的解,以确保该结果包含系统的真实状态。对于标准测试系统,系统的真实状态已知,因此可直接测试该状态是否包含于结果区间。设系统的真实状态为 x_t ,对应的量测变量的取值为 z_t ,求解后系统的状态区间为 $[\hat{x}]$,量测区间为 $[\hat{z}]$ 。若 $x_t \notin [\hat{x}]$,称为状态

区间不可信;若 $z_i \notin [\hat{z}]$,称为量测区间不可信。

本节将在 IEEE 14 节点系统上对这两种算法的结果可信性进行测试。首先模拟了 2 000 个测试样本,针对每个测试样本,分别采用两种算法计算状态区间和量测区间,并判断该区间是否可信。测试发现:对于 ICP 和 ICP++,其结果均是可信的。

3.2 结果保守性测试

本节将针对 IEEE 14 节点系统,分别通过这两种算法计算得到相应的状态区间 $[\hat{x}]$ 和量测区间 $[\hat{z}]$ 。对于状态区间 $[\hat{x}]$,通过比较以下 3 种形式的宽度来比较不同算法间的保守性:

$$\begin{cases} w_{avr}([\hat{x}]) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w([\hat{x}_i]) \\ w_{max}([\hat{x}]) = \max_{i=(1,2,\dots,m)} w([\hat{x}_i]) \\ w_{min}([\hat{x}]) = \min_{i=(1,2,\dots,m)} w([\hat{x}_i]) \end{cases} \quad (22)$$

表 1 WLS, WLAV, ICP, ICP++ 算法得到的节点电压幅值和节点电压相角的计算结果

Table 1 Computational results of voltage amplitude and voltage phase angle achieved by WLS, WLAV, ICP, ICP++ algorithm

节点	电压幅值						电压相角/rad					
	WLS	WLAV	ICP		ICP++		WLS	WLAV	ICP		ICP++	
			下限值	上限值	下限值	上限值			下限值	上限值	下限值	上限值
1	1.060 4	1.059 2	1.056 2	1.063 1	1.057 2	1.063 1	0	0	-0.083 6	-0.089 8	-0.086 0	-0.087 8
2	1.045 4	1.044 3	1.040 7	1.049 7	1.042 1	1.048 2	-0.087 1	-0.087 0	-0.213 0	-0.230 1	-0.219 8	-0.225 6
3	1.010 3	1.009 2	1.003 9	1.016 7	1.006 7	1.012 9	-0.222 4	-0.222 4	-0.175 6	-0.187 9	-0.178 6	-0.183 3
4	1.019 4	1.018 2	1.015 3	1.024 2	1.016 3	1.021 6	-0.180 4	-0.180 7	-0.151 3	-0.158 1	-0.152 0	-0.155 9
5	1.020 4	1.019 2	1.017 4	1.024 0	1.017 4	1.022 7	-0.153 4	-0.153 6	-0.230 2	-0.269 4	-0.244 7	-0.254 0
6	1.070 5	1.069 2	1.060 0	1.075 9	1.066 3	1.070 3	-0.248 4	-0.248 5	-0.227 2	-0.242 7	-0.230 7	-0.238 0
7	1.062 5	1.061 3	1.057 8	1.062 1	1.058 7	1.062 0	-0.233 5	-0.233 6	-0.227 0	-0.242 6	-0.230 5	-0.237 8
8	1.090 5	1.089 4	1.085 7	1.090 6	1.086 6	1.090 5	-0.233 3	-0.233 4	-0.254 3	-0.271 0	-0.257 8	-0.266 2
9	1.056 5	1.055 4	1.051 7	1.056 0	1.052 6	1.056 0	-0.260 9	-0.260 9	-0.255 2	-0.275 7	-0.260 5	-0.269 1
10	1.051 5	1.050 4	1.045 9	1.051 9	1.047 6	1.051 1	-0.263 7	-0.263 7	-0.246 5	-0.273 2	-0.254 9	-0.263 8
11	1.057 5	1.056 3	1.050 3	1.059 4	1.053 5	1.057 2	-0.258 3	-0.258 3	-0.236 0	-0.293 8	-0.259 4	-0.269 1
12	1.055 5	1.054 3	1.042 7	1.065 8	1.051 1	1.055 5	-0.263 2	-0.263 3	-0.249 5	-0.284 1	-0.261 1	-0.270 7
13	1.050 5	1.049 3	1.040 5	1.055 0	1.046 1	1.050 3	-0.264 8	-0.264 9	-0.270 6	-0.293 9	-0.276 8	-0.286 2
14	1.036 4	1.035 2	1.029 6	1.037 7	1.032 1	1.036 1	-0.280 2	-0.280 6				

从表 1 可以看出,ICP 的下限值低于 ICP++,而 ICP 的上限值高于 ICP++。因此,ICP 的保守性高于 ICP++的保守性。同时可以发现,WLS 和 WLAV 的计算结果均包含于 ICP 和 ICP++计算所得的区间内。

图 1、图 2 分别给出了两种算法得到的节点电压幅值区间和节点电压相角区间的 3 种形式的宽度。ICP++得到的电压幅值的平均宽度为 0.45%,小于无功电压控制系统的控制死区 0.5%。ICP++得到的电压相角的平均宽度则为 0.416°,而相量测量单元(PMU)相量量测中电压相角的量测精度在某些情况下仅为 0.5°。因此,针对当前测试系统,ICP++得到的结果虽存在一定保守性,但满

足实际应用要求。需要说明的是,ICP++估计区间的宽度与量测精度、量测冗余度、负荷水平密切相关,不同系统下得到的区间宽度不尽相同,但随着调度自动化技术的发展,量测精度和冗余度将逐步提高,ICP++所得结果的保守性也将逐步减小。

对于量测区间,由于量测变量的初始区间 $[z^{(0)}]$ 已知,因此可通过比较收缩比例 r_{ratio} 来说明其保守性:

$$r_{ratio}([\hat{z}]) = \sum_{j=1}^m \frac{w([\hat{z}_j])}{w([z_j^{(0)}])} \quad (23)$$

由于不同类型的量测收缩比例存在一定差异,本节在测试时,将量测细分为节点电压幅值量测、节点有功功率量测、节点无功功率量测、支路有功功率量测和支路无功功率量测 5 种类型。

对于 IEEE 14 节点系统,两种算法得到的节点电压幅值和节点电压相角的上下限列于表 1。为便于比较,将由传统的加权最小二乘(WLS)和加权最小绝对值(WLAV)算法得到的计算结果也列于表 1。

从图 3 可以看出,对于量测区间,ICP 的保守性高于 ICP++,与状态区间对应的保守性趋势一致。此外,对 ICP++,电压量测的收缩比例最小,小于 0.1,有功量测的收缩比例明显小于无功量测。

通过将上述过程应用于 IEEE 118 节点系统,可验证结果保守性的结论对较大系统依然有效。限于篇幅,此处略去 IEEE 118 节点系统的对比结果。

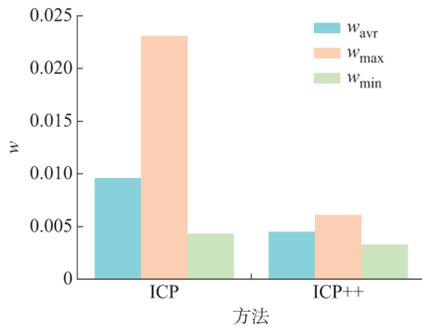


图1 IEEE 14 节点系统中节点电压幅值区间的宽度
Fig.1 Width of bus voltage amplitude interval in IEEE 14-bus system

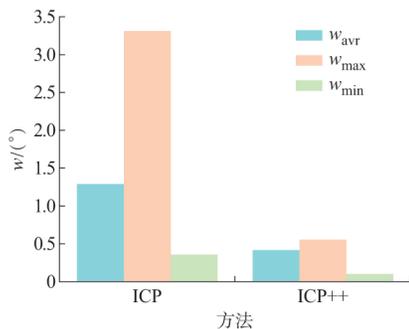


图2 IEEE 14 节点系统中节点电压相角区间的宽度
Fig.2 Width of bus voltage phase angle interval in IEEE 14-bus system

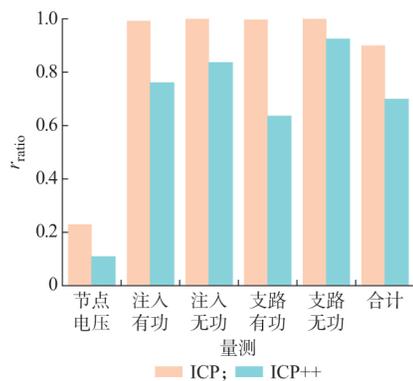


图3 IEEE 14 节点系统中不同类型量测的区间收缩比例
Fig.3 Interval contraction ratio of different measurements in IEEE 14-bus system

3.3 计算效率测试

本节测试两种算法的计算效率,即针对不同规模的系统,对比两种算法各自的计算时间。测试环境为个人电脑,CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7,主频为 2.0 GHz、内存 2.00 GB,所有算法均采用 Java 实现。表 2 给出了针对不同系统,两种算法的计算时间。

表 2 各标准系统的计算时间
Table 2 Computation time of each standard system

系统	量测数据/个	计算时间/s	
		ICP	ICP++
IEEE 14 节点	110	0.154	0.197
IEEE 30 节点	229	0.276	0.319
IEEE 118 节点	1 054	1.309	1.799
IEEE 300 节点	2 091	3.637	4.647

从表 2 可以看出,ICP 和 ICP++ 的计算效率较高,随着系统规模的增加,计算时间基本呈线性增长,即使对于 300 节点系统,也可在秒级完成。两者相比之下,ICP++ 由于引入了更多的约束又更为复杂的收缩过程,其计算效率较 ICP 有所降低,但仍能满足在线应用的要求。

4 结语

针对量测误差有界情况下的状态辨识模型,本文提出了基于区间分析的求解方法。该方法采用区间约束传播算法对状态区间和量测区间进行迭代收缩。由于区间运算的保守性以及区间约束传播的局部相容性,基于常规区间约束传播算法的收缩结果保守性较大,无法有效定位系统的真实状态,不利于后续应用。为解决保守性的问题,一方面在区间约束传播算法中引入单调性,有效消除了单调变量出现多次带来的保守性;另一方面通过增加冗余约束,对原有约束集进行了扩展,在较大程度上消除了区间约束传播算法的局部相容性带来的保守性。上述改进算法虽然未完全消除保守性,但算例表明其能够满足工程应用的要求,尤其是闭环控制的要求。此外,基于区间分析的求解方法,计算效率高,即使针对大规模系统,亦可在秒级的计算时间内完成,可满足实时在线应用的要求。

目前电力系统的各类分析与控制系统仍然基于量测数据或单一的估计结果,如何将改进区间约束传播求得的可信状态集合便捷、高效地应用于电力系统的各类分析与控制系统是下一步研究的方向。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 何光宇,常乃超,董树锋,等.基于集合论估计的电网状态辨识:(一)建立模型[J].电力系统自动化,2016,40(5):25-31.DOI:10.7500/AEPS20150529012.
HE Guangyu, CHANG Naichao, DONG Shufeng, et al. Power system state identification based on set theory estimation: Part one model built[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 25-31. DOI: 10.7500/AEPS20150529012.
- [2] JAULIN L, WALTER E. Set inversion via interval analysis for

- nonlinear bounded-error estimation [J]. Automatica, 1993, 29(4): 1053-1064.
- [3] 许巍, 王慧芳, 杜振东, 等. 输电线路最佳经济寿命区间评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 74-80. DOI: 10.7500/AEPS20140922001.
- XU Wei, WANG Huifang, DU Zhendong, et al. Optimal economic life interval evaluation of transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 74-80. DOI: 10.7500/AEPS20140922001.
- [4] WANG Bin, HE Guangyu, LIU Kaicheng, et al. Guaranteed state estimation of power system via interval constraints propagation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(2): 138-144.
- [5] DECHTER R. Constraint processing [M]. Los Altos, CA: Morgan Kaufmann, 2003.
- [6] CLEARY J C. Logical arithmetic [J]. Future Computing Systems, 1987, 2(2): 125-149.
- [7] DAVIS E. Constraint propagation with interval labels [J]. Artificial Intelligence, 1987, 3(2): 281-331.
- [8] JAULIN L, BRAEMS I, KIEFFER M, et al. Nonlinear state estimation using forward-backward propagation of intervals in an algorithm[M]. New York, USA: Springer, 2001: 191-204.
- [9] JAULIN L. A nonlinear set-membership approach for the localization and map building of an underwater robot using interval constraint propagation[J]. IEEE Trans on Robotics, 2009, 25(1): 88-98.
- [10] RAMDANI Nacim, NEDIALKOV Nedialko S. Computing reachable sets for uncertain nonlinear hybrid systems using interval constraint-propagation techniques [J]. Nonlinear Analysis; Hybrid System, 2011, 5(2): 149-162.
- [11] QI Junjian, HE Guangyu, MEI Shengwei, et al. Power system set membership state estimation[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA.
- [12] ARAYA I. Exploiting common subexpressions and monotonicity of functions for filtering algorithms over intervals [D]. France: University of Nice-Sophia, 2010.
- [13] CHABERT G, JAULIN L. Hull consistency under monotonicity[C]// Proceedings of International Conference on Principles & Practice of Constraint Programming, September 20-24, 2009, Lisbon, Portugal: 188-195.
- [14] ARAYA I, TROMBETTONI G, NEVEU B. Exploiting monotonicity in interval constraint propagation [C]// Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence, July 11-15, 2010, Atlanta, USA.
- [15] JAULIN L, KIEFFER M, DIDRIT O, et al. Applied interval analysis[M]. London, UK: Springer-Verlag, 2001.

王 彬(1987—),男,博士,主要研究方向:电力系统状态估计和优化分析。E-mail: sswz968@163.com

董树锋(1982—),男,博士,主要研究方向:电力系统状态估计和优化运行。E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn

王治华(1977—),男,高级工程师,主要研究方向:智能电网与智能调度。E-mail: wangzh@sh.sgcc.com.cn

何光宇(1972—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力系统经济运行及优化理论在电力系统中的应用。E-mail: gyhe@sjtu.edu.cn

(编辑 章黎)

Power System State Identification Based on Set Theory Estimation Part Two Solving Method Based on Interval Constraints Propagation

WANG Bin¹, DONG Shufeng², WANG Zhihua³, HE Guangyu⁴

(1. Electric Power Dispatching Control Center, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;

4. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The state identification model with only bounded errors is a typical constraints satisfaction problem, and variables and constraints can all be presented in the form of intervals. Thus, interval analysis can be adopted to solve this constraints satisfaction problem. The conventional interval constraints propagation method is first proposed to solve this model. However, the results are locally consistent and have conservative character to a large extent. To deal with this problem, the improved interval constraints propagation method is proposed. On one hand, monotonicity is introduced to an interval constraints propagation algorithm, which can effectively eliminate the conservative character resulting from the many times' appearance of monotone variables. On the other hand, by increasing redundant constraints, the original constraint sets are extended, which can eliminate the conservative character resulting from the local consistency of interval constraints propagation algorithm to a great extent.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207136).

Key words: state estimation; set theory estimation; interval constraints propagation; improved interval constraints propagation