

基于集合论估计的电网状态辨识

(四) 离群点识别

周宁慧¹, 王彬², 王治华³, 董树锋⁴, 何光宇¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240;

2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东省广州市 510699;

3. 国网上海市电力公司电力调度控制中心, 上海市 200122; 4. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 首先从相容性的角度,对离群点的性质进行分析,提出不相容离群点和相容离群点的概念,并指出可能的离群点集合应包含不相容离群点和相容离群点两类离群点。进一步,提出状态辨识中离群点识别的两步法,即先识别出所有可能的不相容离群点集合,而后对可能的相容离群点进行筛分。对于不相容离群点,结合电力系统多层多级的网架结构,提出分层分级的不相容离群点搜索算法,使得搜索过程局部化,从而减小搜索空间,提高搜索效率。对于相容离群点,提出基于灵敏度的识别方法,可有效识别对解集影响最大的相容离群点,避免搜索起作用测点带来的组合爆炸问题。

关键词: 状态估计; 集合论估计; 不相容离群点; 相容离群点

0 引言

不良量测数据是指偏离量测量真实变化轨迹较远的的数据,不良数据的存在可能导致状态估计结果受到污染。众多学者对不良数据检测和识别方法进行了研究,传统方法主要有残差搜索法、以非二次准则估计为基础的方法以及量测量突变检测法。近来也涌现出一些新的解决方法,如文献[1-2]利用相关量测量之间可相互校核的特点,提高检测可靠性。文献[3]采用图论的方法,通过量测量之间的线性关系对不良数据进行检测和辨识。文献[4-6]提出一类检测不良数据的动态聚类方法。文献[7]提出应用人工智能理论进行不良数据辨识。文献[8]考虑了多时段远程终端单元/同步相量测量单元(RTU/PMU)信息和电网复功率平衡方程,提出了基于在线核学习的不良数据检测与辨识方法。文献[9-10]提出了将遗传模拟退火(GSA)算法的数据挖掘技术与神经网络技术相结合,应用到电力系统不良数据辨识中,与传统方法相比,此方法避免了残差污染和残差淹没的现象。文献[11]在建立混合量测状态估计计算模型的基础上,提出了一种解决相角参考点坏数据问题的处理方法。

然而,上述常规状态估计的不良数据辨识方法与本文基于集合论估计的离群点识别方法有着根本的不同。在本系列论文中,系列文章第2和第3篇^[12-13]提出了量测误差有界情况下状态辨识的求解方法,然而如果测点集合中存在离群点,则基于系列文章第2和第3篇中所提求解方法得到的解集将不包含系统的真实状态,甚至解集为空。因此,在对特定的测点集合进行状态辨识时,需先识别出其中的离群点,并将离群点从测点集合中去除,再采用系列文章第2和第3篇所提求解方法进行状态辨识。由于真值未知,试图识别出真实的离群点是不现实的,可行的思路是识别出所有可能的离群点,从集合论估计的角度,即识别出所有满足先验信息的离群点集合,其中必然包含真实的离群点,从而保证结果的可信性。基于此思想,本文提出了状态辨识中离群点识别方法。

1 离群点识别总体思路

1.1 基本出发点

为便于叙述,定义测点集合 M : 对于包含 m 个测点的系统,将量测按照特定顺序从 1 到 m 进行编号,每个测点与其编号一一对应,此时该量测系统可由测点集合 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 来描述。在不考虑离群点的情况下,状态解集 X 为:

$$X = \{x \mid g(x) = \mathbf{0}, l(x) \geq \mathbf{0}, e_i^- \leq Z_i - h_i(x) \leq e_i^+\}$$

(1)

收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2016-01-05。

上网日期: 2016-02-24。

国家自然科学基金资助项目(51207136)。

式中: $x \in \mathbf{R}^n$ 为状态变量; $g(x)=\mathbf{0}$ 和 $l(x) \geq \mathbf{0}$ 为物理约束; Z_i 为测点 i 量测值, $h_i(\cdot)$ 为量测方程, e_i^+ 和 e_i^- 分别为误差上限和下限, $i \in M$ 。

由式(1)可知,对不同的测点集合 M 进行状态辨识,将得到不同的状态解集 X ,即状态解集 X 与待分析的测点集合 M 相关,因此,可将状态解集表示为 $X(M)$,以表征两者的相关性。

若测点集合 M 中存在离群点,则 $X(M)$ 不包含状态真值,甚至可能为空集。根据离群点的定义^[14],可构造真实离群点集合 \bar{N} 为:

$$\bar{N} = \{i | (\bar{e}_i > e_i^+) \vee (\bar{e}_i < e_i^-), \forall i \in M\} \quad (2)$$

式中: \bar{e}_i 为量测误差,且 $\bar{e}_i = Z_i - \bar{Z}_i$, \bar{Z}_i 为测点 i 真值。

由于真值未知,因此真实离群点集合 \bar{N} 未知,但可知其满足 2 个性质:① 状态真值 $\bar{x} \in X(M \setminus \bar{N})$,其中 $M \setminus \bar{N}$ 表示从集合 M 中去除集合 \bar{N} 中的所有元素后得到的集合,即集合 $X(M \setminus \bar{N})$ 非空;② 假设已知离群点数量的上限 $c < m$,因此 $n_{\text{card}}(\bar{N}) \leq c$,其中 $n_{\text{card}}(\cdot)$ 为集合中元素个数。根据以上 2 个性质,定义可行离群点集合的概念。

定义 1(可行离群点集合):对于满足 $0 < n_{\text{card}}(N) \leq c$ 的测点集合 $N \subset M$,若 $X(M \setminus N) \neq \emptyset$,则称 N 为可行离群点集合,反之,称 N 为不可行离群点集合。

显然,真实离群点集合 \bar{N} 是一类具有特殊意义的可行离群点集合。假设由所有可行离群点集合构成的集合为 Ω ,则 $\bar{N} \in \Omega$ 。

若集合 Ω 已知,定义状态解集 $X(\Omega)$ 为:

$$X(\Omega) = \bigcup_{\forall N_i \in \Omega} X(M \setminus N_i) \quad (3)$$

式中: N_i 为集合 Ω 中的任意元素。显然, $X(\Omega)$ 必然包含系统的真实状态。

因此,可将识别真实离群点集合 \bar{N} 的问题,转化为构造集合 Ω ,即识别所有可行离群点集合的问题,这也是本文进行离群点识别的基本出发点。需要说明的是,构造集合 Ω ,并不是状态辨识中离群点识别的根本目标,其根本目标在于求得状态解集 X ,使得 $X = X(\Omega)$ 。为实现该目标,只需找到某个集合 $\Omega' \subset \Omega$,使得 $X(\Omega') = X(\Omega)$,即无需识别所有的可行离群点集合,而只需识别对解集存在影响的可行离群点集合。这一点将在后文介绍离群点识别的基本流程和具体搜索算法时体现。

1.2 离群点划分

为找到所有的可行离群点集合,本节对可行离

群点进行分类。首先根据状态解集是否为空集,定义测点集合相容性的概念。

定义 2(测点集合的相容性):对于测点集合 M ,若 $X(M) \neq \emptyset$,称测点集合 M 相容,反之,则称其不相容。

根据测点集合的相容性,定义不相容离群点的概念。

定义 3(不相容离群点集合):考察可行离群点集合 Λ ,若对于任一测点 $i \in \Lambda$ 及相应的集合 $\Lambda^{(i)} = \Lambda \setminus \{i\}$,集合 $M \setminus \Lambda^{(i)}$ 均不相容,即 $X(M \setminus \Lambda^{(i)}) = \emptyset$,则称 Λ 为不相容离群点集合,称 Λ 中的测点称为不相容离群点。

由定义(3)可知,不相容离群点集合为一类特殊的可行离群点集合,去除其中的任何元素,都将使得该集合变为不可行离群点集合。因此可将不相容离群点集合理解为最小可行离群点集合。

定理 1:考察不相容离群点集合 Λ ,对于任意非空集合 $O \subset (M \setminus \Lambda)$,构造集合 $N = \Lambda \cup O$,若 $0 < n_{\text{card}}(N) \leq c$,则 N 为可行离群点集合。

从定理 1 可看出,以不相容离群点集合为基础,增加集合外的任何测点,只要不超过离群点数量的上限,该集合仍为可行离群点集合。针对可行离群点集合中不相容离群点以外的测点,定义相容离群点的概念。

定义 4(相容离群点):对于可行离群点集合 N ,若存在不相容离群点集合 $\Lambda \subset N$,则称集合 $N \setminus \Lambda$ 中的测点为 N 中的相容离群点。

定理 2:若测点集合 M 相容,对于任意集合 $N \subset M$,若满足 $0 < n_{\text{card}}(N) \leq c$,则 N 为可行离群点集合;不存在任何集合 $\Lambda \subset M$,使得 Λ 为不相容离群点集合。

定理 3:若测点集合 M 不相容,则对于任一可行离群点集合 N ,均存在不相容离群点集合 Λ ,使得 $\Lambda \subset N$ 。

由定理 1 可知,不相容离群点集合 Λ 外的测点均可作为相容离群点,前提是离群点数量不超过上限值。由定理 2 和定理 3 可知,若测点集合 M 相容,则可行离群点集合 N 中的测点均为相容离群点;若测点集合 M 不相容,则可行离群点集合 N 必然包含不相容离群点,此外还可能包含相容离群点。真实离群点集合 \bar{N} 本身也是可行离群点集合,因此对上述的分析同样适用。

1.3 基本流程

为有效识别所有可行离群点集合,可分别对不相容离群点和相容离群点单独进行处理。

若测点集合 M 不相容,首先通过测点相容性校

验对所有测点进行遍历搜索,找到所有的不相容离群点集合。对于特定的不相容离群点集合 Δ ,测点集合 $M \setminus \Delta$ 相容,此时集合 $M \setminus \Delta$ 中的测点均可作为相容离群点,但并不是所有测点都会对解集产生影响。因此,针对集合 $M \setminus \Delta$ 中的测点,定义起作用测点和不起作用测点的概念。

定义 5(起作用测点):对于测点 $i \in M \setminus \Delta$,构造集合 $\Delta^{(i)} = \Delta \cup \{i\}$,若 $X(M \setminus \Delta) \subset X(M \setminus \Delta^{(i)})$,则称测点 i 为起作用测点;若 $X(M \setminus \Delta) = X(M \setminus \Delta^{(i)})$,则称测点 i 为不起作用测点。

根据定义 5,虽然集合 $M \setminus \Delta$ 中的测点均可作为相容离群点,但对不起作用测点而言,是否将其作为离群点,对最终的解集并没有影响,因此可不考虑不起作用测点作为相容离群点的情况,而只将起作用测点作为可能的相容离群点,并与不相容离群点集合进行组合,形成可行离群点集合。

基于以上分析,可得到离群点识别的基本流程:首先通过搜索加相容性校验的方式遍历测点集合中所有测点,识别出所有不相容离群点集合,然后针对特定的不相容离群点集合,将集合外起作用测点作为相容离群点,并与该不相容离群点集合进行组合,形成可行离群点集合。至此,可得到所有对解集有影响的可行离群点集合,将每个可行离群点集合对应解集取并集,即可得到最终状态解集。如前所述,该状态解集必然包括状态真值,从而保证结果的可信性。

然而,该流程的计算效率较低,导致其无法直接应用于含大规模量测的系统中,比如电力系统。该流程的计算量主要体现在不相容离群点的搜索以及相容离群点(起作用测点)的组合两方面。为降低此两方面的计算量,本文分别提出了分层分级的不相容离群点搜索算法和基于灵敏度的相容离群点搜索算法,下文将进行具体介绍。

2 分层分级的不相容离群点搜索算法

2.1 基本原理

由相容性概念可知,全网测点相容,则任意子网的测点必然相容。同理,若存在某一子网,其测点不相容,则全网测点必然不相容。进一步,可推知全网和子网的不相容离群点的关系,即全网的不相容离群点集合必然包含子网的某一不相容离群点集合,但并非全部来自于子网的不相容离群点(数学证明参见附录 A)。基于此,可得到搜索全网不相容离群点集合的基本思路:先搜索出子网所有的不相容离群点集合,将不同子网的不相容离群点集合进行组合,形成全网待求不相容离群点集合的一个子集,并

在该子集的基础上对全网的其他测点进行搜索加相容性校验,以搜索未在子网发现的不相容离群点。

2.2 加速方法

在上节所述搜索思路中,关键在于全网搜索中未在子区域发现的不相容离群点。由于离群点数量本身较少(子区域得到的不相容离群点只是其中一部分),因此待搜索的测点(即剩余测点)的数量仍较为庞大,从而带来较大工作量,影响搜索算法的效率。为此,本节提出 2 种思路来减小搜索空间,加速搜索算法。

2.2.1 相对可信点

在测点整体相容的情况下每个测点相容的程度并不相同,有些测点的取值发生少许变化就可能致测点整体不相容,而另一些测点取值的变化则不会对相容性产生影响,对于后者,可认为其不可能是离群点。基于此,提出相容度指标的概念,对测点 i 而言,其相容度指标 C_i 为:

$$C_i = \frac{\min(|Z_i - e_i^+ - z_i^-|, |Z_i - e_i^- - z_i^+|)}{e_i^+ - e_i^-} \quad (4)$$

式中: z_i^+ 和 z_i^- 分别为量测量解集中测点 i 对应的上限与下限。

从式(4)可知,相容度指标 C_i 越大,量测量解集中测点 i 的取值范围与量测初始集合中的取值范围相比越小,故测点 i 的量测量的取值越限的可能性就越小,即其为不相容离群点的可能性越小。可设定阈值 ϵ ,若 $C_i \geq \epsilon$,则认为该测点不可能为离群点,称之为相对可信点。在搜索时,可将相对可信点从待搜索集合中去除,从而在一定程度上减小搜索空间。

考虑相对可信点的两层区域搜索方案如图 1 所示。在子网进行不相容离群点集合的搜索时,除了得到所有不相容离群点集合外,还可在测点相容的情况下(去除不相容离群点),计算各测点的相容度指标,进而确定相对可信点的集合,并将该集合和不相容离群点集合一起提供给全网。在全网进行分析时,一方面对各子网的不相容离群点集合进行组合,形成某待求不相容离群点集合的子集,另一方面排除测点集合中的相对可信点,并对余下的测点进行搜索加相容性校验。

2.2.2 多层级精细化网络划分

以上以两层级区域划分为例,对分层分级的不相容离群点搜索算法进行了说明。为进一步减小搜索空间,本节结合电力系统网架结构的特点,对待分析电网进行多层级精细化划分,层级从低到高,网络的规模和测点的数量依次递增。为尽可能避免在高

层级的区域进行大规模的搜索,一方面,要保证低层级的区域中量测的耦合度足够大,不同量测之间形成有效的制约,从而尽可能发现所有的不相容离群点;另一方面,相邻层级区域的量测规模不宜相差过大,应循序渐进地增长,否则较高层级的区域在处理显著增加的约束时必然带来较大规模的搜索工作量。基于此,本节设计了包含单支路层级、单节点层级、双节点层级、单厂站层级、子网层级和全网层级等层级的网络划分方案,简要介绍如下。

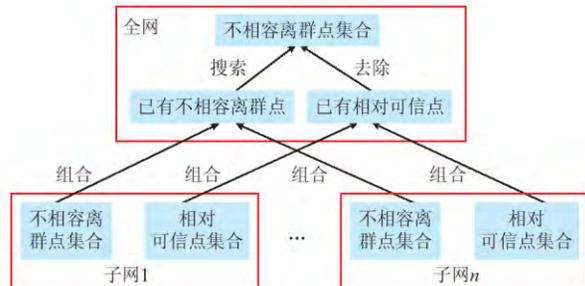


图1 考虑相对可信点的两层区域搜索方案
Fig.1 Two-layer area searching plan considering relatively reliable points illustration

1)单支路层级。子系统由2个节点及连接两者的支路(包括双回线或多回线)组成,量测包括2个节点的电压幅值量测和相应支路的功率量测,该层级是最低层级,可将该层级中的系统认为是最小区域单元。

2)单节点层级。子系统由1个节点、与其相连的所有支路及其对端的节点组成,量测包括该节点的注入功率量测、所有支路的功率量测和所有节点的电压幅值量测。单节点系统由多个单支路系统构成,但相比于单支路层级,单节点层级考虑了注入功率量测的约束,增加了量测间的耦合度。为进一步增加量测间的耦合度,在单节点层级基础上,设计双节点层级。

3)双节点层级。子系统由2个节点、与两者相连接的所有支路及其对端的节点组成,量测同样包括该2个节点的注入功率量测、所有支路的功率量测和所有节点的电压幅值量测,双节点层级中的系统由2个单节点系统构成。

4)单厂站层级。子系统由厂站内所有节点、支路以及厂站出线和对其对端的节点组成,量测包括厂站内的所有量测以及出线上的支路功率量测。单厂站系统由多个双节点系统构成,也可由多个单节点系统构成。

5)子网层级。子系统由区域内所有厂站及其出线组成,即子网有多个单厂站系统构成。

6)全网层级。全网由多个子网系统构成。

在上述层级划分中,在包括单支路系统、单节点系统、双节点系统和单厂站系统在内的子系统中,网络规模和测点数量均较少,对这些子系统进行不相容离群点搜索时效率较高,因此应尽可能在这些子系统中完成对所有不相容离群点的搜索。此外,在实际应用中,可针对不同系统的特点对划分的层级适当地增加或删除,比如对于规模较小的系统,可不考虑双节点层级或子网层级等,又比如对于包含较多环网的系统,可增加“基本回路”这一层级,以更早地引入由环网带来的约束。

基于上述的多层级精细化网络划分方案,可形成树状的搜索路径,针对该搜索路径,可采用深度优先搜索和广度优先搜索两种方式进行搜索。由于深度优化搜索方法具有便于分布化的特点,因此本文采用深度优先搜索的方式,形成自底而上的搜索路径。

2.3 算例测试

分别以IEEE标准节点系统和某省级电网的实际系统为例,说明本节所提分层分级的不相容离群点搜索算法的有效性。测试环境为个人电脑,CPU为Intel(R)Core(TM)i7,主频为2.0GHz、内存2.00GB,所有算法均采用Java实现。

2.3.1 标准系统

以IEEE14节点系统为例,具体说明不相容离群点的搜索过程。该系统存在14个节点及20个支路,采用全量测配置,即所有节点均包含电压幅值量测和注入功率量测,所有支路均包含支路功率量测,共122个测点。对于正常测点,在潮流结果的基础上添加幅值为2%的均匀分布的噪声,得到各测点的量测值;对于离群点,在潮流结果的基础上添加5%的误差,得到离群点的量测值。在该系统的多层级精细化网络划分方案中,仅考虑单支路、单节点、子区域和全系统4个层级,其中将系统划分为2个子区域,各子区域包含的节点和量测数量如表1所示。相容度指标的阈值 ϵ 为0.05。

表1 IEEE14节点系统划分
Table 1 IEEE 14-bus system division

子区域编号	内部节点	与之关联的外部节点	量测数量
Area 1	1,2,3,4,5	6,7,9	58
Area 2	6,7,8,9,10,11,12,13,14	4,5	74

1)Case A:存在2个真实离群点

分别将节点4的注入有功功率量测 P_4 和节点14的电压幅值量测 V_{14} 设置为离群点。下面介绍具体收缩过程。

对于Area 1,其测点相容,此时无需对所包含

的低层级区域进行搜索。计算 Area 1 量测量解集及相应的相容度指标,可得 27 个相对可信点,如附录 B 表 B1 所示。

对于 Area 2,其测点不相容,对其进行分层分级的搜索。在单支路层级,分别在 Branch 9-14 和 Branch 13-14 中发现 4 个不相容离群点集合,基于该结果,在单节点层级,分别在 Bus 9, Bus 13 和 Bus 14 中发现 3, 1, 2 个不相容离群点集合,具体参见附录 B 表 B2。在此基础上,发现在 Area 2 仅存在 1 个不相容离群点集合,即 $\{V_{14}\}$,将该集合中测点集合中去除后可得到 27 个相对可信点,具体参见附录 B 表 B1。

基于 Area 1 和 Area 2 的结果,对全网进行进一步搜索,可发现 6 个不相容离群点集合,具体参见附录 B 表 B3。其中包含了真实离群点集合 $\{V_{14}, P_4\}$,从而说明该结果是可信的。

为说明所提方法对搜索效率的提高,表 2 分别给出了对全网所有测点进行直接搜索的方法和本文中相容性校验的次数和相应的计算时间。从表 2 中可以看出,在本算例中,相比于直接搜索的方法,本文方法相容性校验次数减少了约 96%。由于直接搜索方法在相容性校验时均需针对全网所有测点,而本文方法中的绝大部分相容性校验只需在低层级的区域完成(仅针对低层级区域中的测点),单次相容性校验的计算时间也显著降低,因此本文方法的总体计算时间减少到不足 1%。

表 2 Case A 中不同搜索方法的搜索效率对比
Table 2 Comparison of searching efficiency of different searching methods in Case A

搜索算法	相容性校验的次数	计算时间/s
直接搜索	7 503	1 432.168
本文方法	232	11.754

2) Case B: 存在 5 个真实离群点

在 Area 1 中设置 2 个离群点,分别为节点 1 的有功功率 P_1 和支路 1-2 的有功功率 P_{1-2} ;在 Area 2 中设置 3 个离群点,分别为节点 13 的电压幅值 V_{13} 、节点 13 的无功功率 Q_{13} 和节点 9 的有功功率 P_9 。其中 P_1 和 P_{1-2} 具有相关性和一致性, V_{13} 和 Q_{13} 具有相关性和一致性。不相容离群点的搜索过程参见附录 B 表 B4(仅列出来存在不相容离群点集合的区域),搜索效率的对比参见表 3。

从附录 B 表 B4 中可以看出,全网仅存在一个不相容离群点集合,该集合与真实离群点集合一致,因此所得结果是可信的。从表 3 可以看出,如果采用直接搜索的方法,相容性校验的次数达到了数亿次,依托现有的计算资源对其进行计算是十分困难

的,因此无法给出其具体的计算时间;而采用本文方法,只需进行 432 次相容性校验,整个搜索过程可在 15 s 内完成。因此本文所提的搜索方法可显著提升搜索效率,尤其在网络规模较大或离群点数量较多的情况下。

表 3 Case B 中不同搜索方法的搜索效率对比
Table 3 Comparison of searching efficiency of different searching methods in Case B

搜索算法	相容性校验的次数	计算时间/s
直接搜索	$\approx 2 \times 10^8$	
本文方法	432	14.387

2.3.2 省级电网

将本文方法应用于华东某省级调度中心管辖的实际系统。该系统及其各子分区的网络规模和量测数量参见附录 B 表 B5。在测试中,量测误差的界值采用工程实践中用于考察状态估计合格率的合格区间,网络划分方案则考虑单支路、单节点、双节点、单厂站、子区域和全系统 6 个层级。附录 B 表 B6 给出了各分区不相容离群点集合的数量及集合中所包含的测点的数量。从附录 B 表 B6 中可以看出,Area 4 中不相容离群点集合的数量最多,而 Area 2 中不存在不相容离群点。如果将各分区的不相容离群点集合均组合起来,则全网可能的不相容离群点集合多达 829 440 个,这个数量是非常庞大的,仅对这些可能的集合进行相容性校验,相关的工作量就很大,难以满足在线应用的要求。值得注意的是,所有的不相容离群点集合中所包含的量测数量仅为 49 个,因此在对全网进行分析时,可直接将此 49 个测点组成一个增广的不相容离群点集合,并对该集合进行相容性校验。测试表明,该 49 个测点组成的测点集合为可行离群点集合,因此可直接将其从原始测点集合中去除。

表 4 各层级区域搜索离群点的计算时间
Table 4 Computation time of searching outliers in different regions

层级	计算时间/s
单支路	5.011
单节点	49.818
双节点	13.345
单厂站	15.872
子区域	118.463
总计	202.509

表 4 给出了在各层级区域中进行离群点搜索的计算时间,全部搜索过程需 34 min。需要说明的是,该时间是在串行执行所有搜索过程的前提下完成的,而实际上在应用时可非常方便地将该方法进行分布化或并行化处理,比如单厂站以下层级可在

厂站内完成,子区域层级可在其对应的下级调度中心中完成,而全网只需将所有不相容离群点汇总并进行一次相容性校验即可。通过上述处理,本文所提搜索方法能够满足在线应用的要求。

3 基于灵敏度的相容离群点搜索算法

虽然不相容离群点集合外的测点均可作为相容离群点,但仅需考虑其中的起作用测点。对于特定测点,可根据灵敏度方法,找到对其限值影响最大的起作用测点,并将该部分测点作为最终的相容离群点即可。下文将具体介绍灵敏度分析的方法和相应的算例测试。

3.1 灵敏度分析

以系列文章第3篇^[13]中优化模型为例,来说明起作用测点对状态变量限值的灵敏度。起作用测点相当于为优化模型中的起作用约束,将不起作用约束从模型中去除,而将起作用约束的不等式约束转化为等式约束,将优化模型转化为如下模型。

$$\begin{cases} x_i^- = \min x_i \\ x_i^+ = \max x_i \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ \mathbf{l}(\mathbf{x}) \geq \mathbf{0} \end{cases} \\ z_j = \begin{cases} Z_j - e_j^- & \hat{z}_j = Z_j - e_j^- \\ Z_j - e_j^+ & \hat{z}_j = Z_j - e_j^+ \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中: z_j 为量测变量; \hat{z}_j 为系列文章第3篇中优化模型测点 j 对应量测量的优化值。

对于起作用测点 j 而言,等式约束 $z_j = Z_j - e_j^-$ 和 $z_j = Z_j - e_j^+$,两者取一成立。不失一般性,假设

$z_j = Z_j - e_j^-$ 成立,则该约束对应拉格朗日乘子 λ_j ,即为测点 j 对 x_i 的上限值或下限值的灵敏度。因此,可根据 $|\lambda_j|$ 的大小,筛选出对 x_i 的上限值或下限值影响最大的测点,并将这部分测点作为可能的相容离群点。

同理,可根据灵敏度筛选出对 z_i 的上限值或下限值影响最大的测点。

针对上述灵敏度方法,讨论如下。

1)该方法建立在优化模型的基础上,特定的优化模型对应特定的状态量 x_i 或量测量 z_i 。对于不同的优化模型,比如上限值模型和下限值模型,其灵敏度计算的结果不相同,因此需针对同一状态量或量测量的上限值模型和下限值模型分别计算灵敏度,并分别确定相应的相容离群点。

2)在计算灵敏度时,需先求解优化模型。多次计算灵敏度意味着多次求解优化模型,将带来一定的计算量,但避免了由起作用测点带来的组合爆炸问题,同时采用分布化或并行化的方式来实现优化模型的多次求解,可在一定程度上提高计算效率。

3.2 算例测试

以IEEE 14节点系统为例,其量测生成与配置方法参见2.3节。假设系统中不存在不相容离群点(如果存在,采用第2节所述方法进行识别并去除即可)。设置相容度指标的阈值为0.01。发现在122个测点中存在52个起作用测点。然后,根据灵敏度确定对解集影响最大的测点。分别以状态量 V_2 、量测量 P_1 和 Q_{12} 为例,给出灵敏度方法的计算结果,并与直接搜索得到的对解集影响最大的测点进行对比,参见表5。

表5 IEEE 14节点系统灵敏度分析结果
Table 5 Sensitivity analysis results of IEEE 14-bus system

待求量	限值类型	灵敏度排序前3的测点						直接搜索结果
		测点1	灵敏度1	测点2	灵敏度2	测点3	灵敏度3	
V_2	上限	Q_{3-2}	3.106	Q_{2-3}	2.952	P_{3-2}	0.855	Q_{2-3}
	下限	V_5	0.973	Q_{1-5}	0.125	Q_{2-5}	0.076	V_5
P_1	上限	P_{1-2}	1.226	P_{4-2}	0.582	P_5	0.144	P_{1-2}
	下限	P_1	0.998	Q_{1-5}	0.080	Q_{4-9}	0.077	P_1
Q_{12}	上限	Q_{12-13}	1.084	Q_{12}	0.281	P_{13-12}	0.194	Q_{12-13}
	下限	Q_{12}	0.932	Q_{4-9}	0.078	Q_{6-12}	0.07	Q_{12}

从表5可以看出,对于大部分情况,直接搜索得到的结果与灵敏度方法得到的结果一致。在求解状态量 V_2 的上限值时,直接搜索得到的对结果影响最大的测点为 Q_{2-3} ,而灵敏度方法得到的对结果影响最大的测点 Q_{3-2} ,其灵敏度略高于测点 Q_{2-3} 。将 Q_{2-3} 作为相容离群点,可得 $V_2^+ = 1.04838$,而将 Q_{3-2} 作为相容离群点,可得 $V_2^+ = 1.04837$,两者基本一

致,从而说明此时灵敏度方法得到的结果仍然是可靠的。

3.3 有关相容离群点的讨论

对于给定的量测断面,不相容离群点的数量由测点相容性确定,而相容离群点的数量则由设定的离群点数量上限及相应的不相容离群点数量所决定。

由于相容离群点选取为对限值影响最大的测点,随着相容离群点数量的增加,结果区间将显著增大,而过大的结果区间将增加系统运行状态的不确定性,不利于后续应用。因此,在选取离群点数量上应综合考虑结果的置信水平和结果的保守性。在实际应用时,如果无法客观地选择离群点数量上限,可不考虑相容离群点,即将不相容离群点的数量作为最终的离群点数量,并计算出相应的置信概率,并将不相容离群点集合作为该置信概率下的离群点识别结果。

4 结语

本文根据测点集合的相容性,将可能的离群点划分不相容离群点和相容离群点两类,并分别提出了识别方法。

对于不相容离群点,基于全网不相容离群点和子网不相容离群点的关联性,设计了分层分级的不相容离群点搜索算法。为加速搜索算法,提出了相容度指标和相对可信点的概念,以减小全网的测点搜索空间,同时结合电力系统多层多级的网架结构的特点,设计了多层级精细化网络划分方案,使得不相容离群点尽可能在低层级区域被发现,从而提高了搜索效率。

对于相容离群点,提出了基于灵敏度的识别方法,可有效识别对解集影响最大的相容离群点,以避免搜索起作用测点带来的组合爆炸问题。

如何在状态辨识模型中引入更多的信息是下一步研究的重点。引入的信息越多越准确,越有助于定位系统的真实运行状态,越有利于识别可能的离群点。可引入的信息包括 PMU 量测、厂站内的多源数据、厂站内的开关拓扑模型等。

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

参考文献

- [1] 赵海天,相年德,王世纛,等.多不良数据的相关量测检测方法[J].中国电机工程学报,1990,10(6):24-30.
ZHAO Haitian, XIANG Niande, WANG Shiyang, et al. A new detection method for bad data using linear dependence properties of the measurements in power system state estimation [J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10(6): 24-30.
- [2] 张海波,李林川.电力系统状态估计的混合不良数据检测方法[J].电网技术,2001,25(10):17-20.
ZHANG Haibo, LI Linchuan. A hybrid approach for detection of bad data in power system state estimation [J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 17-20.
- [3] 张兴民,毛玉华,朱剑峰,等.利用图论方法进行多不良数据检测与辨识[J].中国电机工程学报,1997,17(1):69-72.

- ZHANG Xingmin, MAO Yuhua, ZHU Jianfeng, et al. Detection and identification of multi-bad data using graph theory [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(1): 69-72.
- [4] 孙国强,卫志农,周封伟.改进迭代自组织数据分析法的不良数据辨识[J].中国电机工程学报,2006,26(11):162-166.
SUN Guoqiang, WEI Zhinong, ZHOU Fengwei. The application of ISODATA to bad data detection and identification based on genetic algorithms [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 162-166.
- [5] 卫志农,张云岗,郑玉平.基于量测量突变检测的新方法[J].中国电机工程学报,2002,22(6):34-37.
WEI Zhinong, ZHANG Yungang, ZHENG Yuping. The improvement of measurement suddenly-change detection method [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 34-37.
- [6] 董朝霞,杨峰.基于模糊聚类分析的分层估计算法在DTS中的应用[J].电力系统自动化,2004,28(12):78-81.
DONG Zhaoxia, YANG Feng. Hierarchy state estimation based on fuzzy clustering analysis in dispatcher training simulator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12): 78-81.
- [7] ASADA E N, GARCIA A V, ROMERO R. Identifying multiple interacting bad data in power system state estimation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 12(10): 571-577.
- [8] 王兴志,严正,沈沉,等.基于在线核学习的电网不良数据检测与辨识方法[J].电力系统保护与控制,2012,40(1):50-55.
WANG Xingzhi, YAN Zheng, SHEN Chen, et al. Power grid bad-data detection and identification based on online kernel learning method [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 50-55.
- [9] 吴军基,杨伟,葛成,等.基于GSA的肘形判据用于电力系统不良数据辨识[J].中国电机工程学报,2006,26(22):23-28.
WU Junji, YANG Wei, GE Cheng, et al. Application of GSA-based elbow judgment on bad-data detection of power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 23-28.
- [10] 郭艳东,申定辉.基于改进GSA算法的电网不良数据检测与辨识[J].华东电力,2013,41(3):42-45.
GUO Yandong, SHEN Dinghui. Bad data detection and identification based on improved GSA algorithm in grid [J]. East China Electric Power, 2013, 41(3): 42-45.
- [11] 丁宏恩,高宗和,苏大威,等.混合量测状态估计相角参考点坏数据问题的处理方法[J].电力系统自动化,2014,38(9):132-136. DOI:10.7500/AEPS20130415006.
DING Hong'en, GAO Zonghe, SU Dawei, et al. Solution to bad data problem of phase angle reference bus for state estimation with hybrid measurement [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 132-136. DOI: 10.7500/AEPS20130415006.
- [12] 王彬,董树锋,王治华,等.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[J].电力系统自动化,2016,40(6):10-16. DOI:10.7500/AEPS20150529014.
WANG Bin, DONG Shufeng, WANG Zhihua, et al. Power system state identification based on set theory estimation: Part two solving method based on interval constraints propagation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 10-16. DOI: 10.7500/AEPS20150529014.

(下转第 50 页 continued on page 50)

Equivalent Modeling of Grid-connected Photovoltaic Power Generation Systems for Comprehensive Load

LI Peiqiang¹, ZENG Xiaojun¹, HUANG Jiyuan², TONG Ying¹, ZHANG Xiaomin¹, ZHANG Li³

- (1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China ;
2. Changsha Power Supply Company of State Grid Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410015, China ;
3. Zhuzhou Power Supply Company of State Grid Hunan Electric Power Corporation, Zhuzhou 412000, China)

Abstract : A simulation system for the grid-connected photovoltaic (PV) power generation system is developed based on the MATLAB/Simulink and the physical mechanism of the PV cells. The influence of the grid-connected PV power generation system on the comprehensive load characteristic of distribution network is studied. And several equivalent models available to the PV power generation system are analyzed and compared. On this basis, a new equivalent model based on transfer functions for the PV power generation system is proposed. The model has a simple structure, less parameters, and can effectively describe the output limit of PV power generation system. At the same time, it is easy to implement in the power system simulation software. A generalized comprehensive load model is developed by paralleling the conventional comprehensive load model with the new equivalent model to describe the characteristic of the comprehensive load containing PV power generation systems. Simulation results show that the generalized comprehensive load model has good generalization ability and stable identification parameters, while meeting the need of engineering simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277055) and National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215106).

Key words : comprehensive load modeling; photovoltaic power generation; equivalent model; improved genetic algorithm

(上接第 28 页 continued from page 28)

[13] 王彬, 王治华, 董树锋, 等. 基于集合论估计的电网状态辨识: (三) 基于优化模型的求解方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 49-53. DOI: 10.7500/AEPS20150529015.
WANG Bin, WANG Zhihua, DONG Shufeng, et al. Power system state identification based on set theory estimation: Part three solving method based on optimization model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 49-53. DOI: 10.7500/AEPS20150529015.

系统状态估计及优化分析. E-mail: nhzhou@139.com

王彬(1987—), 男, 博士, 主要研究方向: 电力系统状态估计及优化分析. E-mail: sswz968@163.com

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

周宁慧(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力

(编辑 王梦岩)

Power System State Identification Based on Set Theory Estimation

Part Four Outlier Identification

ZHOU Ninghui¹, WANG Bin², WANG Zhihua³, DONG Shufeng⁴, HE Guangyu¹

- (1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China ;
2. Power Dispatch and Control Center of Guangdong Power Grid Co. Ltd., Guangzhou 510699, China ;
3. Shanghai Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Shanghai 200122, China ;
4. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract : The concepts of inconsistent outliers and consistent outliers based on the characterization analysis are proposed from the perspective of consistency. Besides, it is pointed out that the possible outlier sets should contain inconsistent outliers and consistent outliers. In addition, a two-step method for state identification is put forward. The method firstly identifies all possible inconsistent outliers and then classifies the possible consistent outliers. For inconsistent outliers, a hierarchical search algorithm is proposed according to the multi-level structure of power system. By localizing the search procedure, the search space is reduced and the efficiency of the search algorithm is improved significantly. For consistent outliers, a sensitivity analysis method is proposed to find the outliers which have the most impact on the result sets. By sensitivity analysis, the combination explosion problem of searching all the active measurements is avoided.

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

Key words : state estimation; set theory estimation; inconsistent outlier; consistent outlier