

考虑广域稳态量测时延的全网同时断面生成

严明辉^{1,2}, 徐伟², 汤奕³, 范漪晖⁴

(1. 东南大学网络空间安全学院, 江苏 南京 211189; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;
3. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 4. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要: 互联大电网运行方式复杂多变, 广域稳态量测数据采集不同步将引入较大的量测误差。为提高稳态量测数据时标一致性, 提出一种基于统一时钟的全网同时断面生成方法。首先, 基于广域稳态量测数据时序特征, 提出一种固定时间间隔的数据滚动存储及循环更新方法, 解决断面数据对齐问题。然后, 采用电气介数法识别关键节点, 在保证关键节点量测数据实时性的基础上, 基于量测量的时空关联特性修正未更新量测数据, 从而确保整合后全网同时断面数据的时效性和准确性。最后, 基于标准算例和实际电网算例仿真结果, 验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 全网同时断面; 量测时延; 关键节点; 数据汇集; 时空关联

Entire network simultaneous section generation considering wide-area steady-state measurement delay

YAN Minghui^{1,2}, XU Wei², TANG Yi³, FAN Yihui⁴

(1. School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: The operational mode of an interconnected large power grid is complex and changeable. Asynchronous acquisition of wide-area steady-state measurement will lead to measurement errors. An entire network simultaneous section generation technology based on a unified clock is proposed to improve the simultaneity of steady-state measurement. First, based on time-series characteristics of wide-area steady-state measurement, a method for data storing and updating circularly at fixed intervals is proposed to solve the problem of misalignment of section data. Then, the key nodes are identified by the electric ‘betweenness’ method. Based on the real-time requirement of key nodes measurement, unrefreshed measurements are modified by the spatio-temporal correlation characteristics. The timeliness and accuracy of the entire network simultaneous section are guaranteed. Finally, the simulation results based on a standard test system and a real power grid verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904500).

Key words: entire network simultaneous section; measurement delay; key nodes; data aggregation; spatio-temporal correlation

0 引言

我国已形成世界上规模最大的交直流互联电网, 电网动态特性更加复杂、安全稳定运行风险不断加大, 客观上对电力系统在线分析提出了更高的要求^[1]。由于远程终端单元(remote terminal unit, RTU)

采集的广域范围内稳态量测数据不含时标, 量测数据不同步、数据传输时延、国-分-省不同调度机构间量测数据层层转发会对在线安全稳定分析准确性产生较大影响。尽管相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)可以提供含时标的同步量测数据, 但受限于 PMU 量测可观性不足, RTU 稳态量测依然是调度主站在线分析计算的主要数据来源^[2-3]。因此, 亟需提高 RTU 量测数据时标一致性, 从而提高在线分析计算准确性, 支撑大电网安全风险实时决策。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904500); 国电南瑞科技股份有限公司科技项目“复杂交直流电网在线安全稳定智能分析技术研究”资助

解决量测非同步时延误差最理想的方法是在 RTU 中增加统一时钟的时标^[4-5], 但是改造代价较高, 既不现实也不必要。另一种思路是用 PMU 数据弥补 RTU 数据的缺陷, 通过 RTU、PMU 时序相关性分析评估 RTU 量测时延^[6-7], 基于 PMU、RTU 等多源数据融合结果进行状态估计(state estimation, SE)^[8-10], 但是当 PMU 量测本身存在误差时, 该方法会引入新的误差, 并未真正解决量测数据不同步导致误差的问题。现有的研究主要从时延对状态估计等高级应用的影响方面开展^[10-13], 在 RTU 量测数据同步性提升方面缺乏研究。

由于调度主站的机器时钟已同步, 基于时延补偿可以得到各个 RTU 数据采集时间, 在此基础上整合同一采集时间的 RTU 数据。为了实现这一目标, 首先要解决的是带时标 RTU 数据存储问题。常用的数据库为关系库和时序库。其中, 关系库要求数据结构规范, 难以适用于大规模非固定周期更新的非结构化数据^[14]; 时序库主要应用于 PMU 等动态数据^[15-16], 存储所有 RTU 稳态数据既无必要, 也未解决数据对齐问题。另外, 同时标 RTU 数据整合还面临实时性和准确性相矛盾的难题。当大部分量测数据刷新后进行数据整合, 牺牲了数据时效性; 反之, 若选用接近当前时间量测数据进行整合, 大多数量测仍未刷新, 准确性又难以保证, 大型电网中甚至还会因少数重要节点数据更新不及时导致对状态估计结果有较大影响的情况。现有的研究主要关注应对电力系统工况快速变化、大扰动等问题的状态估计算法适应性^[17-18], 利用动态状态估计跟踪系统状态演变^[19-20], 未涉及稳态量测数据整合方法的研究。

针对上述问题, 本文提出了基于统一时钟的全网同时断面生成技术。根据 RTU 时延补偿建立各个 RTU 数据采集时间; 基于 RTU 量测数据刷新的时序特征, 提出固定时间间隔的循环队列量测数据滚动汇集方法。采用电气介数法识别关键节点, 在保证关键节点量测数据实时性的基础上, 基于量测量的时空关联特性修正未更新量测数据, 从而构建基于统一时钟的同时标断面。

1 总体思路

1.1 量测时延对状态估计的影响

部署在厂站端的 RTU 将实测数据传送给电网调控中心主站。调度中心主站的前置服务器接收到实测数据后, 将数据初步处理后, 通过消息总线将数据传输到监视和数据采集系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)应用服务器, 能量管理系统(energy management system, EMS)基于 SCADA 系

统采集的实时数据, 提供状态估计计算结果, 其过程如图 1 所示。因此, 量测量传输时延即为采样、传输、存储到应用各环节所用时间的总和。文献[12]分析了循环传输模式和问答传输模式下量测时延分布情况, 并提出了量测时延均匀分布模型, 分析时延偏差量对状态估计的影响。

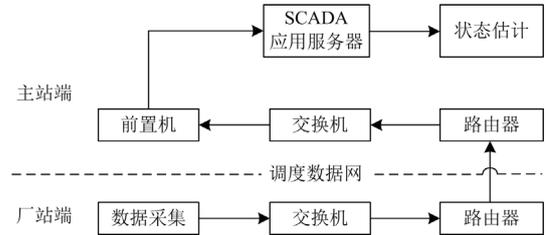


图 1 量测数据传输过程

Fig. 1 Transmission process of measurement data

基于加权最小二乘估计, 在量测方程中增加量测时延偏差项, 通过状态估计误差协方差阵可分析量测时延偏差对估计精度的影响。在量测配置、系统拓扑及参数确定时, 量测时延对估计精度的影响主要取决于量测时延的期望值、方差和量测对时间的变化率^[12]。

量测时延的不确定性会导致量测数据偏离某种分布规律, 降低状态估计结果的准确性。为了消除量测时延对状态估计的影响, 需要通过时延补偿提高量测数据精度。

1.2 全网同时断面构建

通过 RTU、PMU 时序关联特征, 得到两者数据时序对应关系, 可获取 RTU 量测时延^[6-7]。由于调度主站机器已经对时, 当前置机接收到调度子站上送的量测报文后, 在报文接收时间的基础上减去量测时延, 即可得到各个量测数据采集时间, 如图 2 所示。由于量测数据采集时间具有非固定周期的特点, 为了能够快速生成相同时标下全网断面数据, 不仅需要滚动存储一段时间内的量测值及对应时间信息, 还需要处理同一量测量相邻两次采集时间之间的量测值, 这是量测数据存储和处理需要解决的难题。

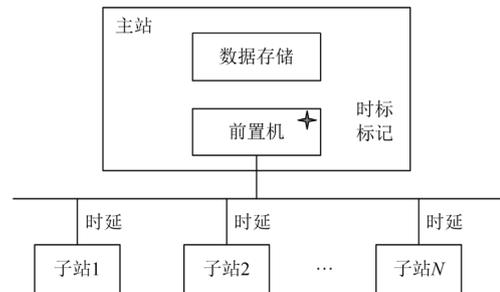


图 2 量测时延补偿原理

Fig. 2 Principle of measurement delay compensation

为了保证整合后断面数据的准确性, 必须动态识别对状态估计结果的准确性和可靠性影响较大的关键监视节点; 根据关键监视节点的量测数据更新率, 确定用于全网同时断面生成的基准时刻, 不必等到所有节点更新后整合全网同时断面, 从而保证了整合结果的时效性。通常电网监视的关键节点会选取重要电厂、枢纽变电站等设施的部分测点, 这种方法既未考虑工况变化对节点影响程度的变化, 又缺少未更新量测的有效处理。因此, 关键节点的在线识别、基于时空关联的未更新量测数据自动修正正是全网同时断面数据生成的又一关键技术。

2 广域稳态量测数据存储和汇集

RTU 的数据采集频率为 0.1~5 Hz, 为减少遥测量不必要的传输, 远端量测装置还设置了“阈值”(死区), 因此同一量测量在时间序列上呈现无规律的稀疏分布, 如图 3 所示。直接存储不仅访问效率低, 还会出现相邻时刻量测采样点之间的量测量难以获取的问题。本节提出一种基于固定时间间隔的稳态量测数据循环队列存储汇集方法, 将量测采样值折算到邻近时刻进行保存。该方法可基于关系库实现, 不仅工程可实施性强, 还保证了与高级应用之间的兼容性。

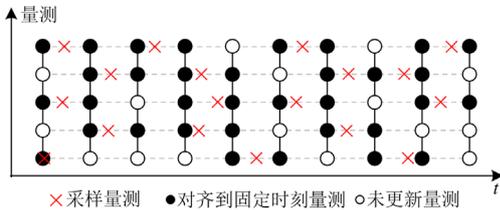


图 3 量测数据对齐原理

Fig. 3 Principle of measurement alignment

2.1 带时标稳态量测数据存储结构

含时标 RTU 稳态量测包含“设备、电气量、时间”三维数据信息, 如图 4 所示。由于关系库是二维数据结构, 现有 SCADA 系统舍弃了量测数据时间信息, 仅保存了各电气量最新的采样值。

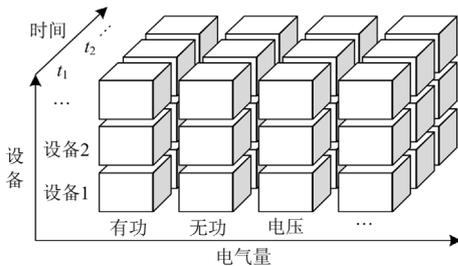


图 4 原始数据结构

Fig. 4 Original data structure

为了在关系库存储带时标量测数据, 需建立新的数据结构。将电气量和时间信息进行组合后(如图 5 所示), “设备、电气量、时间”三维数据信息可转换为“设备、电气量+时间”二维数据信息。对于状态量 x , 保存一段时间内多个固定时间间隔的状态量, 形成状态量集合 $X = \{x_{s_1}, x_{s_2}, \dots, x_{s_N}\}$ 。其中, x_{s_k} 表示第 k 个状态量, 对应时标记为 t_{s_k} , 与前一相邻时标间隔 $\Delta t = t_{s_k} - t_{s_{k-1}}$ 。显然, 对于不同 k , Δt 相同。这样, 在保存一段时间内多个量测量的同时, 间接保存了数据的时间信息。

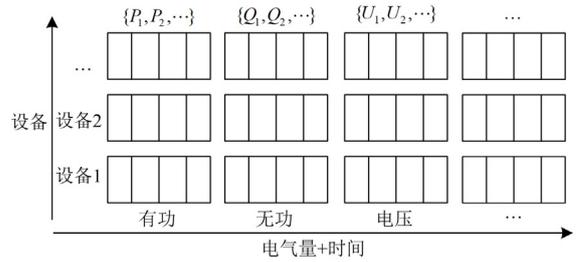


图 5 转换后数据结构

Fig. 5 Transformed data structure

对于 t_m 时间采集的量测量 x_m , 在实时库中存储点序号 k_m 可根据式(1)求得。

$$k_m = \frac{(60t_{m_mm} + t_{m_ss}) \bmod t_{s_N} + 1}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: t_{s_N} 为 N 个广域稳态量测数据最大保存时长; t_{m_mm} 和 t_{m_ss} 分别代表 t_m 所在时刻的分和秒; mod 表示取模运算。

根据时间变化, 在数据最大保存时长周期内, 按照 1 到 N 对应的存储时刻顺序进行量测量存储; 到下一数据存储周期后, 重新按照 1 到 N 对应的存储时刻顺序进行量测量存储, 如图 6 所示。通过循环队列存储方式, 保存最近 t_{s_N} 时长的量测数据。

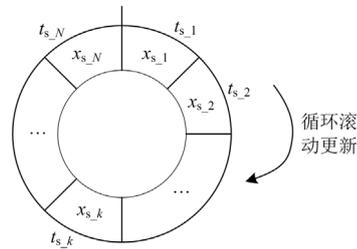


图 6 数据循环更新

Fig. 6 Data updating circularly

2.2 量测数据汇集方法

对于大多数情况来说, 量测数据采集时间并非固定时间间隔的存储时刻, 式(1)得到的存储点序号

k_m 并非整数, 此时采用点估计、插值等方法可获得临近时刻量测值^[21]。本文以线性插值为例, 阐述基于固定时间间隔稳态量测数据的循环队列存储汇集方法。

当 k_m 为非整数时, 状态量集合 X 中存储点序号中存在 k_m 满足 $k < k_m < k+1$ 关系。选取已存储的量测数据 x_{s_h} (对应时标 t_{s_h}), 根据式(2)和式(3)得到 x_{s_k} 和 $x_{s_{k+1}}$ 量测量。

$$x_{s_k} = \frac{x_m - x_{s_h}}{t_m - t_{s_h}}(t_{s_k} - t_{s_h}) + x_{s_h} \quad (2)$$

$$x_{s_{k+1}} = \frac{x_m - x_{s_h}}{t_m - t_{s_h}}(t_{s_{k+1}} - t_{s_h}) + x_{s_h} \quad (3)$$

综上, 采集时间为 t_m 的量测量 x_m 在状态量集合 X 中的存储方法可按照图 7 所示方法实现。 k_m 为整数时, 根据量测量 x_m 直接更新调度主站实时库集合 X 中对应的存储点。 k_m 为非整数时, 若量测量为遥信量, 根据量测量 x_m 更新状态量集合 X 中存储点序号为 $k+1$ 的量测数据; 若量测量为遥测量, 根据式(2)和式(3)得到 x_{s_k} 和 $x_{s_{k+1}}$ 量测量, 然后更新状态量集合 X 中存储点序号为 k 和 $k+1$ 的量测数据。特别地, 当 k 为最大保存序号 N 时, $k+1$ 取 1。

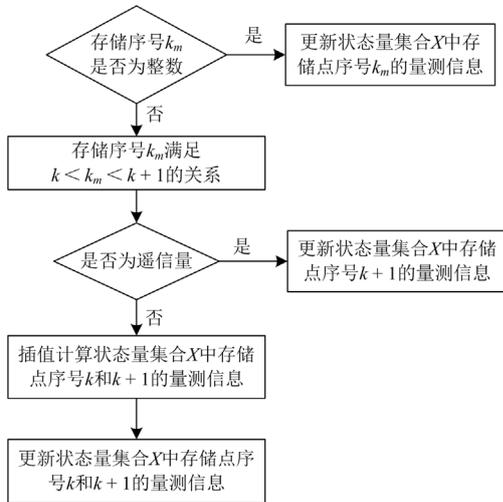


图 7 量测数据汇集方法

Fig. 7 Collection method of measurement data

3 全网同时断面生成方法

由于广域 RTU 稳态量测数据采集频率不同, 调度主站量测数据刷新速度也不一致, 按固定时间间隔滚动存储量测数据后, 必然出现某些时刻量测数据还未更新的情况(如图 3 所示)。为了保证整合后全网同时断面数据的准确性, 应当保证全部或大

部分节点量测最后刷新时间在可接受范围内, 但这不仅牺牲了数据的实时性, 且在某些极端条件下, 可能存在不满足时间约束条件的全网同时断面。因此, 需要根据量测量重要程度对数据进行分类, 优先保证重要量测量的实时性, 从而保证整合后全网同时断面数据的可观察性^[22]、准确性和实时性。本节提出一种基于“电气介数”的关键节点选取方法, 基于关键节点量测刷新情况选择用于全网同时断面整合的基础断面; 对于尚未刷新的量测数据, 则基于量测数据的时空关联特性进行实时修正。

3.1 整合断面选取

根据 1.2 节所述, 重要的电厂、变电站、换流站通常会作为关键节点进行监视。随着“双高”电网的不断建设, 电网运行方式不确定性显著增强, 需结合电网实际状态动态识别关键节点。

“电气介数”基于电路方程, 克服了加权介数模型假设母线间潮流只沿最短路径流动的不足, 能有效反映各“发电-负荷”节点对线路与节点的真实利用情况, 其物理背景更符合电力系统特点且可考虑不同发电容量及负荷水平的影响。“电气介数”反映的具有较高介数的节点或支路, 在网络中承担着较多的信息或物质交换工作, 并为大多数信息或物质流量所通过, 故其故障对网络的功能必然产生重大影响, 因此“电气介数”经常用于关键线路与节点的识别^[23-24]。

根据式(4)和式(5)计算得到电网中节点 n 的电气介数 $B_e(n)$ 。

$$B_e(n) = \sum_{g \in G, l \in L} \sqrt{W_g W_l} B_{e,gl}(n) \quad (4)$$

$$B_{e,gl}(n) = \frac{1}{2} \sum_m |I_{gl}(m, n)| \quad (5)$$

式中: G 为发电节点集合; L 为负荷节点集合; W_g 为发电机节点权重, 取该台发电机的额定容量占所有发电机总额定容量的比值; W_l 为负荷节点权重, 取该负荷节点实际负荷量占总负荷量的比值; $B_{e,gl}(n)$ 为“发电 g -负荷 l ”节点对之间的电气介数, 反映了“发电 g -负荷 l ”节点对之间引入注入电流后对节点 n 的占用情况; m 为所有与 n 有支路相连的节点; $I_{gl}(m, n)$ 为节点对 (g, l) 在支路 $m-n$ 上引起的电流。

将所有节点的电气介数按照从大到小的顺序排序, 取节点电气介数前 k_{Be} 的节点为关键节点, 其余为一般节点。其中, k_{Be} 为关键节点百分比, 结合工程经验选取。

因此, 在量测数据汇集及滚动存储过程中, 可

基于电网实时运行状态得到关键节点, 并根据关键节点的量测数据更新率判断是否满足启动要求。若同一时刻的电网关键节点量测更新率超过设定阈值, 则提取该时刻所有已对齐的量测数据并启动该时刻全网同时断面整合, 否则放弃该断面的整合。

3.2 未更新量测量实时修正

基于调度主站事故、事件记录等综合信息, 可以实现电网拓扑变化的感知。然而, 对于更新速度较慢的量测, 则需根据量测量的时空关联特性^[25]予以修正。在时间方面, 需综合考虑节点功率惯性及波动引起的不确定性, 评估量测量的态势变化; 在空间方面, 支路两侧端点的量测值与支路参数应满足一定的电气约束关系。

图 8 是分中心-省调两级调度机构量测数据刷新情况分布示意图。对于量测未刷新节点, 基于量测历史数据, 采用自回归滑动平均(auto-regressive moving average, ARMA)、光照强度 Beta 近似分布、序贯蒙特卡洛抽样法等方法, 可实现风电、光伏、常规机组和线路等设备状态的态势评估^[26-27], 从而得到各电气量 i 的拟合值 $x_{i,1}$ 。选择不早于全网同时断面的断面时刻且距断面时刻最近的计划运行数据, 结合电网静态模型参数, 生成计划方式下全网潮流信息^[28], 各电气量 i 的计划值为 $x_{i,2}$ 。其中, 节点注入功率信息来自发电计划和负荷预测, 网络拓扑来自设备检修计划, 初始无功电压数据来自上一轮已整合的全网同时断面。那么, 未更新量测数据可根据式(6)得到各量测量 i 的限值范围。

$$\begin{cases} x_{i,\max} = \max(x_{i,1}, x_{i,2}) \\ x_{i,\min} = \min(x_{i,1}, x_{i,2}) \end{cases} \quad (6)$$

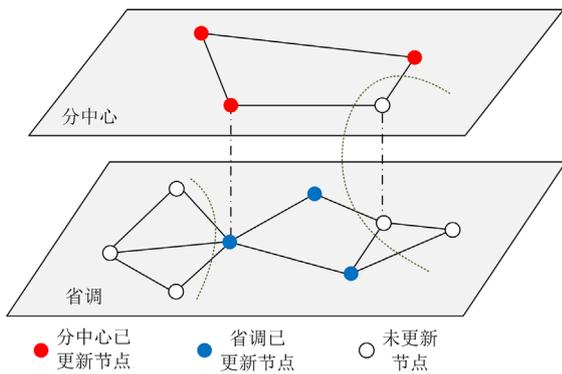


图 8 量测数据分布

Fig. 8 Distribution of measurement data

量测数据调整过程中, 不仅需要满足量测值时空关联特性, 还应保证已更新节点及边界联络线量测值保持不变。因此, 基于设备量测实时状态及设备连接关系, 通过网络拓扑分析可将未更新量测动

态分解成多个电气岛(如图 8 所示)。分别计算电气岛内各节点对联络线的灵敏度, 根据联络线已刷新侧节点和未刷新侧节点的有功功率差得到联络线功率调整量, 根据式(6)各电气量限值范围和式(7)未更新量测节点调整量线性方程组, 得到调整后各电气量, 从而形成完整的全网同时断面数据。

$$\begin{cases} a_{11}\Delta P_1 + a_{12}\Delta P_2 + \dots + a_{1n}\Delta P_n = \Delta P_{\text{tie},1} \\ a_{21}\Delta P_1 + a_{22}\Delta P_2 + \dots + a_{2n}\Delta P_n = \Delta P_{\text{tie},2} \\ \vdots \\ a_{n1}\Delta P_1 + a_{n2}\Delta P_2 + \dots + a_{nn}\Delta P_n = \Delta P_{\text{tie},n} \end{cases} \quad (7)$$

式中: a_{it} 是量测量 i 对联络线 t 的灵敏度; ΔP_i 为量测量 i 的调整量; $\Delta P_{\text{tie},t}$ 是联络线 t 的调整量。

4 算例验证

为验证本文所提方法的有效性, 本节分别从量测数据同步性、量测时延对状态估计影响、量测时延对安全稳定分析的影响 3 个方面进行测试验证。

4.1 量测数据同步性

在某分中心电网对本文所提方法进行测试验证。该测试系统中, 式(1)中参数 Δt 取 5 s, t_{s_N} 取 120 s。机器时间 t_{now} 时检测到 t_{s_k} 时刻关键节点量测刷新情况满足全网同时断面整合条件, 则选取 t_{s_k} 时刻断面为整合断面, 并启动该时刻全网同时断面整合。将量测时间与实际采样时间之差作为同步误差考察内容, 比较传统方法和本文所提方法在 t_{now} 时刻整合全网同时标量测的同步误差, 误差分布区间统计比较结果如表 1 所示。

表 1 量测数据同步误差比较

| 同步误差/s | 传统方法/% | 本文方法/% |
|--------|--------|--------|
| 0 | 0.1 | 75.2 |
| 0~2.5 | 38.9 | 0 |
| 2.5~5 | 27.3 | 0 |
| 5~7.5 | 15.6 | 7.4 |
| 7.5~10 | 7.9 | 7.7 |
| >10 | 10.2 | 9.7 |

传统方法仅存储各电气量最后一次刷新的量测值, 量测数据同步误差随着误差值增大呈现出衰减趋势, 且只有极少的量测数据同步误差接近 0。本文所提方法虽然牺牲了 $t_{\text{now}} - t_{s_k}$ 时长的时效性, 但是同步误差大大降低。当量测数据最后刷新时刻位于 t_{s_k} 到 t_{now} 区间和 t_{s_k-1} 到 t_{s_k} 区间(图 9 中 A1、A2 区间部分)时, 应用插值、点估计等方法形成 t_{s_k} 时刻量测, 因此该区间量测数据同步误差为 0; 当量

测数据最后刷新时刻早于 $t_{s,k-1}$ (图 9 中 B 区间部分) 时, 则应用 3.2 节所述方法进行修正。

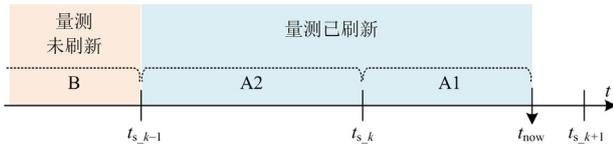


图 9 数据整合时间关系

Fig. 9 Relationship of data integration time

4.2 量测时延对状态估计的影响

RTU 稳态量测是调度主站状态估计的主要数据来源, 全网量测数据同步性提升可大大降低数据不同步时延引入的误差。取潮流计算结果作为真值, 采用以下两个指标衡量不同步误差影响下的状态估计精度。

$$S_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i^* - x_i| \quad (8)$$

$$S_2 = \max_i \{|x_i^* - x_i|\} \quad (9)$$

式中: x_i^* 为量测量 i 的估计值; x_i 为量测量 i 的真值。

4.2.1 IEEE 39 节点系统

采用 IEEE 39 节点系统进行仿真分析, 共有量测数据 241 个。其中, 发电机共 10 台, 负荷共 19 个, 支路共 46 条。节点电气介数计算结果如表 2 所示。

表 2 节点电气介数

Table 2 Electric betweenness of nodes

| 排序 | 节点 | 电气介数 | 排序 | 节点 | 电气介数 | 排序 | 节点 | 电气介数 |
|----|----|---------|----|----|---------|----|----|--------|
| 1 | 6 | 4881.14 | 14 | 25 | 1447.42 | 27 | 1 | 757.64 |
| 2 | 5 | 3898.05 | 15 | 3 | 1223.45 | 28 | 29 | 752.99 |
| 3 | 10 | 3183.29 | 16 | 18 | 1095.31 | 29 | 26 | 656.78 |
| 4 | 16 | 3051.07 | 17 | 24 | 1081.85 | 30 | 30 | 644.93 |
| 5 | 8 | 2779.84 | 18 | 33 | 985.55 | 31 | 27 | 557.56 |
| 6 | 7 | 2664.61 | 19 | 23 | 983.83 | 32 | 35 | 498.14 |
| 7 | 19 | 2483.99 | 20 | 39 | 978.62 | 33 | 28 | 443.70 |
| 8 | 11 | 2473.86 | 21 | 4 | 897.83 | 35 | 32 | 408.22 |
| 9 | 2 | 2258.85 | 22 | 21 | 874.64 | 36 | 31 | 407.89 |
| 10 | 20 | 1898.01 | 23 | 34 | 869.30 | 37 | 38 | 341.53 |
| 11 | 13 | 1825.55 | 24 | 14 | 779.56 | 38 | 12 | 304.12 |
| 12 | 22 | 1540.11 | 25 | 15 | 766.88 | 39 | 36 | 246.96 |
| 13 | 17 | 1526.05 | 26 | 9 | 759.64 | — | — | — |

考虑新能源波动、负荷突变等运行方式发生重大变化情况, 假设因为时延量测将产生 10% 误差, 节点误差分布范围不同时, 对应状态估计节点电压误差统计情况如表 3 所示。从测试结果可以看出, 减少关键节点量测误差、保证关键节点量测精度可

显著提高整体估计精度。

进一步分析不同电气介数节点时延误差与状态估计节点电压误差统计结果。图 10 中, 虚线右侧节点为关键节点, 随着电气介数的提升, 这些节点对状态估计结果准确性的影响显著提升。而虚线左侧的非关键节点对状态估计精度影响较小。该算例结果进一步验证了关键节点量测精度对系统可观测性和可靠性的重要作用。

表 3 不同误差分布状态估计误差比较

Table 3 Comparison of SE errors in different error distribution

| 序号 | 算例描述 | S_1 /% | S_2 /% |
|----|-------------|----------|----------|
| 1 | 所有节点有时延误差 | 7.12 | 7.27 |
| 2 | 仅关键节点有时延误差 | 5.97 | 6.09 |
| 3 | 仅非关键节点有时延误差 | 1.24 | 1.36 |

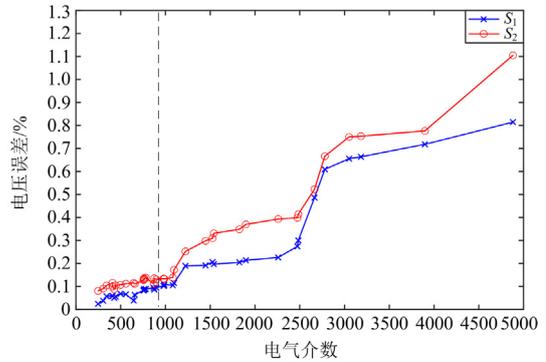


图 10 电气介数与状态估计电压误差统计

Fig. 10 Statistics of electric betweenness and SE voltage error

4.2.2 实际系统

利用某分中心级电网实际系统进行测试。该地区网架示意图如图 11 所示, 并有大规模新能源基地, 发电波动性强。在负荷快速爬升过程中, 分析量测时延对状态估计精度的影响。

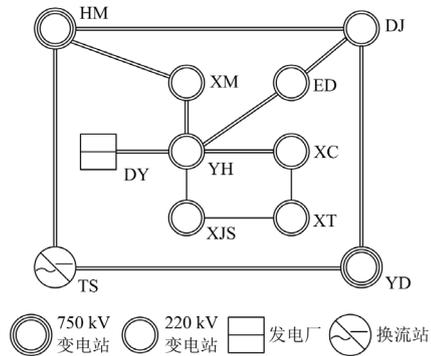


图 11 网络结构

Fig. 11 Network structure

设系统最小时延 $d_{\min} = 1s$, 最大时延 $d_{\max} = 4s$ 。由于不同设备量测时延对系统影响权重不同,

为方便结果对比, 对于关键设备, 时延 d_i 取 2.5 s, 非关键设备时延 d_i 在 [1,4] s 范围内由随机数产生器产生。当负荷变化率在 0.01%/s~0.16%/s 时, 状态估计精度变化如图 12 所示。将关键设备时延 d_i 取 0 s, 非关键设备时延 d_i 仍取 [1, 4] s 范围内随机数, 状态估计精度变化如图 13 所示。对比图 12 不难发现, 消除关键设备时延后, 状态估计误差显著降低。

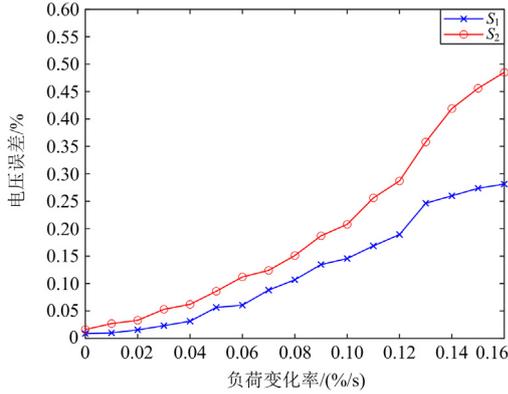


图 12 估计误差随负荷变化率的变化(关键设备量测有时延)
Fig. 12 SE error variation with rate of load change (key device measurement with delay)

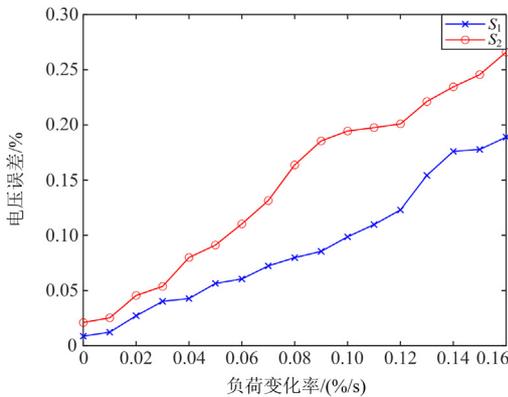


图 13 估计误差随负荷变化率的变化(关键设备量测无时延)
Fig. 13 SE error variation with rate of load change (key device measurement without delay)

4.3 量测时延对安全稳定分析的影响

状态估计是大电网在线安全稳定分析的主要数据来源, 全网量测数据同步性提升可进一步提升在线分析结果的准确性。本节基于 4.2.2 节算例, 进一步分析量测时延对预想故障下关键线路过载裕度的影响。其中, 线路过载裕度 η 根据式(10)计算^[29]。

$$\eta = \left(1 - \frac{I}{I_N}\right) \times 100\% \quad (10)$$

式中: I 为线路实际电流; I_N 为线路允许载流量。

同样地, 关键设备时延 d_i 取 2.5 s、非关键设备时延 d_i 在 [1,4] s 范围内由随机数产生器产生, 当负荷变化率在 0.01%/s~0.16%/s 时, 线路 YD-DJ 的一回线开断后过载裕度与负荷变化率结果如图 14 所示。关键设备时延 d_i 取 0 s、非关键设备时延 d_i 仍取 [1,4] s 范围内随机数, 线路 YD-DJ 的一回线开断后过载裕度与负荷变化率结果如图 15 所示, 随着负荷变化量的增加, 过载裕度减小至负数(不安全)。而由图 14 结果可以看出, 由于关键节点存在时延误差, 安全稳定评估结果未出现过载裕度不安全的情况, 未能真实反映实际情况。

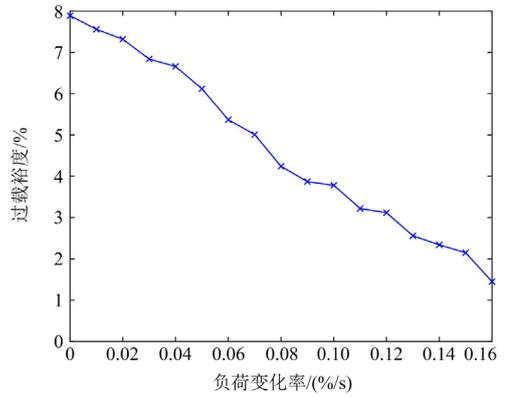


图 14 过载裕度随负荷变化率的变化(关键设备量测有时延)
Fig. 14 Overload margin variation with rate of load change (key device measurement with delay)

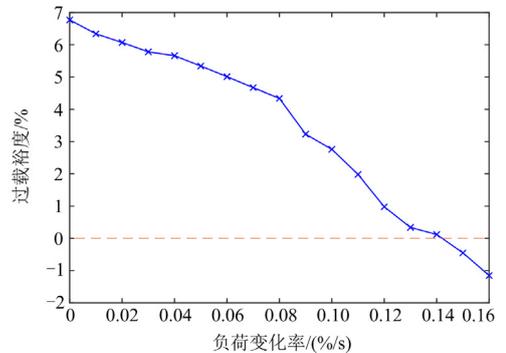


图 15 过载裕度随负荷变化率的变化(关键设备量测无时延)
Fig. 15 Overload margin variation with rate of load change (key device measurement without delay)

从上述分析结果可以看出, 关键节点时延误差消除后, 能更加准确地识别 $N-1$ 故障下热稳过载的线路, 提高电网运行状态实时感知能力。

5 结语

本文提出了一种基于统一时钟的全网同时断面生成技术。针对量测量在时间序列无规律稀疏分布

导致存储和访问效率低的难题, 提出采用固定时间间隔的循环队列数据存储和汇集方法。采用电气介数法识别影响结果准确性的关键节点, 优先保障关键节点量测数据的实时性, 并利用计划数据和已整合的全网同时断面修正更新较慢的 RTU 量测数据, 从而构建完整的全网同时断面量测数据。标准算例和实际电网算例运行结果验证了本文所提方法的正确性和有效性。

参考文献

- [1] 张晓华, 刘道伟, 李柏青, 等. 智能全景系统概念及其在现代电网中的应用体系[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2885-2895.
ZHANG Xiaohua, LIU Daowei, LI Baiqing, et al. The concept of intelligent panoramic system and its application system in modern power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2885-2895.
- [2] 摆世彬, 严明辉, 徐伟, 等. 含大规模风电集群电网的在线计算数据生成技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 66-73.
BAI Shibin, YAN Minghui, XU Wei, et al. An online calculation data generation technology for power grid integrated with large-scale wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 66-73.
- [3] DOBAKSHARI A S, ABDOLMALEKI M, TERZIJA V, et al. Online non-iterative estimation of transmission line and transformer parameters by SCADA data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2632-2641.
- [4] 汪际峰, 沈国荣. 大电网调度智能化的若干关键技术问题[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 10-16.
WANG Jifeng, SHEN Guorong. Some key technical issues on intelligent power dispatching of bulk power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 10-16.
- [5] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.
- [6] 齐文斌, 肖晓春, 李东平, 等. 调度中心 SCADA 与 WAMS 实时数据的差异[J]. 南方电网技术, 2013, 7(5): 87-91.
QI Wenbin, XIAO Xiaochun, LI Dongping, et al. The difference between SCADA and WAMS real-time data in dispatching center[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(5): 87-91.
- [7] 魏大千, 王波, 刘涤尘, 等. 基于时序数据相关性挖掘的 WAMS/SCADA 数据融合方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 315-320.
WEI Daqian, WANG Bo, LIU Dichen, et al. WAMS/SCADA data fusion method based on time-series data correlation mining[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 315-320.
- [8] 苏蓉, 赵俊博, 张葛祥, 等. 一种计及全量测相关性的混合电力系统状态估计方法[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2651-2658.
SU Rong, ZHAO Junbo, ZHANG Gexiang, et al. A hybrid power system state estimation method considering measurement correlations[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2651-2658.
- [9] KABIRI M, AMJADY N. A new hybrid state estimation considering different accuracy levels of PMU and SCADA measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(9): 3078-3089.
- [10] 盛万兴, 方恒福, 沈玉兰, 等. 考虑量测延时基于 3 种数据融合的配网状态估计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 108-115.
SHENG Wanxing, FANG Hengfu, SHEN Yulan, et al. Distribution state estimation based on fusion of three data sources considering measurement delay[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(12): 108-115.
- [11] 陆子刚, 卫志农, 孙国强, 等. 相关量测下处理时延的电力系统动态状态更新法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 132-138.
LU Zigang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Power system dynamic state updating method in processing time delay with correlated measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 132-138.
- [12] 赵红嘎, 薛禹胜, 高翔, 等. 量测量的时延差对状态估计的影响及其对策[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 12-16.
ZHAO Hongga, XUE Yusheng, GAO Xiang, et al. Impacts of the difference between measurement transmission delays on state estimation and the countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 12-16.
- [13] XU D L, XU J J, WU Z J, et al. A real-time state estimation framework for integrated energy system considering measurement delay[J]. IET Generation Transmission & Distribution, Early Access.
- [14] 赵家庆, 赵裕啸, 丁宏恩, 等. 电网调度自动化主备系统间模型正确性校验技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 139-144.
ZHAO Jiaqing, ZHAO Yuxiao, DING Hongen, et al. Technical scheme for the verification of grid models between the active and standby systems in power dispatching automation system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 139-144.
- [15] 赵家庆, 丁宏恩, 李汇群, 等. 智能调控主站应用时标量测的关键技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 128-135.
ZHAO Jiaqing, DING Hongen, LI Huiqun, et al. A key technical scheme of application of time stamped measurements in smart control centers[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 128-135.

- [16] 杨璃, 汤朝波, 李蓓贝, 等. 面向电网运行的全息时标量测数据集成与应用技术的研究[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(6): 120-122, 126.
YANG Li, TANG Chaobo, LI Beibei, et al. Research on holographic time-scalar measurement data integration and applied technology for power operation[J]. Computer Applications and Software, 2015, 32(6): 120-122, 126.
- [17] 臧海祥, 郭镜玮, 黄蔓云, 等. 基于深度迁移学习的时变拓扑下电力系统状态估计[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 49-56.
ZANG Haixiang, GUO Jingwei, HUANG Manyun, et al. State estimation for power systems with time-varying topology based on deep transfer learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 49-56.
- [18] WANG T, ZHANG B Y, YUAN D M. Event-based extended dissipative state estimation for memristor-based Markovian neural networks with hybrid time-varying delays[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers, 2021, 68(11): 4520-4533.
- [19] 李虹, 赵书强. 基于 WAMS/SCADA 混合量测的电力系统强跟踪滤波动态状态估计[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 101-105, 116.
LI Hong, ZHAO Shuqiang. Power system dynamic state estimation of strong tracking filter based on hybrid WAMS/SCADA measurements[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 101-105, 116.
- [20] LIU Y, SINGH A K, ZHAO J B, et al. Dynamic state estimation for power system control and protection IEEE task force on power system dynamic state and parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5909-5921.
- [21] 王波, 王红霞, 姚良忠, 等. 电力系统多模态数据融合模式及关键技术问题[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 188-199.
WANG Bo, WANG Hongxia, YAO Liangzhong, et al. Multi-modal data fusion mode for power system and its key technical issues[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 188-199.
- [22] PATEL C D, TAILOR T K, SHUKLA S K, et al. Steiner tree-based design of communication infrastructure with co-optimizing the PMU placement for economical design of WAMS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-11.
- [23] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [24] 徐岩, 邹静. 基于改进节点电气介数的电网关键节点辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(9): 107-113.
XU Yan, ZHU Jing. Identification of key nodes in power grid based on improved node electric betweenness[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2017, 29(9): 107-113.
- [25] 高正男, 杨帆, 胡妹博, 等. 面向新能源电力系统状态估计的伪波动数据清洗[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2366-2377.
GAO Zhengnan, YANG Fan, HU Shubo, et al. Pseudo-fluctuation data cleaning for state estimation of new energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2366-2377.
- [26] 史智萍, 王智敏, 吴玮坪, 等. 基于态势感知的电网消纳可再生能源发电评估与扩展规划方法[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2180-2186.
SHI Zhiping, WANG Zhimin, WU Weiping, et al. Evaluation of renewable energy integration capability and network expansion planning based on situation awareness theory[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2180-2186.
- [27] 鲍长庚, 闫贻鹏, 黄一楠, 等. 基于多元自适应回归样条的光伏并网系统日输出功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 124-131.
BAO Changgeng, YAN Yipeng, HUANG Yinan, et al. Forecasting the daily power output of a grid-connected photovoltaic system based on multivariate adaptive regression splines[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 124-131.
- [28] 曾泓泰, 郭庆来, 周艳真, 等. 面向电网运行方式计算的不收敛潮流无功调整方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 1-12.
ZENG Hongtai, GUO Qinglai, ZHOU Yanzhen, et al. Reactive power adjustment method of non-convergent power flow for power system operation mode calculation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 1-12.
- [29] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电网运行风险检测、评估及可视化技术规范: GB/T 40585—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Technical specifications for monitoring, assessment and visualization of power grid operational risk: GB/T 40585—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.

收稿日期: 2022-10-24; 修回日期: 2023-01-02

作者简介:

严明辉(1987—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: yanmh2005@126.com

徐伟(1982—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: xu-wei@sgepri.sgcc.com.cn

汤奕(1977—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, 电网信息物理系统等。E-mail: tangyi@seu.edu.cn

(编辑 魏小丽)