

DOI: 10.7667/PSPC161249

基于信息冗余的电力系统分布式状态估计

胡春潮, 何杰, 马凯

(广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东省智能电网新技术企业重点实验室, 广东 广州 510080)

摘要: 随着智能变电站的不断发展, 二次系统中模拟量信息的网络化传递方式给电力系统分布式状态估计带来新的研究内容。提出基于二次系统信息冗余的分布式状态估计方法, 给出了分布式状态估计架构, 并利用模拟量间冗余关系建立线性静态分布式状态估计模型。进一步通过算例验证基于信息冗余的电力系统分布式状态估计方法。算例结果表明, 该方法能够有效降低模拟量误差并提高上传模拟量的准确性。

关键词: 电力系统; 信息冗余; 分布式; 状态估计

Power system distributed state estimation based on information redundancy of secondary system

HU Chunchao, HE Jie, MA Kai

(Guangdong Province Key Laboratory of Smart Grid Technology, Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: With the development of smart substation, information sharing and its redundant transmission of analog quantities in secondary system provide new research ideas for distributed state estimation of power system. This paper proposes distributed state estimation method based on information redundant of secondary system and gives its structure and content and builds a linear static model of distributed state estimation by using redundant relationship of analog quantities. Furthermore, a numerical example is designed to simulate and verify the proposed method. The experiment results show that the method can effectively reduce absolute error of analog quantities and improve uploading analog quantities reliability.

Key words: power system; information redundancy; distributed; state estimation

0 引言

随着互联电网规模的不断扩大和新能源的接入, 传统电力系统状态估计的数据内容和接入对象不断增多, 在给调度中心带来运行压力的同时, 也由于局部冗余度不足、可靠性低等问题成为调度中心高级应用实用化的瓶颈^[1-2]。

针对传统集中式状态估计的问题, 文献[3]研究提出了分布式状态估计方法, 给出分布式状态估计方法架构、算法、传输协议和过渡方案等内容; 文献[4]研究了电力系统分布式状态估计精度问题, 指出外网建模方式越精确, 变电站端状态估计越接近集中式状态估计结果; 文献[5]研究了异步迭代模式的电力系统分布式状态估计方法, 解决了内网边界区域不良数据难以辨识的问题; 文献[6]研究了SCADA系统和PMU混合量测下的分布式状态估计方法, 在保证状态估计的收敛速度的同时, 提高分

布式状态估计冗余度和可靠性。

为进一步提升分布式状态估计可靠性、拓展分布式状态估计应用领域, 本文提出一种基于二次系统信息冗余的分布式状态估计方法, 将二次系统信息线性冗余关系纳入分布式状态估计体系, 与传统状态估计相比, 其在估计精度和计算速度上具有明显优势。

1 分布式状态估计架构

当前分布式状态估计都基于一次系统数据内容和冗余关系, 通过采集一次系统复电压 U , 复电流 I 以及总功率 P, Q 等模拟量和一次系统开关刀闸状态量, 结合一次系统潮流计算、等值计算等物理约束和模型方法, 形成一次系统状态估计体系^[7-9]。

然而随着智能变电站的不断发展, 变电站二次系统突破原有点对点的信息传输方式, 建立二次系统信息共享网络。网络化的信息交换方法使电力系

统信息的应用不再局限于某一特定功能,充分的信息共享给电力系统状态数据带来更多冗余关系^[10]。同样地,电力系统状态估计也有必要从基于一次系统物理关系的单一状态估计拓展为包含二次系统信息冗余关系在内的多层次状态估计方法,进一步提升电力系统状态估计可靠性和准确性。

如图1所示描述了智能变电站多信号源的信息冗余关系。一方面,智能化变电站中对于某节点模拟量通常设置多组不同精度互感器为不同自动化系统提供信息采集方式;另一方面,二次系统信息转发过程中组播、广播信息现象十分普遍,同一互感器采集模拟量由光纤以太网组播至所有配置端口,各智能终端接收信息存在冗余关系。

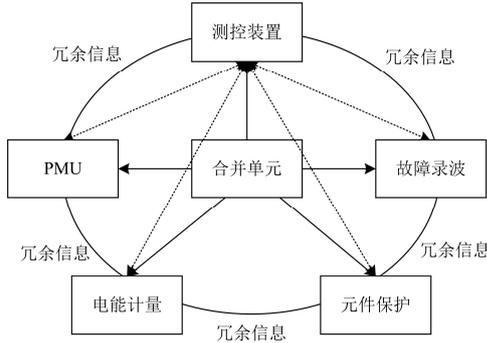


图1 智能变电站多信号源的信息冗余关系

Fig. 1 Multi signal sources of information redundancy in smart substation

为建立以二次系统信息冗余关系为基础的电力系统分布式状态估计方法,本文采用如图2所示分布式状态估计体系结构:在变电站信息建模基础上,根据二次系统冗余关系建立分布式状态估计模型,综合处理分析变电站各自动化系统采集多源信息,配合传统状态估计方法将处理后的“熟数据”上传调度中心或用于变电站站端应用。

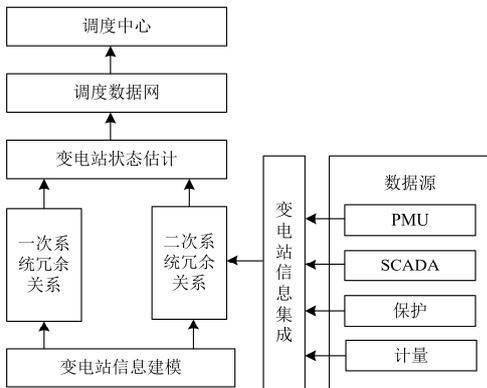


图2 基于二次系统信息冗余的分布式状态估计体系结构

Fig. 2 Architecture of distributed state estimation based on information redundancy of secondary system

基于二次系统信息冗余的分布式状态估计的优势在于:

- 1) 在变电站层面进行静态线性状态估计,在估计精度和计算速度上具有优势,且二次系统自带的时标标签保证时间断面的一致性。
- 2) 当前电力系统分布式状态估计需要在变电站层面做外部电网等值,估计精度受等值模型影响,而本文提出的分布式状态估计方法完全基于变电站内部二次系统信息冗余,无需外部等值模型。

2 基于信息冗余的分布式状态估计模型

2.1 模拟量收发模型

智能变电站智能终端(IED)通过光纤组网互联,各设备通常具有多种报文收发能力。为描述信息间的冗余关系,需要建立变电站设备逻辑节点与模拟量信息的关系模型。IEC 61850 定义的全站系统配置文件(SCD),涵盖变电站内各逻辑节点订阅和发送模拟量的控制方法、业务内容等^[11],通过 SCD 文件解析获取节点模拟量发送矩阵 $P_{m \times n}$ 。设智能变电站内具有收发模拟量功能的逻辑节点数量为 m ,模拟量种类为 n ,节点模拟量发送矩阵表达式如式(1)所示。

$$P_{m \times n} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若逻辑节点} j \text{发送模拟量} i \\ 0, & \text{若逻辑节点} j \text{不发送收模拟量} i \end{cases}$$

与之相似地,建立如式(2)所示模拟量接收矩阵 $R_{n \times m}$ 。

$$R_{m \times n} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若逻辑节点} j \text{接收报文} i \\ 0, & \text{若逻辑节点} j \text{不接收报文} i \end{cases}$$

模拟量发送矩阵与模拟量接收矩阵通过 SCD 文件获取。需要说明的是,构建模型时,模拟量编排可按其对应报文的站内唯一标识(APPID)按大小排序,逻辑节点则按逻辑节点名为唯一标识固定编号。

2.2 逻辑连接模型

电力系统模拟量信息由二次系统进行传输和共享, 向多种自动化功能或多台智能设备提供原始数据。与之相应的, IEC 61850 中定义两种主要报文: SV 报文和 GOOSE 报文, 在服务模型上均采用客户/服务器模型(C/S), 在传输方式上则均使用组播方式, 来保证信息订阅者获得服务。

智能变电站逻辑节点与逻辑节点间通过模拟量信息的发送与订阅存在逻辑连接关系, 对站内 m 个逻辑节点, 逻辑连接矩阵 $L_{m \times m}$ 表达式如式(3)所示。

$$L_{m \times m} = \sum_{i=1}^n L_{m \times m, i} = R_{n \times m} \times P_{m \times n} \quad (3)$$

式中, 逻辑矩阵 $L_{m \times m}$ 在状态估计过程中无需计算最终结果, 而使用单一模拟量下的逻辑连接关系 $L_{m \times m, i}$ 来表示, 其中 i 为模拟量编号。

2.3 基于二次系统信息冗余的分布状态估计模型

本文提出的分布式状态估计方法由二次系统信息冗余传递关系出发, 通过二次系统信息所带时标保证数据时间断面的一致性, 对电力系统变电站内模拟量作线性静态状态估计。设实际发送模拟量数值与逻辑节点对应关系为 $B_{m \times 1, i}$, 其表达式如(4)所示, 式中 b_{ij} 为变电站内逻辑节点 j 发送模拟量 i 的数值。

$$B_{m \times 1, i} = [b_{i1} \ b_{i2} \ \dots \ b_{im}]^T \quad (4)$$

由二次系统模拟量收发模型和逻辑连接模型可推导模拟量 i 传递矩阵 $C_{m \times 1, i}$, 如式(5)所示。

$$C_{m \times 1, i} = L_{m \times m, i} \times B_{m \times 1, i} \quad (5)$$

以模拟量传递矩阵 $C_{m \times 1, i}$ 为量测方程, 则各模拟量目标函数为

$$\min J(C_{m \times 1, i}) = (Z_i - C_{m \times 1, i})^T R^{-1} (Z_i - C_{m \times 1, i}) \quad (6)$$

式中: Z_i 为实际采集各逻辑节点中模拟量 i 的数值; R 为权重矩阵, 是以 σ_i 为对角元素的误差方差阵。由加权最小二乘法(WLS)可求出线性状态估计解式为

$$\hat{C}_{m \times 1, i} = L_{m \times m, i} (L_{m \times m, i}^T R^{-1} L_{m \times m, i})^{-1} L_{m \times m, i}^T R^{-1} Z_i \quad (7)$$

进一步形成估计后模拟量矩阵 $\hat{C}_{m \times m}$ 如式(8)所示。

$$\hat{C}_{m \times m} = [\hat{C}_{m \times 1, 1} \ \hat{C}_{m \times 1, 2} \ \dots \ \hat{C}_{m \times 1, m}] \quad (8)$$

2.4 基于信息冗余的分布式状态估计实现步骤

根据上文建立的基于二次系统信息冗余的分布式状态估计模型, 其实现步骤主要包括:

1) 由变电站 SCD 文件解析, 获取模拟量收发矩阵模型, 并按式(3)计算模拟量的逻辑连接矩阵。

2) 采集变电站二次系统中智能设备收发模拟量数值, 形成矩阵 $Z=[Z_1 \ Z_2 \ \dots \ Z_m]$ 。

3) 按式(6)、式(7)计算基于二次系统信息冗余的分布式状态估计结果, 形成如式(8)所示估计后模拟量矩阵。

3 算例分析

为验证本文提出的基于二次系统信息冗余的分布式状态估计方法, 以如图3所示某 110 kV 变电站为对象进行算例分析, 对应二次系统拓扑如图4所示。所选实验对象共有 5 个间隔, 正方形表示个间隔内模拟量接入逻辑节点, 通常对应 MU 设备节点; 实心圆对应订阅模拟量的设备终端, 通常对应保护、测控等装置节点。如表1所示, 列出除交换机外其他逻辑节点对应设备名称。

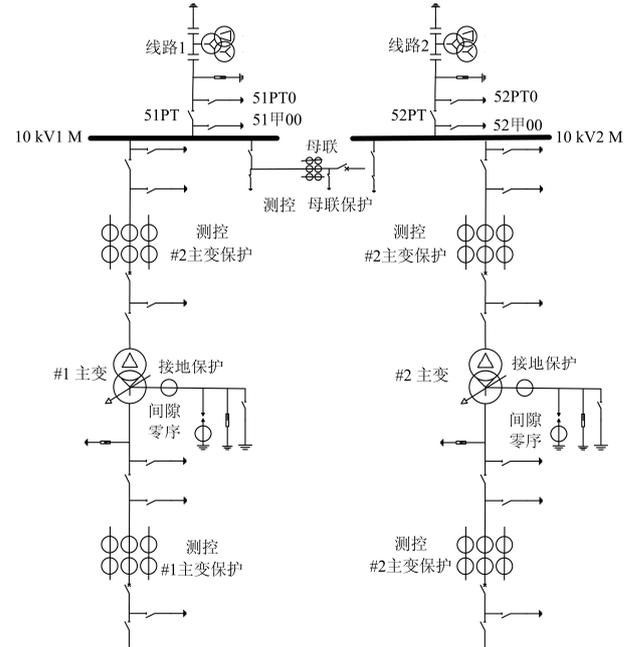


图3 某 110 kV 变电站部分一次系统接线图

Fig. 3 One part of primary system wiring diagram of 110 kV substation

由于本文提出的状态估计方法中量测方程与模拟量的电量关系无关, 无需获取所有变电站一次模拟量。为简化算例复杂程度, 选取该 110 kV 变电站部分模拟量进行状态估计。如表2所示, 列出除交换机逻辑节点以外, 部分模拟量与发送逻辑节点对应关系, 所选模拟量涵盖各类变电站二次系统设备订阅关系类型。

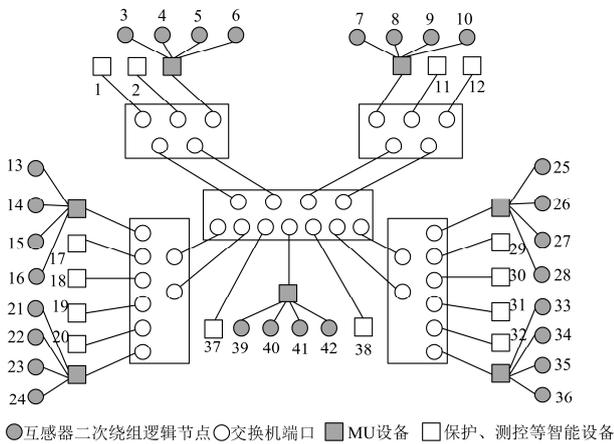


图 4 某 110 kV 变电站二次系统拓扑图

Fig. 4 Secondary system topological diagram of a 110 kV substation

表 1 各端口对应的设备名称

Table 1 Devices name corresponding to each port

端口号	逻辑节点名称	端口号	逻辑节点名称
1、11	线路测控节点	19、31	主变高智能终端
2、12	线路保护节点	20、32	主变低智能终端
3、7	线路保护用 CT 绕组节点	21、33	变低保护用 CT 绕组节点
4、8	线路测控用 CT 绕组节点	22、34	变低测控用 CT 绕组节点
5、9	线路保护用 PT 绕组节点	23、35	变低保护用 PT 绕组节点
6、10	线路测控用 PT 绕组节点	24、36	变低测控用 PT 绕组节点
13、25	变高保护用 CT 绕组节点	37	母线保护设备节点
14、26	变高测控用 CT 绕组节点	38	母线测控节点
15、27	变高保护用 PT 绕组节点	39	母线保护用 CT 节点
16、28	变高测控用 PT 绕组节点	40	母线测控用 CT 节点
17、29	主变保护节点	41	母线保护用 PT 节点
18、30	主变测控节点	42	母线测控用 PT 节点

根据表 2 内容,按式(1)~式(5)分别建立模拟量收发模型和逻辑模型,并在所有测控用二次绕组模拟量中添加 $\pm 0.2\%$ 以内的正态分布误差,在所有保护用二次绕组模拟量中加入 $\pm 5\%$ 以内的正态分布误差。

使用基于二次系统信息冗余的分布式状态估计方法获得估计后模拟量数值,计算估计值与实际模拟量数值绝对误差的标准差,并与未处理前原始误

差进行比较,统计共 100 次实验中状态估计前后绝对误差的标准差,以及所有估计模拟量的绝对误差分布。

表 2 模拟量与收发逻辑节点对应关系

Table 2 Correspondence between analog quantities and logical nodes

编号	模拟量内容	发送节点	接收节点
0x4001	线路 1 A 相电流	3、4	1、2、37、38
0x4007	线路 1 AB 相线电压	5、6	1、2、37、38
0x4011	线路 2 A 相电流	7、8	11、12、37、38
0x4017	线路 2 AB 相线电压	9、10	11、12、37、38
0x4301	#1 变高 A 相电流	13、14	17、18
0x4304	#1 变高 AB 相线电压	15、16	17、18
0x4306	#1 变低 A 相电流	21、22	17、18、37、38
0x4309	#1 变低 AB 相线电压	23、24	17、18、37、38
0x4511	#2 变高 A 相电流	25、26	29、30
0x4512	#2 变高 AB 相线电压	27、28	29、30
0x4517	#2 变低 A 相电流	33、34	29、30、37、38
0x4519	#2 变低 AB 相线电压	35、36	29、30、37、38
0x4637	母线 A 相电流	39、40	37、38
0x4639	母线 AB 相电压	41、42	37、38

如图 5 所示为 100 次仿真实验的标准差折线图。标准差反映了每次试验中绝对误差的离散程度,使用本文提出的基于二次系统信息冗余的分布式状态估计结果与未处理结果相比,模拟量绝对误差的分布更加集中。

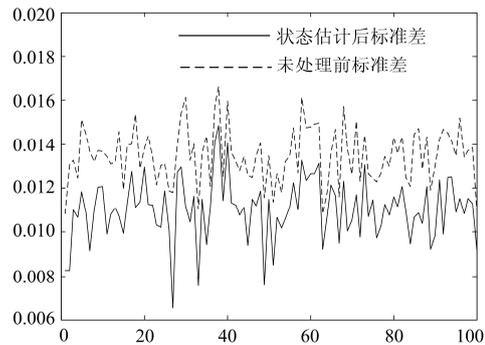


图 5 仿真实验模拟量绝对误差标准差对比

Fig. 5 Comparison of standard deviation of simulation experiment

进一步统计 100 次实验中,所有模拟量绝对误差的频数分布,绘制如图 6 所示直方图。图 6 中去除所有绝对误差为 0 的模拟量,可以看出,经过本文状态估计方法处理后的模拟量数据在大于 0.02 的绝对误差的频数分布明显少于未处理情况,在小于 0.02 的绝对误差的频数分布略高于未处理情况。

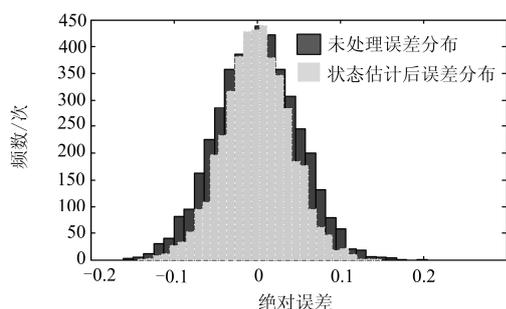


图6 模拟量绝对误差频数分布图

Fig. 6 Distribution diagram of times of absolute error of analog quantity

4 结论

本文提出一种基于二次系统信息冗余的分布式状态估计方法,在给出分布式状态估计架构的同时,研究基于信息冗余的分布式状态估计模型,并通过仿真实验验证本文方法的有效性。实验结果表明,本文提出分布式状态估计方法能够有效降低模拟量误差,其作用效果与信息冗余程度相关,且与传统状态估计方法相比,本文采用的基于信息冗余的线性状态估计方法在计算开销、计算精度上都更具优势。

参考文献

- [1] 畅广辉. 基于混合量测的电力系统分布式状态估计研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
CHANG Guanghui. Mixed measurements based distributed state estimation for power system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.
- [2] 黄伟, 庞琳, 曹彬, 等. 基于分区解耦的配电网状态估计的分布式并行计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 45-51.
HUANG Wei, PANG Lin, CAO Bin, et al. Parallel and distributed computing for an area-decoupled state estimation method for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 45-51.
- [3] 李青芯, 孙宏斌, 王晶, 等. 变电站—调度中心两级分布式状态估计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 44-50.
LI Qingxin, SUN Hongbin, WANG Jing, et al. A new method of solving optimal break point sets for protection coordination in multi-loop network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 44-50.
- [4] KORRES G N. A portioned state estimator for external network modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 834-842.
- [5] 张海波, 易文飞. 基于异步迭代模式的电力系统分布式状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 125-131.
ZHANG Haibo, YI Wenfei. Research on operation

- cockpit technologies of complicated power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 125-131.
- [6] 陈胜, 卫志农, 郭晓敏, 等. 基于交替方向乘子法的分布式双线性状态估计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 84-90.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, GUO Xiaomin, et al. Distributed bilinear state estimation based on alternating direction method of multipliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 84-90.
- [7] 丁宏恩, 戴则梅, 霍雪松, 等. 基于混合量测的二次线性状态估计方法及其工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 163-170.
DING Hongen, DAI Zemei, HUO Xuesong, et al. Hybrid measurement based secondary linear state estimation method and its engineering application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 163-170.
- [8] 姬源, 杨欣, 王燕, 等. 基于支路等值的拓扑辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 129-134.
JI Yuan, YANG Xin, WANG Yan, et al. A topology estimation method based on branch equivalence[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 129-134.
- [9] 黄知超, 谢霞, 王斌. 结合模糊综合评判与决策的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 65-69.
HUANG Zhichao, XIE Xia, WANG Bin. Power system state estimation combined with fuzzy comprehensive evaluation and decision-making[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 65-69.
- [10] 王海柱. 智能变电站信息流定量分析与优化控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
WANG Haizhu. Research on quantitative analysis and optimization control of traffic flow in smart substation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [11] 王海柱, 张延旭, 蔡泽祥, 等. 智能变电站过程层网络信息流潮流模型与计算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2603-2607.
WANG Haizhu, ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, et al. Information flow calculation model and method for process bus network in smart substation[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2602-2607.

收稿日期: 2016-08-08; 修回日期: 2016-10-19

作者简介:

胡春潮(1984—), 男, 硕士, 工程师, 从事智能电网和电力市场研究。E-mail: 15013027028@139.com

(编辑 周金梅)