

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.01.017

基于快速解耦算法的地区电网状态估计研究

杨 翔¹, 王坚俊¹, 唐 剑¹, 商佳宜¹, 祝文澜¹, 李 甘², 甘宏军³

(1. 国网杭州供电公司, 杭州 310000; 2. 国网四川省电力公司, 成都 610000;
3. 国网攀枝花供电公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要:近年来,随着智能电网的快速发展,大量微网和新能源电源并入地区电网,调度自动化系统中的核心模块—电力系统状态估计因数据量急剧扩大,计算速度缓慢的问题日益凸显。文中提出了一种适用于地区电网的快速解耦状态估计算法,目的在于解决状态估计计算效率低下的问题。该算法基于地区电网调度分区分层运行的特点和管理架构,引入同步相量量测的发展成果,在下层(县调层)采用快速解耦状态估计算法,在上层(地调层)满足线性状态估计条件。相比之前算法,新算法在上、下两层都具有更快的计算速度,整体效率有较大提高。通过用IEEE 118节点仿真系统对新算法进行的测试,结果验证了新算法在计算速度上的优越性能。

关键词:地区电网; 状态估计; 分布式架构; 快速解耦算法; 同步相量量测

Research on Regional Power Grid State Estimation Based on Fast-decoupled Algorithm

YANG Xuan¹, WANG Jianjun¹, TANG Jian¹, SHANG Jiayi¹,
ZHU Wenlan¹, LI Gan², GAN Hongjun³

(1. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310000, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China;
3. State Grid Panzhihua Power Supply Company, Sichuan Panzhihua 617000, China)

Abstract: With the development of the smart grids in recent years, a number of micro-grids and renewable energy have been generally integrated into the regional power grids. Consequently, a core function of dispatching system—the state estimation has met a problem of low computational efficiency. In order to increase the computational speed, this paper proposes a fast algorithm of distributed state estimation used to regional power grids. In this algorithm, the fast-decoupled and linear estimation are carried out at the lower and upper level, respectively, which can both improve the computational efficiency. The improvement of efficiency is validated by the case studies executed in the IEEE 118-bus system.

Key words: regional power grids; state estimation; distributed configuration; fast-decoupled algorithm; synchronous phasor measurements

0 引言

自从 1970 年出现之后,电力系统状态估计就成为每一处电网的能量管理系统(EMS)中必不可少的基础功能^[1-2]。状态估计模块可以从冗余的电网量测中计算估计出电网各节点(变电站)母线的电压幅值和相角。这些电压幅值和相角数据被广泛应用于电网运行中的稳定计算、潮流分析和安全评估等功

能之中,为电网安全稳定的运行起到了至关重要的作用^[3-4]。

随着中国经济的迅速发展,中国电网架构也得到了快速的发展。以杭州电网为例,杭州电网的变电容量在 2000 年首次突破 1 000 万 kVA。到了 2012 年,杭州电网的变电容量已经突破了 5 000 万 kVA,位居国网范围内全国省会城市第一。电网的快速膨胀为地区电网电力系统状态估计带来了许多困难,其中最直接的影响就是巨大的网架结构和大量的变电

站数量使得电网量测数据成倍地增加, 导致状态估计的速度越来越慢, 逐渐难以满足电网日常运行的需求^[5-6]。未来, 随着智能电网和特高压交直流电网的进一步推进, 智能量测(如同步相量量测等)的引入会进一步加剧现行状态估计计算速度低下的问题^[7-8]。

为解决状态估计的速度问题, 笔者曾提出了基于地区电网特点和同步相量量测的新型分布式状态估计算法(DSEU 算法)^[9]。该算法基于地区电网分层调控的特点, 构建了分布式状态估计的架构, 部分的缓解了状态估计功能计算速度低下的问题。但是, 该算法在下层中依然利用的是传统的最小二乘状态估计解法, 对整体算法的速度有巨大的限制。

针对这一问题, 文中提出了一种改进型的分布式状态估计算法—快速解耦分布式状态估计(fast decoupled distributed state estimation, FDDSE) 算法。该算法建立在实际电网调度架构基础上, 对大电网进行分层分区, 在下层中引入快速解耦状态估计算法, 实现非线性状态估计的速度优化。

在对大型电网的拆分中, 该算法采用的是与杭州地区电网调控层级相匹配的独立式分区分布式架构^[10-11], 将大型地区电网划分为数个小子系统(县调), 并在其上运行有上级调控系统(地调), 实现并行状态估计运算, 进一步优化全地区状态估计的计算效率^[12-14]。

除此之外, 该算法也吸收了 DSEU 算法中的优质量测, 即相量量测单元(PMU)量测^[15-16]。该量测利用 GPS 卫星系统的时钟基准, 实现了电压相角的绝对测量, 可以显著的提高状态估计的性能^[17-22]。

文中提出的 FDDSE 算法在之前发表的 DSEU 算法基础之上, 汲取分层分区的分布式构架和同步相量量测的长处, 引入了快速解耦状态估计算法的优点, 实现非线性状态估计的速度优化, 进一步提高了状态估计功能的计算效率。

最后, 文中还建立了 IEEE-118 节点系统的仿真平台, 对 FDDSE 算法、DSEU 算法及现行使用的最小二乘状态估计算法进行了估计精度和计算速度的对比, 验证了 FDDSE 算法在计算速度上的提升。

1 状态估计及 WLS 算法

在电网运行的日常工作中, 安装在变电站中的移动终端单元(RTU)向调度监控系统提供了大量冗余的量测。这些量测无法直接用于电网调度的诸多功能, 而需要经由状态估计转化为节点电压幅值和相角。

状态估计模型包含了量测模型和估计模型 2 个非线性模型, 即

$$z=h(x)+e; \quad (1)$$

$$z=h(\hat{x})+r。 \quad (2)$$

式(1)-(2)中: z 为 $m \times 1$ 阶的量测矢量; x 为 $n \times 1$ 阶的量测矢量 ($n < m$); \hat{x} 为 $n \times 1$ 阶的估计矢量; h 为 $m \times n$ 阶的量测方程; e 为 $m \times 1$ 阶的量测误差矢量; r 为 $m \times 1$ 阶的估计余量矢量。

电网现行使用的调度自动化系统中, 经典的最小二乘解法(WLS 算法)凭借其收敛性及实用性, 被广泛用于状态估计功能的计算。该算法的函数和其迭代解为

$$J(x)=[z-h(x)]^T \cdot R^{-1} \cdot [z-h(x)]; \quad (3)$$

$$G(x^k)=H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot H(x^k); \quad (4)$$

$$G(x^k) \cdot \Delta x^{k+1}=H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot [z-h(x^k)]。 \quad (5)$$

式(3)-(5)中: R 为 $m \times m$ 阶的方阵, 由量测误差矢量的方差组成; 上标 k 为迭代标识, 表示第 k 次迭代过程; H 为雅克比矩阵, 是量测方程 h 关于状态矢量 x 的一阶导数; G 为增益矩阵, 是目标函数 J 关于状态矢量 x 的二阶导数。

2 FDDSE 算法

FDDSE 算法完全符合电网公司现行的调控分层分区的结构, 将大型地区电网按电压等级分为两层(地调和县调), 并将下层电网按地域划分为多个小型子系统, 实现县域电网独立状态估计, 并最终实现地区范围内统一协调估计的过程。

2.1 FDDSE 算法基于城市电网特点的分区策略

FDDSE 算法的分布式构架基于现行电网调度分层分区的结构特点, 采用了独立式的分区策略, 即在小系统间的连接线划分, 并假设小系统之间的信息仅通过连接线实现交互, 以杭州电网为示例, 见图 1。这种分区策略保证了各子系统内状态估计的独立运行。

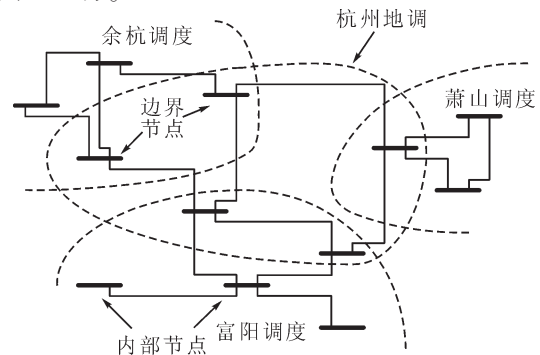


图 1 FDDSE 算法中采用的分解策略

Fig. 1 Decomposition strategy of FDDSE algorithm

图1中各个节点被分为内部节点和边界节点两类,其中子系统连接线两端的节点为边界节点,其余节点为内部节点。相对应的,量测也可被分为以下3类:①子系统内部节点相关的量测为内部量测;②边界节点上的电压量测为边界量测;③边界节点上连接线的潮流量测为连接量子量测。

在图1所示的各子系统中,通过县调内部的状态估计由内部量测和边界量测可以有效的估计内部节点的状态,因为这些节点的相关量测都已经输入到了县调的状态估计功能之中。但是对于边界节点,由于县调的状态估计无法包含连接量子量测,边界节点无法获得准确的状态估计,需要在地调层面进一步协调。

在FDDSE算法中,县调层中的状态估计通过快速解耦算法实现,地调层中的协调估计通过基于PMU量测的线性估计实现。

2.2 FDDSE算法的县调层

与DSEU算法不同,在FDDSE算法的县调层,快速解耦估计方法被用来实现小系统中的状态估计,可以有效的优化非线性估计的计算效率。基于RTU和PMU量测,快速解耦估计的量测模型可以表示为

$$z = \begin{bmatrix} z_a \\ \dots \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_a^{RTU} \\ z_a^{PMU} \\ \dots \\ z_r^{RTU} \\ z_r^{PMU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_a^{RTU}(x) + e_a^{RTU} \\ h_a^{PMU}(x) + e_a^{PMU} \\ \dots \\ h_r^{RTU}(x) + e_r^{RTU} \\ h_r^{PMU}(x) + e_r^{PMU} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中:下标 a, r 分别表示有功和无功估计的相关变量;上标 RTU, PMU 分别表示和 RTU 及 PMU 量测相关的变量;其余变量的含义参见式(1)。

该量测模型的求解过程可以分为有功和无功2个估计步骤交替执行。其中有功估计的过程计算的是电压相角的变化量,无功估计的过程求解的是电压幅值的变化量。有功和无功求解的公式见式(7)–(11),其中式(7)–(9)为有功估计解,式(10)–(12)为无功估计解。

$$G_a \Delta \theta = H_{aa}^T \begin{bmatrix} R_a^{RTU} & 0 \\ 0 & R_a^{RTU} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_a^{RTU} - h_a^{RTU}(x) \\ z_a^{PMU} - h_a^{PMU}(x) \end{bmatrix} = H_{aa}^T R_a [z_a - h_a(x)]; \quad (7)$$

$$H_{aa} = -v_0^2 \cdot \begin{bmatrix} B_a^{RTU} \\ B_a^{PMU} \end{bmatrix} = -v_0^2 \cdot B_a; \quad (8)$$

$$G_a = v_0^4 \left[\begin{bmatrix} -B_a^{RTU} \\ -B_a^{PMU} \end{bmatrix} \right]^T \begin{bmatrix} R_a^{RTU} & 0 \\ 0 & R_a^{RTU} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -B_a^{RTU} \\ -B_a^{PMU} \end{bmatrix} = v_0^4 \cdot [(-B_a)^T \cdot R_a^{-1} \cdot (-B_a)]; \quad (9)$$

$$G_r \Delta v = H_r^T \begin{bmatrix} R_r^{RTU} & 0 \\ 0 & R_r^{RTU} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_r^{RTU} - h_r^{RTU}(x) \\ z_r^{PMU} - h_r^{PMU}(x) \end{bmatrix} = H_r^T R_r \cdot [z_r - h_r(x)]; \quad (10)$$

$$H_r = -v_0 \cdot \begin{bmatrix} B_r^{RTU} \\ B_r^{PMU} \end{bmatrix} = -v_0 \cdot B_r; \quad (11)$$

$$G_r = v_0^2 \left[\begin{bmatrix} -B_r^{RTU} \\ -B_r^{PMU} \end{bmatrix} \right]^T \begin{bmatrix} R_r^{RTU} & 0 \\ 0 & R_r^{RTU} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -B_r^{RTU} \\ -B_r^{PMU} \end{bmatrix} = v_0^2 \cdot [(-B_r)^T \cdot R_r^{-1} \cdot (-B_r)]. \quad (12)$$

式(7)–(12)中: $\Delta \theta, \Delta v$ 分别为电压相角和幅值的迭代解;当二者都小于计算阈值后,停止迭代计算,此时的估计结果为快速解耦的最终解; H_{aa}, H_r 为快速解耦方法中有功和无功估计各自的雅克比系数矩阵; v_0 为参考电压; B_a, B_r 分别为系数矩阵,由系统参数确定。

通过上述式(7)–(12),县调可以独立利用快速解耦估计完成县域内电网的状态估计功能,求得各节点的估计解。这些估计结果将会传输到地调系统中,作为地调协调估计的虚量测,可以提高地调状态估计最终结果的精度。

2.3 FDDSE算法的地调层

在FDDSE算法的地调层,协调估计采取的是与DSEU算法同样的基于相量子量测的线性估计。该协调估计的量测为各子系统边界节点及相应连接线上的 PMU 量测(Z_p),以及各子系统中边界节点在县调层估计的结果(虚量测, Z_{psu})。

该协调估计的量测模型为

$$Z = \begin{bmatrix} Z_p \\ Z_{psu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_p \\ B_{psu} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} e_p \\ e_{psu} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)中: X 为边界节点的状态; B 为量测转换矩阵; R_p 和 R_{psu} 分别为量测误差矩阵和量测装置的精度有关。

上述协调估计量测模型的线性解为

$$X = \left(\begin{bmatrix} B_p \\ B_{psu} \end{bmatrix} \right)^T \cdot \begin{bmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_{psu} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} B_p \\ B_{psu} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} B_p \\ B_{psu} \end{bmatrix} \right)^T \cdot \begin{bmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_{psu} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z_p \\ Z_{psu} \end{bmatrix} \quad (14)$$

通过式(14),地区调度可以对各县域边界节点的状态进行基于连接线潮流的线性协调估计。这种线性估计的求解过程不需要进行迭代运算,大大的减轻了运算负担,极大的提高了计算效率。

由于式(14)中的量测量为相量子形式,其求解的状态结果也是以相量子形式表示,这些结果可以对应的拆分为相量的模和角度,对应各边界节点的电压幅值和相角。

2.4 FDDSE 算法的内容和功能

文中 2.3 节介绍了 FDDSE 算法结构、下层以及上层算法。FDDSE 算法利用现行调度系统架构特性,将地区电网按县域划分为不同的子系统。各县调应用快速解耦估计的方法求解其系统中的内部节点状态,并将计算结果传输到地调,经上层的线性协调估计得到全地区最终的状态估计结果。

FDDSE 算法的具体的实施步骤如下:

1)按照地理位置,基于图 1 所示的分布式架构将地区电网划分为多个子系统,即区县电网;

2)县调利用式(7)-(12)的快速解耦估计方法计算各自子系统内部的节点状态,并将边界节点的估计状态传输到地调系统;

3)地调利用(14)完成地区电网所有边界节点的协调估计;

4)2)中各子系统的内部节点估计结果和 3)中边界节点的协调结果作为 FDDSE 算法的最终解,传输到 EMS 系统中,为其他应用所使用。

以杭州电网为例,FDDSE 算法的功能框图见图 2。

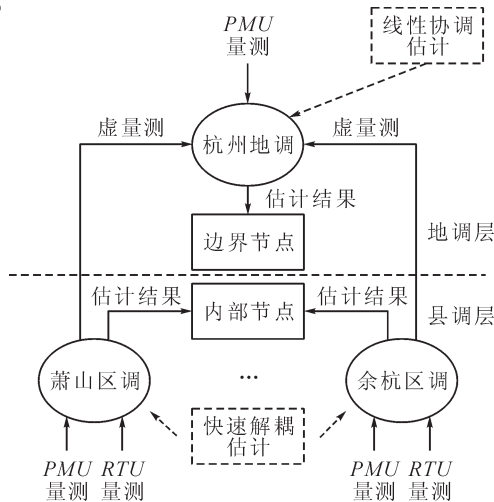


图 2 FDDSE 算法功能框图

Fig. 2 Functional diagram of FDDSE algorithm

FDDSE 算法的最大特点就是极大地提高了计算速度,解决了加入 PMU 量测后状态估计计算速度低下的实际电网运行问题。FDDSE 的速度提升从 3 个方面实现:①FDDSE 算法采用分布式构架,实现了大电网的拆分,减少的估计负担;②利用快速解耦方法实现了县调层面状态估计速度的优化;③利用基于相量量测的线性协调方法实现了地调层面状态估计的速度优化。

3 算例仿真

该算例通过 IEEE-118 节点系统的仿真,将

FDDSE 算法与之前已发表的 DSEU 算法及电网公司现行使用的最小二乘算法进行对比,以此评估 FDDSE 算法的计算精度和速度。

3.1 算例描述

文中采用 IEEE-118 节点系统进行仿真,共设计了 3 个不同算例比较,这 3 个算例为:

1)算例 1,基于 RTU 量测的 WLS 集中式状态估计算法;

2)算例 2,基于 RTU 和 PMU 量测的 DSEU 分布式状态估计算法;

3)算例 3,基于 RTU 和 PMU 量测的 FDDSE 分布式状态估计算法。

其中,RTU 提供的量测量为节点的电压幅值和支路上的始端和末端潮流,量测误差为 0.1%;PMU 提供的量测量为电压和电流的相量测量,量测误差为 0.025%。所有量测误差以添加白高斯噪声的形式来模拟,所有算例的计算速度和精度为执行 1 000 次后平均性能。此外,为了模拟 PMU 被安装在枢纽变电站的实际情况,PMU 仅被安装在仿真系统中的节点为 15,17,19,23,38,49,59,64,69,80,82,100。

对于算例 2 和算例 3 的分布式状态估计算法,IEEE-118 系统被划分为 4 个小的子系统,对应 4 个不同的县调。子系统的划分较为平均,每个子系统中约含有 30 个左右节点。

算例 3(FDDSE 算法)中各子系统状态估计中有功和无功估计过程的量测信息见表 1。统计后发现,算例 3 的总和量测信息与算例 2 相同。这是因为 2 个算例采取了相同的分布式构架和算法结构。算例 1 采用的是集中式状态估计算法,且仅考虑了 RTU 量测。3 个算例的量测信息对比见表 2。

表 1 算例 3 的量测信息

Table 1 Measurement information of case 3

系统	有功估计			无功估计			总和		
	状态	量测	冗余	状态	量测	冗余	状态	量测	冗余
县调 1	29	87	3.00	29	114	3.93	58	201	3.47
县调 2	30	109	3.63	30	135	4.50	60	244	4.07
县调 3	30	98	3.27	30	124	4.13	60	222	3.70
县调 4	29	96	3.31	29	123	4.24	58	219	3.78
地调	—	—	—	—	—	—	29	49	1.69

表 2 总和量测信息对比

Table 2 Overall measurement information comparison

信息	算例 1	算例 2	算例 3
状态	234	265	265
量测	861	935	935
冗余	3.68	3.53	3.53

3.2 算法精度比较

电网公司调度自动化系统采用算例1中的算法实现状态估计功能。将算例1与算例3(FDDSE算法)的估计误差进行对比,则可以验证FDDSE算法的估计精度,结果见图3。图3中电压幅值的估计误差为相对值,以百分比表示;电压相角的估计误差为绝对值,以角度(°)表示。

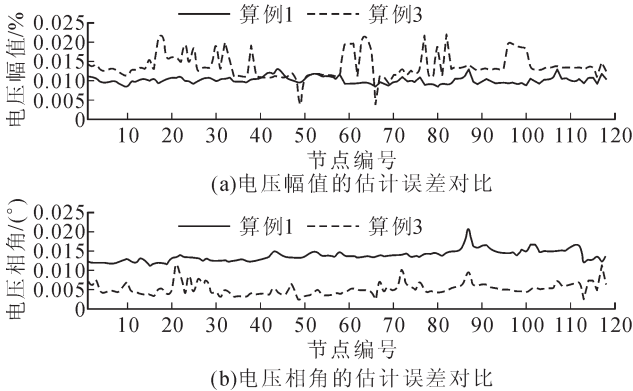


图3 算例1和算例3的估计精度比较

Fig. 3 Comparison of estimation quality between case 1 & case 3

由图3可以看出,FDDSE算法对比电网公司现在使用的WLS算法在电压幅值的估计精度上略差(见图3(a))。这主要是因为FDDSE算法的量测冗余度小于WLS算法(见表2)。另一方面,FDDSE算法在电压相角的估计精度上有明显提高(见图3(b))。这主要是因为FDDSE算法利用PMU提供的相角量测完成状态估计计算。

为了更好地评估FDDSE算法的估计精度,该仿真引入了平均估计精度的公式,即求取系统所有节点估计误差的平均值,见式(15)、(16)。

$$E_V = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_i^{Est} - V_i^{Tru}}{V_i^{Tru}} \right|; \quad (15)$$

$$E_A = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |\theta_i^{Est} - \theta_i^{Tru}|。 \quad (16)$$

式(14)–(15)中:上标Est和Tru分别表示估计值和真值;V和θ分别表示电压幅值和相角。类同于各个节点的误差精度计算,算例电压幅值的平均估计精度为相对值,以百分比表示;电压相角的平均估计精度为绝对值,以角度表示。

仿真中各算例电压幅值和相角的平均估计精度见图4。

由图4可知,FDDSE算法具有较差的电压幅值估计精度和较好的电压相角估计精度。需要说明的是在实际电网运行中,这样的电压幅值精度差可以忽略不计。此外,FDDSE算法(算例3)和DSEU算法(算例

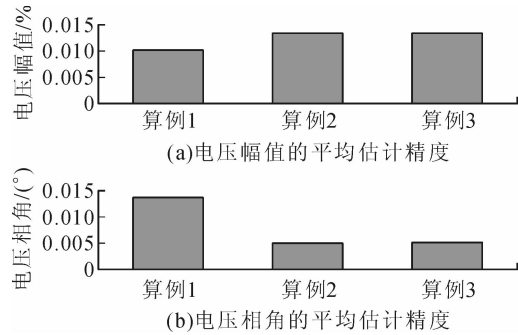


图4 各算例的平均估计精度比较

Fig. 4 Comparison of average estimation quality of cases

2)具有很接近的量测精度,这主要是由于2个算法的分布式架构和算法冗余度(见表2)类同的缘故。

综上,文中提出的FDDSE算法具有令人满意的状态估计精度。

3.3 算法速度比较

文中所有仿真都执行于一台CPU为Intel Core 2 Quad Q9550,主机频率为2.83 GHz的台式机。每个算例的CPU时间被用于比较各算法的计算速度,时间单位为μs,见表3。

表3 计算速度对比

时间	Table 3 Comparison of computational speed		
	集中式状态估计	分布式状态估计	
	算例1	算例2	算例3
绝对时间/μs	65.563	2.819	2.081
相对时间/%	100.00	4.30	3.17

从表3可知,算例3所用的CPU时间最少,即FDDSE算法具有最快的计算速度,这是因为FDDSE算法不仅在上层采用了线性协调估计算法,而且在下层采用了快速耦合估计算法。为了证明快速耦合估计的速度优势,算例2与算例3的县调层计算时间进行对比,假设算例2县调层计算时间为标准值,对比结果见图5。

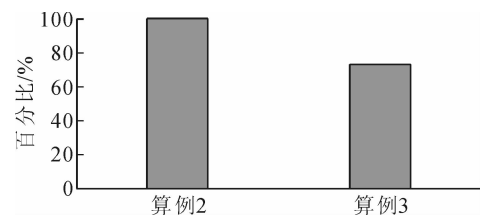


图5 算例2和算例3的县调层计算速度对比

Fig. 5 Comparison of speed at the subsystem level between case 2 & case 3

图5中对比结果显示,算例3在县调层所耗费的时间比算例2减少约30%,这也证明了FDDSE算法比DSEU具有更佳的计算速度。

4 结论

1)文中提出了一种新型的基于 PMU 量测的分布式状态估计算法—FDDSE 算法。该算法建立在杭州电网调度现行架构体系之上, 利用分布式并行计算、快速耦合估计及线性协调估计 3 个特性, 极大地提高了算法的速度, 解决了未来智能电网中状态估计功能缓慢的问题。同时, FDDSE 算法的分布式结构非常适合未来的智能电网中的微网理念, 特别是当新能源大量接入后的分布式运行、分布式控制微网。

2)在 IEEE-118 系统的基础上搭建了仿真平台, 采用 FDDSE 算法与笔者之前发表的 DSEU 算法和调度自动化系统中现行的 WLS 算法的估计精度和计算速度进行了对比, 其仿真结果显示 FDDSE 算法具有令人满意的估计精度和最好的计算速度。

3)需要说明的是, 文中的仿真并没有考虑各系统间(子系统与子系统, 子系统与协调系统)的信号传输时间, 这一点会在未来的工作中改进。

参考文献:

- [1] SCHWEPPE F C, WILDES J. Power system static state estimation, part I: exact model [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, PAS-89(1): 120-125.
- [2] ABUR A, EXPOSITO A G. Power system state estimation theory and implementation[M]. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [3] 丁君策, 蔡泽祥, 王克英. 基于广域测量系统的状态估计研究综述[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 98-103.
DING Junce, CAI Zexiang, WANG Keying. An overview of state estimation based on wide-area measurement system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 98-103.
- [4] 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. Substation-dispatch center two-level distributed state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 44-50.
- [5] 汪隆君, 李 博, 王 刚, 等. 计及电网变化过程地区电网运行风险评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 18-28.
WANG Longjun, LI Bo, WANG Gang, et al. Operational risk assessment of regional power grid considering developing process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 18-28.
- [6] 杜 刚, 孟勇亮, 彭 晖, 等. 地区电网智能调度控制系统实践与展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 200-205.
DU Gang, MENG Yongliang, PENG Hui, et al. Practice and prospects of dispatching and control systems in regional power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 200-205.
- [7] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
LIU Zhenya. Ultra high voltage grid[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2005.
- [8] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
LIU Zhenya. Smart grid technology[M]. Beijing: Chinese Electric Power Press, 2010.
- [9] 杨 翺, 楼华辉, 卢瀚顺, 等. 基于 PMU 量测的城市电力系统分布式状态估计算法[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 170-175.
YANG Xuan, LOU Huahui, LU Hanshun, et al. Novel distributed state estimation algorithm in urban power grid based on PMU measurements[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 170-175.
- [10] 孔 涛, 程浩忠, 王建民, 等. 城市电网网架结构与分区方式的两层多目标联合规划[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 59-66.
KONG Tao, CHENG Haozhong, WANG Jianmin, et al. United urban power grid planning for network structure and partition scheme based on bi-level multi-objective optimization with genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 59-66.
- [11] 江 木, 吴文传, 张伯明, 等. 省级电网分层分区有功实时调度模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 10-13.
JIANG Mu, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A multi-area coordinated power dispatch method for provincial power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 10-13.
- [12] LIN S Y, YIN C H. An implementable distributed state estimator and distributed bad data processing schemes for electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1277-1284.
- [13] EBRAHIMIAN R, BALDICK R. State estimation distributed processing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1240-1246.
- [14] LIN S Y. A distributed state estimator for electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(2): 551-557.
- [15] PHADKE A G, THORP J S, KARIMI K J. State estimation with phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(1): 233-238.
- [16] PHADKE A G. Synchronized phasor measurements in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 6(2): 10-15.
- [17] CONEJO A J, TORRE S, CANAS M. An optimization approach to multiarea state estimation[J]. IEEE Transactions

- RADAN series of compact pulsed power generators and their applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(7): 1166-117.
- [6] GUBANOV V P, KOROVIN S D, STEPCHENKO A S. High voltage nanosecond generator with repetition frequency of up to 1 kHz[J]. Prib. Tekh. Eksp., 1997(1): 95-98.
- [7] SARKAR P, BRAIDWOOD S W. A compact battery-powered 500 kV pulse generator for UWB radiation[C]//15th IEEE International Pulsed Power Conference[S.l.]:IEEE, 2005:1306-1309.
- [8] ANDREEV Y A, BUYANOV Y I. High-power ultra-wide-band electromagnetic radiation generator[C]//11th IEEE Pulsed Conference[S.l.]:IEEE, 1997:730-735.
- [9] De QUEIROZ A C. Designing a tesla magnifier[C]//2000 IEEE ISCAS. Geneva, Switzerland:IEEE, 2000:413-416.
- [10] JOHN R R. Designing triple resonance Tesla transformers of arbitrary modal frequency ratio[J]. Rev. Sci. Instrum, 2006, 77(3):033301.
- [11] BIENIOSEK F M. Triple resonance pulse transformer circuit[J]. Rev. Sci. Instrum, 1990, 61(6):1717-1719.
- [12] NAM S H, PARK S S, HEO H, et al. Design of a high voltage resonance pulser[C]//16th IEEE International Pulsed Power Conference. [S.l.]:IEEE, 2007:1327-1331.
- [13] 李名加, 许州, 金晓, 三谐振高压脉冲变压器理论分析与模拟[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(11):1923-1927. LI Mingjia, XU Zhou, JIN Xiao. Theoretic analysis and simulation of triple resonance pulse transformer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(11):1923-1927.
- [14] 梁川, 王文川, 周林, 等. 650 kV/2 ns 高压脉冲发生器研制[J]. 强激光与粒子束, 2014, 20(12):20102. LIANG Chuan, WANG Wenchuan, ZHOU Lin, et al. Development of 650 kV/2 ns high voltage pulse generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 20(12):20102.
- [15] 李名加, 许州, 辛佳琪, 等. 三谐振脉冲变压器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 20(3):697-702. LI Mingjia, XU Zhou, XIN Jiaqi, et al. Triple resonance pulse transformer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 20(3):697-702.

张兴家(1989—), 男, 硕士研究生, 从事超宽谱高功率微波技术方面研究。

(上接第 107 页)

- on Power Systems, 2007, 22(1):213-221.
- [18] PHADKE A G, THORP J S. Synchronized phasor measurements and their applications[M]. New York:Springer, 2008.
- [19] ZHAO L, ABUR A. Multiarea state estimation using synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2):611-617.
- [20] 李强, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于相量量测的电力系统线性状态估计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18):24-28. LI Qiang, ZHOU Jingyang, YU Erkeng, et al. Power system linear state estimation based on phasor measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 24-28.
- [21] 刘道伟, 谢晓荣, 穆钢, 等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1):13-17. LIU Daowei, XIE Xiaorong, MU Gang, et al. An on-line voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1):13-17.
- [22] 马平川, 沈沉, 陈颖, 等. 基于伪量测型协调变量的分布式状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3170-3177. MA Chuanping, SHEN Chen, CHEN Ying, et al. Distributed state estimation based on the pseudo-measurement coordination variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3170-3177.

杨翔(1987—), 男, 工程师, 主要从事电力系统调度监控工作, 研究领域包括电力系统状态评估等。