

基于PMU量测的城市电力系统分布式状态估计算法

杨 翾, 楼华辉, 卢瀚顺, 李 祥, 倪涌炯, 曹俊华

(国网杭州供电公司, 杭州 310000)

摘要: 针对未来微网和新能源大量接入城市电网后, 电力系统状态估计功能的计算数据量过大, 计算速度缓慢的问题, 文中提出了一种适用于城市电力系统的基于相量量测装置(PMU)量测的分布式状态估计算法。该算法将城区电网分层分区, 将PMU的同步相量量测引入县调层和地调层的分布式状态估计中, 不仅在县调层实现并行计算, 而且在地调层满足线性状态估计条件, 最终达到提高状态估计速度的目标。文中利用IEEE 118节点系统对新算法进行了测试, 仿真结果验证了新算法有效提升了状态估计的速度。

关键词: 城市电网; 电力系统状态估计; 分布式状态估计; PMU量测

Novel Distributed State Estimation Algorithm in Urban Power Grid Based on PMU Measurements

YANG Xuan, LOU Huahui, LU Hanshun, LI Xiang, NI Yongjiong, CAO Junhua

(State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310000, China)

Abstract: When the micro-grids and renewable energy are generally integrated into the urban power grid, the computational burden of state estimator will be much increased and the speed will be too slow. This paper propose a novel distributed state estimation algorithm based on PMU measurements and the characteristics of urban power grid. Through the algorithm, the power grid is divided into different levels and multi-areas. At the subsystem level, the local estimation can be executed in a parallel way, and the linear estimation can be carried out at the coordinated level. Finally, the novel algorithm can sharply improve the computational efficiency. Case studies in the IEEE 118-bus system can validate the quality and efficiency of the proposed algorithm.

Key words: urban power grid; state estimation; distributed state estimation; PMU measurements

0 引言

电力系统状态估计功能于 1970 年出现之后就成为能量管理系统(EMS)中的一项核心功能^[1]。在现行电网调控中心的日常工作中, 状态估计的结果对电网运行的稳定和安全都起着至关重要的作用^[2-3]。最近十年, 杭州城区电网快速膨胀, 电网规模增加了不止一倍, 变电容量位居国网范围内全国省会城市第一。飞速扩大的电网规模带来了巨大的量测数据, 使得状态估计运算的速度越来越慢。尤其是未来的智能电网中, 大量智能设备的引入会使得这个问题愈发严重^[4-6]。

针对这个问题, 文中基于城市电网特点^[7-8]和同

步相量量测^[9-10]提出了一种新型的分布式状态估计算法(distributed state estimation in urban power grid, DSEU)。

该算法的提出首先考虑了城区电网分区分层调控的特点。杭州城区电网现行的调控体系是省调、地调、县调(配调)多级融合调控的, 这种调控体系将电网分区分层, 划分不同的调控范围, 非常符合分布式状态估计的实施条件。分布式状态估计是状态估计领域里重要的一个方向^[11], 按照不同的分布式架构可以分为覆盖式分区^[12-13]和独立式分区^[14-15]两大类。该算法采用的是独立式分区的分布式架构, 将一个大型的城市电网拆分为小的子系统, 并对每个小的子系统独立的进行状态估计。

文中算法的另一个主要特点是考虑了相量量测装置(PMU)的量测信号。PMU 量测装置可以提供

基于 GPS 卫星系统的同步相量量测, 这种量测已经被大量的用于电力系统的研究之中^[16-17]。在分布式状态估计的领域里, 也有很多学者考虑了同步相量量测去优化算法性能^[18-19]。

文中提出的 DSEU 算法正是建立在这些研究成果之上, 结合了杭州电网调控体系和 PMU 装置量测的优点, 解决了状态估计算法计算速度低下的问题。文中利用 IEEE 118 节点系统进行仿真, 将 DSEU 算法与调控中心现行使用的最小二乘状态估计算法^[1]及另一种分布式状态估计算法^[20]进行对比, 验证了 DSEU 算法在计算速度上的优越特性。

1 状态估计

电力系统状态估计计算的结果是电网中各节点的电压幅值和相角, 这些结果在调控中心可以被用于电网的监控、调度、安全分析等领域。

状态估计的目标是利用电网中移动终端单元(RTU)获取的冗余的量测量确定节点状态。经典状态估计中有两个基本的非线性模型, 即量测模型和估计模型:

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

$$z=h(\hat{x})+r. \quad (2)$$

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。

现在电网公司调度系统中使用的状态估计算法正是建立与上式的模型中, 利用经典的最小二乘解法(WLS 算法)^[1], 实现状态估计功能。最小二乘解法的目标函数和其迭代解为:

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

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

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

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 DSEU 算法

DSEU 算法同时考虑了 RTU 和 PMU 量测, 该算法利用城市电网调度的特点, 将大型电网分区分级, 分为下层的子系统层和上层的协调层。在子系统层中, 大电网被分为了数个小型子系统, 其中每

个小的子系统都独立运行 WLS 算法完成状态估计。在协调层中, 基于 PMU 量测的线性估计可以对子系统层的结果进行协调。

2.1 DSEU 算法基于城市电网特点的分区策略

在分布式状态估计中, 分区策略决定了大电网被如何分区为小系统。根据杭州电网现行调度工作的特点, DSEU 算法采用的是独立式分区策略, 即小系统之间的信息交互仅仅通过连接线实现, 见图 1。这个特点符合实际工作中杭州地调、县调、配调分工明确的调度体系。

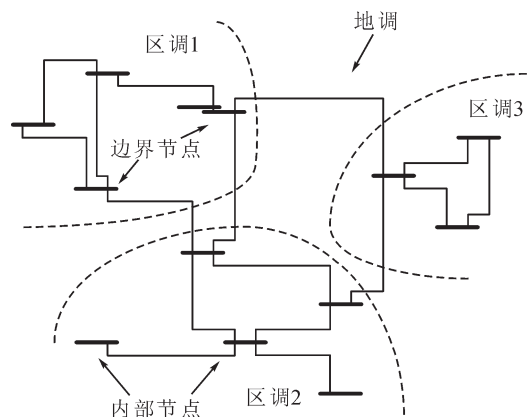


图 1 DSEU 算法中采用的分解策略

Fig. 1 Decomposition strategy of DSEU algorithm

在这个分区策略中, 每一个子系统可以被视为独立系统, 就像萧山、余杭、富阳等区县电网, 状态估计功能可以独立实现。

由图 1 可知, 系统节点可以被分为两类: 内部节点和边界节点。内部节点为不在系统连接线上的节点; 边界节点为在系统连接线上的节点。

相应地, 量测也分为 3 类: 内部量测(上标为 i)、边界量测(上标为 b)和连接线量测(上标为 t)。内部量测为内部节点和内部线路相关的量测; 边界量测为边界节点上的电压量测; 连接线量测为连接线上的潮流量测。

从这种分区策略可以得到, 内部节点可以通过每个区域内部的状态估计准确计算, 因为其相关的量测都已经涵盖在县调的范畴内。但是, 起交换功能的边界节点需要在地调内协调, 因为区域电网中并没有考虑连接线上的潮流量测。

在 DSEU 算法中, 地调层面的状态估计可以通过线性估计的方法来计算。这种计算方法可以很大的提高计算效率, 但是这种方法要求所有量测量或计算量为相量形式, PMU 量测好符合了这一要求。

2.2 DSEU 算法的县调层

在 DSEU 的县调层中, 各县调依然执行的是 WLS 算法进行区域电网的状态估计。调控中心现行

的状态估计功能只考虑的 RTU 的量测,该算法将量测扩展到了 RTU 何 PMU,需要对现行的 WLS 算法进行扩展。各县调的量测模型为

$$\begin{bmatrix} z_R \\ z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_R(x) \\ h_P(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_R \\ e_P \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中: z_R 表示 RTU 量测; z_P 表示 PMU 量测; h_R 和 h_P 分别为 RTU 和 PMU 量测的量测方程; e_R 和 e_P 分别为 RTU 和 PMU 量测的量测误差,这些误差量的标准差可以构建 R_R 和 R_P 两个方阵,表示 RTU 和 PMU 量测的精度。

上述的量测模型的最小二乘解为

$$\begin{bmatrix} H_R \\ H_P \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} R_R & 0 \\ 0 & R_P \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} H_R \\ H_P \end{bmatrix} \cdot \Delta x = \begin{bmatrix} H_R \\ H_P \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} R_R & 0 \\ 0 & R_P \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} z_R - h_R(x) \\ z_P - h_P(x) \end{bmatrix} \quad (7)$$

每个县域内的电网可以利用式(7),独立地进行内部的状态估计。边界传输变电站的状态需要的地调层面进行行基于连接线潮流的协调估计。由于在地调层的状态估计中,仅仅这些联络线会造成量测冗余度偏低,状态估计的精度无法保证,所以县调状态估计计算的结果会在传输给地调,作为状态估计的虚量测,增加地调状态估计的精度。

2.3 DSEU 算法的地调层

在 DSEU 算法的地调层中,状态估计的状态量、量测量都需要以相量的形式表示。在这个状态估计中,量测量为边界节点和连接线上的 PMU 量测,这些量从 PMU 中获取时就是相量形式,用 Z_P 表示,包含了边界节点的电压相量量测和连接线上的潮流量测。

县调中状态估计的结果为各节点的电压幅值和相角,传输到地调调控中心后,可以组合成相应的相量形式的虚量测,用 $Z_{P_{su}}$ 表示。

最终,DSEU 算法中地调层的量测模型为

$$Z = \begin{bmatrix} Z_P \\ Z_{P_{su}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_P \\ B_{P_{su}} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} e_P \\ e_{P_{su}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中: X 为边界节点的状态; B 为量测转换矩阵。和县调中状态估计的量测类似,低调层的量测也可以基于量测的误差,组成两个误差方差矩阵, R_P 和 $R_{P_{su}}$,这两个矩阵中的参数仅和量测装置的精度有关。

式(8)中的量测模型为线性量测模型,可以得到线性解

$$X = \left(\begin{bmatrix} B_P \\ B_{P_{su}} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} R_P & 0 \\ 0 & R_{P_{su}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} B_P \\ B_{P_{su}} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} B_P \\ B_{P_{su}} \end{bmatrix}^T \cdot$$

$$\begin{bmatrix} R_P & 0 \\ 0 & R_{P_{su}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z_P \\ Z_{P_{su}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

地调的状态估计功能可以通过式(9)进行,由于这个计算为线性计算,求解的过程不需要进行迭代,比县调中的非线性迭代计算具有更好的计算速度。需要说明的是,该计算结果为相量形式,可以拆分为幅值和角度,对应边界节点的电压幅值和电压相角。

2.4 DSEU 算法的内容和功能

综上所述,DSEU 算法的具体内容为通过分布式架构将城市大电网拆分为不同的子系统,在子系统中独立实施非线性状态估计计算,并将其计算结果传输到地调的协调中心,经过上层的协调计算产生最终的状态估计结果。其中,县调计算的结果为县域电网的内部节点状态,地调计算的结果为县域电网边界节点的电压状态。DSEU 算法的功能图见图 2。

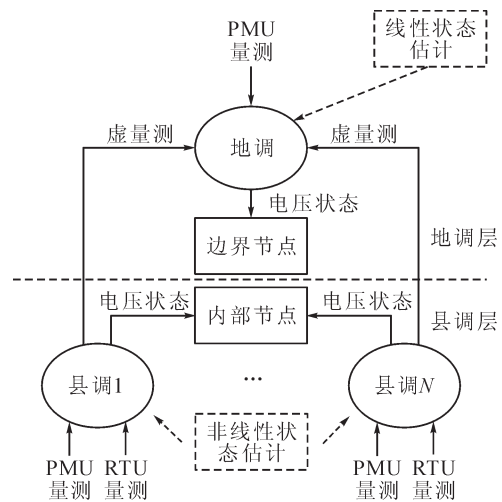


图 2 DSEU 算法功能框图

Fig. 2 Functional diagram of DSEU algorithm

DSEU 算法的具体的实施步骤为:

- 1) 利用图 1 的分布式架构将大电网拆分为数个子系统;
- 2) 在每个子系统利用式(7)进行独立的非线性状态估计并将边界节点的计算结果传输至上层协调中心,将内部节点的计算结果传输至 EMS 系统;
- 3) 在上层协调中心利用式(9)进行线性估计协调边界节点的状态,并将最终结果传输至 EMS 系统;
- 4) 2) 中内部节点的计算结果和 3) 中边界节点的计算结果作为 DSEU 算法最终的计算结果,并被 EMS 系统中其他应用使用。

DSEU 算法的提出是为了解决同时考虑 RTU 和 PMU 量测后的状态估计计算速度不满足实际要求的问题。为了实现更好的计算效率,该算法采用

分布式架构,县调和地调配合并行状态估计的计算方式,减少了每个调控中心的计算量。此外,该算法在地调层面满足了线性估计的严格要求,利用线性状态估计计算,进一步减少了计算时间。

3 算例仿真

该算例仿真将 DSEU 算法和现在调控系统使用的集中式状态估计算法和经典的原有的分布式状态估计算法进行计算精度和计算速度两方面的比较。

3.1 算例描述

文中的仿真平台采用的是 IEEE 118 节点系统,共搭建了 4 个不同的算例进行比较:

1)算例 1,基于 RTU 量测的现行使用的 WLS 状态估计;

2)算例 2,基于 RTU 和 PMU 量测的现行使用的 WLS 状态估计;

3)算例 3,基于 RTU 和 PMU 量测的经典分布式状态估计算法^[13];

4)算例 4,基于 RTU 和 PMU 量测的 DSEU 状态估计。

在仿真的过程中,对于不同的量测装置是这样假设的: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,PMU 提供的量测量为电压和电流的相量测量。在文中的算例仿真中,RTU 的量测误差为 0.1%,PMU 的量测误差为 0.025%,所有的量测都加入了白高斯噪音来模拟实际电网中量测的误差。下述所有的算例结果都是进行了 1 000 次后,求取的平均性能。

在文中的算例中,IEEE 118 节点系统被划分为 4 个县调,每个县调范围电网的节点数都为 30 个左右。为了满足 DSEU 算法的执行条件,PMU 被安装在节点 15、17、19、23、38、49、59、64、69、80、82、100。

表 1 列出了算例 3 和算例 4 中各县调和地调状态估计的量测信息,并根据这些信息得出了 4 个算例的总合量测信息,见表 2。

表 1 算例 3 和算例 4 的量测信息

Table 1 Measurement information of case 3 & case 4

系统	算例 3			算例 4		
	状态	量测	冗余	状态	量测	冗余
县调 1	58	201	3.46	58	201	3.46
县调 2	60	244	4.07	60	244	4.07
县调 3	60	222	3.70	60	222	3.70
县调 4	58	219	3.78	58	219	3.78
地调	58	178	3.07	29	49	1.69

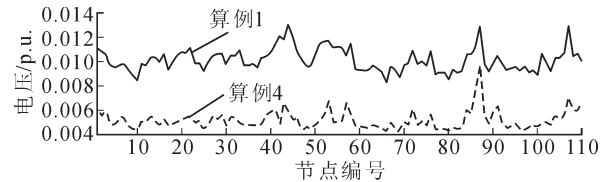
表 2 总和量测信息

Table 2 Overall measurement information of cases

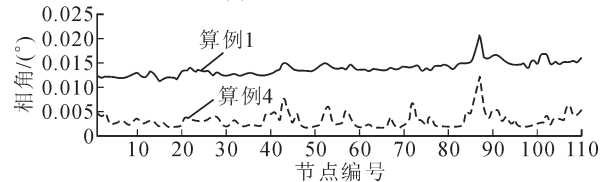
信息	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
状态	234	236	294	265
量测	861	1 006	1 064	935
冗余	3.68	4.26	3.62	3.53

3.2 算法精度比较

该仿真首先将 DSEU 算法和电网公司调度系统现行状态估计算法(算例 1)的计算精度进行比较,得到结果见图 3。其中,估计误差为估计值和真值的偏差。



(a) 电压幅值的估计误差



(b) 电压相角的估计误差

图 3 算例 1 和算例 4 的估计精度比较

Fig. 3 Comparison of estimation quality between case 1 & case 4

由图 3 可以看出,对比电力公司调度系统中现行运用的状态估计算法,DSEU 算法在电压幅值和电压相角的估计结果的精度上都有明显的提高,主要是因为 DSEU 利用了更精确的 PMU 量测进行状态估计。

除了每个节点的估计偏差,该仿真同时引入了平均估计精度的概念,即全部节点的估计误差的平均值。由于电压幅值和电压相角估计的不同,两者的平均估计精度分别定义为 E_V 和 E_A ,其中 E_V 是一个相对误差, E_A 是一个绝对误差。

$$E_V = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_i^{\text{Est}} - V_i^{\text{Tru}}}{V_i^{\text{Tru}}} \right|; \quad (10)$$

$$E_A = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |\theta_i^{\text{Est}} - \theta_i^{\text{Tru}}|. \quad (11)$$

4 个算例的平均估计精度对比结果见图 4。

由图 4 可知,DSEU 算法(算例 4)具有很好的量测精度。需要说明的是,虽然和算例 2 相比,DSEU 算法的精度略差,但是在实际电网运行中,这样的精度差可以忽略不计。这个差距是因为算例 4 的量测冗余度小于算例 2 中的量测冗余度,见表 3。

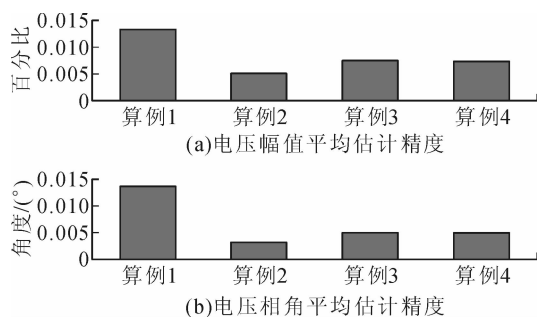


图4 各算例的平均估计精度比较

Fig. 4 Comparison of average estimation quality of cases

表3 计算速度对比

Table 3 Comparison of computational speed

时间	集中式状态估计		分布式状态估计	
	算例1	算例2	算例3	算例4
绝对时间/ μ s	65.563	113.923	5.233	2.819
相对时间/%	100.00	173.80	7.98	4.30

综上所述,相比于现行调度中的状态估计算法和经典的分布式状态估计算法,文中提出的DSEU算法具有令人满意的状态估计精度。

3.3 算法速度比较

在另一方面,相比于其他算法,DSEU算法在计算速度上有非常大的提高。所有仿真都在一台CPU为Intel Core 2 Quad Q9550,主机频率为2.83 GHz的台式机完成。测试记录了每个算例运行的CPU时间,用于比较计算速度,对比结果见表3。

从表3可以看出,算例4计算时间最少,说明DSEU算法具有最快的计算速度。同时,对比算例3和算例4,也可以验证DSEU算法在地调层中的线性估计的计算效率优势。图5为算例3和算例4在地调层中的计算时间对比。

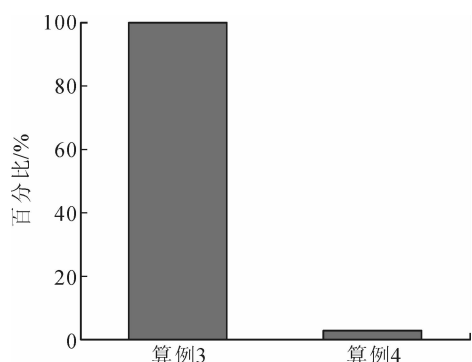


图5 算例3和算例4的地调层计算速度对比

Fig. 5 Comparison of speed at the coordinated level between case 3 & case 4

4 结语

文中基于现行的杭州电网的地调和县调、配调

的分层调度体系,提出了一种利用PMU量测的城市电力系统分布式状态估计算法。这种算法可以解决未来智能电网中,状态估计在同时考虑RTU和PMU量测后,速度无法满足实际工作要求的问题。同时,这种算法非常适合未来智能电网中微网大量存在和新能源广泛接入的分布式运行、分布式控制理念。

基于IEEE 118节点系统的仿真,对DSEU算法的性能做出了验证。结果显示,相比于电力公司调度系统现行的状态估计算法和经典的分布式状态估计算法,DSEU算法具有可以接受的估计精度和非常好的计算速度。

由于硬件上的限制,文中在仿真中没有考虑子系统层和协调层的信号传输时间,这一时间会在将来的工作中进一步分析。

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] 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.
- [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. Substation-dispatch center two-level distributed state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 44-50.
- [4] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [5] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [6] 李宁,田冬梅,单大鹏,等. 城市变电站噪声分析及降噪措施探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 139-144.
LI Ning, TIAN Dongmei, SHAN Dapeng, et al. Analysis and discussion on the noise arisen from substation in city[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 139-144.
- [7] 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.
- [8] 张文亮,周孝信,白晓民,等. 城市电网应对突发事件保障供电安全的对策研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 1-7.
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, BAI Xiaomin, et al.

- Countermeasures against sudden events to ensure the security of urban power supply systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 1-7.
- [9] 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.
- [10] PHADKE A G. Synchronized phasor measurements in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 6(2): 10-15.
- [11] ABUR A, EXPOSITO A G. Power system state estimation-theory and implementation[M]. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [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] CONEJO A J, TORRE S, CANAS M. An optimization approach to multiarea state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 213-221.
- [16] PHADKE A G, THORP J S. Synchronized phasor measurements and their applications[M]. New York: Springer, 2008.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] ZHAO L, ABUR A. Multiarea state estimation using synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 611-617.
- [20] ZHAO L, ABUR A. Multiarea state estimation using synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 611-617.

杨 翀(1987—), 男, 工程师, 主要从事电力系统调度控制工作, 研究领域包括电力系统状态估计等。

(上接第 169 页)

- 充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2972-2977.
- WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2972-2977.
- [13] 崔 强, 王秀丽, 刘祖永. 市场环境计及储能电站运行的联动电价研究及其效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 62-68.
- CUI Qiang, WANG Xiuli, LIU Zuyong. Study on linkage electricity price and benefit analysis considering energy storage station operation in market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 62-68.
- [14] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120.
- BIE Chaohong, HU Guowei, XIE Haipeng, et al. Optimal dispatch for wind power integrated systems considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120.
- [15] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [16] 曹一家, 苗轶群, 江全元. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 1-6.
- CAO Yijia, MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 1-6.
- [17] 曾 勇. 基于智能电网的实时电价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [18] 邱晓燕, 夏莉丽, 李兴源. 智能电网建设中分布式电源的规划[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 7-10.
- QIU Xiaoyan, XIA Lili, LI Xingyuan. Planning of distributed generation in construction of smart grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 7-10.
- 刘延博(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能技术、微电网运行。
- 邱晓燕(1964—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、智能电网、分布式发电及储能控制技术等。