

DOI: 10.7667/PSPC201853

复杂电力(能源)系统的分布式感知与协同估计/检测研究综述

陈皓勇¹, 王晓娟¹, 蔡永智², 梁子鹏¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 近年来,“互联网+”智慧能源、电力市场改革、新能源革命等一系列举措引发了电力系统信息大爆炸,导致海量的电力设备、电器以及用户需要连接。信息的感知、连接、传输、处理、应用及发布,范围越来越广,规模越来越大,并出现了大规模、复杂的高维动态系统,伴随着海量数据集。而集中式信号处理在处理这类问题时,存在着通信负担重、计算复杂度高、可扩展性差、鲁棒性差等缺点。因此集中式信号处理方式已经明显不适用,需要寻找新模型、新算法来解决。在大规模复杂(能源)电力系统中采用分布式信号处理是有效的解决方法。对国内外分布式感知和协同估计/检测进行梳理和综述,并给出未来的挑战和研究方向。

关键词: 分布式感知; 协同估计/检测; 无线传感器网络; 复杂电力系统; 分布式信号处理

Distributed sensing and cooperative estimation/detection of complex power/energy and energy systems

CHEN Haoyong¹, WANG Xiaojuan¹, CAI Yongzhi², LIANG Zipeng¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: In recent years, a series of measures (e.g. “internet+” smart energy, electricity market reform, new energy revolution) have taken place and triggered power system’s information explosion which leads to massive power equipment, electrical appliances and users need to connect. The information is perceived, connected, transmitted, processed, applied, and published in an ever-widening scope and the scale has become larger and larger and complex high-dimensional dynamic systems have emerged, accompanied by massive data sets. However, when dealing with such problems, centralized signal processing has the disadvantages of heavy communication burden, high computational complexity, poor scalability, and poor robustness. Obviously, the centralized signal processing method is not applicable and requires new models and new algorithms. It is necessary to propose a new signal processing solution (i.e. the distributed signal processing) to large scale and complex high-dimensional dynamic power/energy systems. This paper gives an overview of the distributed sensing and cooperative estimation/detection of complex power/energy system and draws the conclusion about challenges and research interests in the future.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100).

Key words: distributed sensing; cooperative estimation/detection; wireless sensor network; complex power system; distributed signal processing

0 引言

随着信号采集瓶颈的突破,无线传感网(WSN)、物联网(IOT)以及多能互补系统的发展,使得电力系统的规模变得越来越大,海量的信号处理成为了新的瓶颈^[1],大量的电力设备、电器以及用户急需连接,如电动汽车^[2]、充电桩^[3]、智能社区^[4]等。通信

系统将信号传输给多个接收端,但在传输期间,会受到外界的干扰,需要对这些信号进行处理,得到相对准确的信息。信号处理^[5](Signal Processing)是通过数理统计等方法对混有噪声的信号进行滤波处理。通信系统一般模型如图1所示。目前在通信方面比较热门的主要有:WSN、IOT、CPS等。CPS^[6]是具有计算、控制、通信的信息与物理高度融合的系统。而IOT、WSN等的发展为CPS的实现提供通信条件。IOT主要是以智能感知和智能信号处理

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900100)

为技术基础，为多能互补系统提供技术支撑，但伴随着海量数据的存储与处理；LPWAN^[7]是近年来新兴的具有低功耗、广覆盖、智能连接、泛在感知特点的 IOT 技术，常见的有 LoRa^[8]，NB-IOT^[9]等，目前已经开始应用于实际中，文献[10]介绍了 LoRa 在智能电表中的应用。

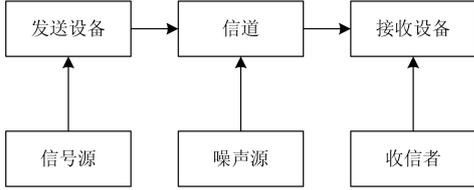


图 1 通信模型

Fig. 1 Communication model

未来的电力系统是信息网络与物理网络高度结合的综合网络，终端需要采集的数据变得更加多元化、小型化、数据数量更为庞大，如基于 PMU 的 WAMS(Wide Area Measurement System)的快速发展^[11]。随着传感技术的不断发展，电力(能源)系统变得越来越智能，出现了大规模、复杂的高维的动态系统，并伴随着海量数据集^[12]。

传感器网络监测着大规模复杂电力(能源)系统，而每个传感节点由于受电池容量、计算能力以及感知范围的约束，只能感知大系统中一部分状态过程，需要在监测区域内大量部署传感节点，协作监测和处理覆盖区域内的观测节点^[13-14]。为了掌握系统的整体运行状态，传统方法是在收集所有传感器的量测值之后，集中估计系统运行状态，即集中式信号处理。若在大规模系统中采用集中式信号处理，会面临中心式算法安全性不够、系统鲁棒性不够、节点的通信能力与电力供应不足等^[15-16]问题。而分布式信号处理是通过不同区域内分布式估计器协同估计/检测系统运行状态，无需经过协调中心即可完成整个系统的信号处理。相较之下，分布式信号处理具有以下特点^[17-20]：鲁棒性更强，节点可以随时进出网络，保密性更强，均匀分配计算和通信负担等，相比集中式信号处理更适应大规模系统。

分布式信号处理^[21]主要分为分布式感知、协同估计/检测、分布式学习以及信息融合四个部分，本文主要综述了分布式感知和协同估计/检测相关内容。安排如下：首先，综述了分布式感知与协同估计/检测建模与分析；其次，概述了状态估计的相关内容；最后，对分布式感知与协同估计/检测的应用前景和研究方向进行了展望。

1 分布式感知与协同估计/检测建模与分析

1.1 网络架构

信号处理架构^[22-23]主要有集中式架构、分散式架构、分布式架构和混合式架构，根据不同的目标函数选择最优的架构。

(1) 集中式架构：实际应用中最常见的架构，其结构相对简单、算法与技术相对成熟，但对带宽与计算能力要求高。

(2) 分散式架构：系统由不同子区域组成，区域内有融合控制中心，区域内节点相互通信，不同区域融合中心相互通信。优点是通信量较小，具有可扩展性，但区域内部通信负担重。

(3) 分布式架构：没有局部融合处理中心，每个传感节点将估计结果传输至相邻传感节点并对估计结果进行修正。优点是通信代价低，网络可接入性好，但目前没有高效的算法可以实现。

(4) 混合式架构：可采用整体多级分散式+局部分布式混合计算结构。

1.2 分布式信号处理建模

一个待采集的信号 S ， M 个传感器通过矩阵 A 独立观测，采集过程中混有噪声。这 M 个传感器通过矩阵 B 描述的信道进行通信。传感器网络的模型如图 2 所示。

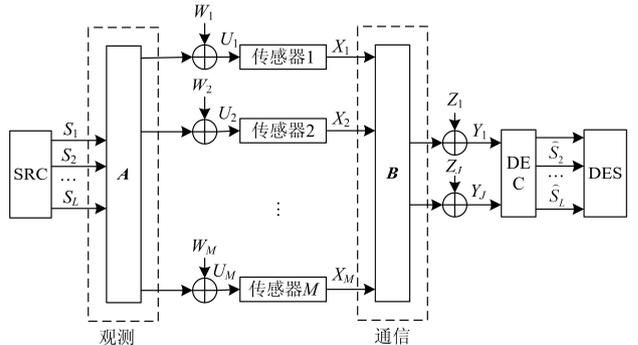


图 2 传感网络的模型

Fig. 2 Sensor networks model

(1) 观测

传感器 m 观测到信号是由 L 个受高斯白噪声影响的信源信号组成的线性组合：

$$U_m[n] = W_m[n] + \sum_{l=1}^L a_{m,l} S_l[n] \quad (1)$$

矩阵形式为

$$U[n] = W[n] + A^{(M)} S[n] \quad (2)$$

式中： $S[n]$ 表示长度为 L 的待测信号； $U[n]$ 为观测值； $A^{(M)}$ 为 $M \times L$ 维的观测矩阵； $W[n]$ 是观测噪声，服从 $(0, \sigma_w^2 I_M)$ 分布。

(2) 编码

传感器 m 通过 N 次采样获得一组序列 $\{u_m[n]\}_{n=1}^N$, 且可以从其他传感器中接收额外信息 V_M , 根据一定的编码规则, 将 $\{u_m[n]\}_{n=1}^N$ 和 V_M 进行编码, 并在信道中传输 $\{x_m[n]\}_{n=1}^N$ 。因此, 可以认为传感器 m 的输出为 $\{X_m[n]\}_{n=1}^N$, 且必须满足平均功率的限制:

$$\frac{1}{KN} \sum_{n=1}^{KN} E[|X_m[n]|^2] \leq P_m \quad (3)$$

式中, K 为通信信道的相对带宽。

(3) 接收

在 n 时刻, 接收到信号 $\{Y_j[n]\}_{j=1}^J$, 其表达式为

$$Y_j[n] = Z_j[n] + \sum_{m=1}^M b_{j,m} X_m[n] \quad (4)$$

矩阵形式为

$$\mathbf{Y}[n] = \mathbf{B}^{(M)} \mathbf{X}[n] + \mathbf{Z}[n] \quad (5)$$

式中: $\mathbf{Y}[n]$ 为长度为 J 的信道输出信号; $\mathbf{B}^{(M)}$ 为 $J \times M$ 的通信矩阵, 用于描述与基站通信时的信道; $\mathbf{Z}[n]$ 为信道噪声, 服从 $(0, \sigma_w^2 \mathbf{I}_M)$ 分布。

(4) 目标

基于信道输出信号 $\mathbf{Y}[n]$, 信号处理的目标是得

到与 $\mathbf{S}[n]$ 最近接的估计值 $\hat{\mathbf{S}}[n]$, 即 $\mathbf{S}[n]$ 与 $\hat{\mathbf{S}}[n]$ 均方误差尽可能小, 即

$$D_N(M) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{L} E[\|\mathbf{S}[n] - \hat{\mathbf{S}}[n]\|^2] \quad (6)$$

1.3 分布式感知、协同估计/检测相关理论介绍

1.3.1 分布式感知

在分布式感知中^[24], 一组传感器共同观测环境状态的信息。由于成本、频谱带宽限制和复杂度等因素的影响, 传感器将自身观测数据进行压缩, 只将部分信息传输至融合中心, 再对环境的状态进行估计。相比集中式感知, 分布式感知虽然会损失部分测量信息, 但在大规模的系统中, 未经处理的传感信息会使得融合中心处理困难, 实时性降低甚至崩溃。

分布式传感器系统有很多不同类型的网络结构, 通常是形成一个没有环路的连通图, 信息沿着唯一确定的路径从传感器节点到融合中心; 另一类为每个传感节点直接与融合中心通信的并行方式; 还有一种是随机放置在区域内传感节点自选配置, 彼此相互协作形成一种动态的通信网络。目前常见的 WSN 的数据传输模型^[25]主要如图 3 所示。

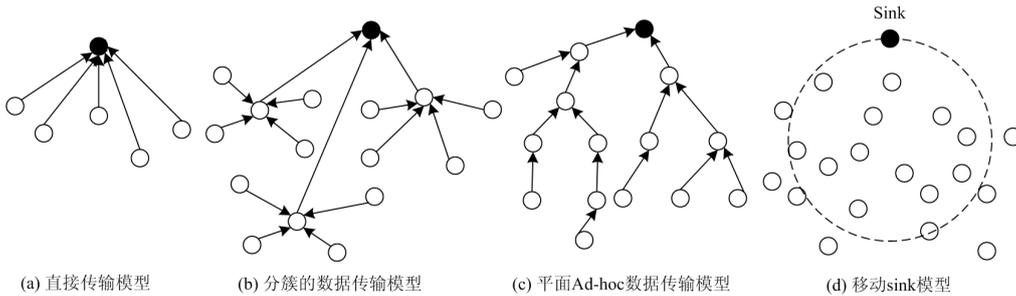


图 3 WSN 的信息传输模型

Fig. 3 Data transmission model of wireless sensor network

理想的分布式感知^[22]是: 网络中的每个节点地位平等, 可作为传感器、路由器及中继器等使用。位于目标事件区域的传感器感知其信息, 并通过单跳或者是多跳将信息传输至融合中心, 其他节点可用作中继器或路由器, 融合中心经过一次或者多次的数据传输估计出最后的结果。

1.3.2 协同估计/检测

估计也称滤波, 分成参量估计和状态估计两类, 前者属于静态估计, 后者属于动态估计。静态估计常用的估计方法有: 矩估计法、最大似然估计、最小二乘法、贝叶斯估计等; 动态估计最常用的估计方法有: 卡尔曼滤波法^[26]等。参数估计的统计模型如图 4 所示。

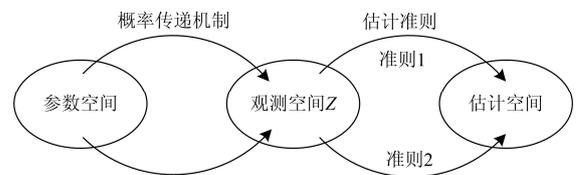


图 4 参数估计的统计模型

Fig. 4 Statistical model of parameter estimation

WAN 分布式特性是不同的传感器共同采集一个区域内的状态信息, 因为带宽和功率的限制, 需要对观测信息进行量化, 同时为了减少通信量, 要对采集的信号进行压缩。根据现有的研究可以得出 WSN 的估计挑战^[22]: 1) 在保持均方误差的前提下, 降低维度来压缩观测数据; 2) 传输前, 如何量化压

缩后信号; 3) 要如何构建量化压缩信息的估计器。

A. 数据压缩

随着能源互联网的发展, 系统规模越来越大, 对通信系统的要求越来越高, 目前面临计算能力、存储能力、传输能力以及电力供应能力不足的问题。如何对信息进行压缩, 减少通信负担, 成为目前研究的核心问题^[27-28]。

目前在复杂电力系统中常用稀疏技术通过只存储非零元素减少存储压力, 但随着系统规模的增大, 稀疏技术依旧不能很好地满足需求。基于香农定理进行采样, 当采样频率达到一定的频率时, 数据量依旧很大, 且压缩后数据会丢失一部分, 重构后精度不佳。2006年 Candes 等人提出了压缩感知技术^[29], 即信号是稀疏的或者经过某种变换后可以稀疏表示, 可以用远低于奈奎斯特信号的采样频率采样, 得到已压缩的信号, 感知和压缩在一个步骤中完成。两个对比如图 5 所示。

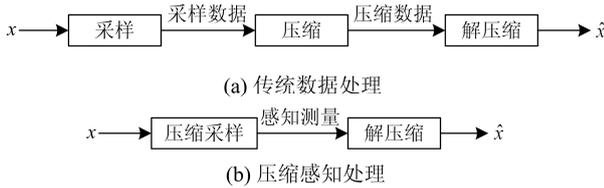


图 5 数据压缩与压缩感知对比

Fig. 5 Comparison of data compression and compression perception

B. 协同检测与协同估计

一个 N 节点的系统, 假设在 $\lambda = k$ 时刻发生变化, 传感器 i 上的观测值 X_1^i, \dots, X_{k-1}^i 独立且同分布, 而观测值 X_k^i, X_{k+1}^i 遵循另一个分布。各传感器的观测值彼此独立, 在 $t=n$ 时, 传感器节点 i 的观测信息为 $\mathbf{X}_n^i = [X_1^i, \dots, X_n^i]$, 同时可以将检测问题等效成 “ $H_0: \lambda > n$ ” 和 “ $H_1: \lambda \leq n$ ” 的假设检验问题, 若 H_0 为真, 则没有发生变化, 反之亦然。在协同检测中, 在无融合或控制中心的情况下, 每个传感器以并行或者分布式的方式检测区域内的变化, 并通过一定的数据传输模型进行信息交互, 最后基于自身采集信息与交互信息完成局部系统的检测; 在有融合或控制中心时, 所有传感器的观测结果在融合或控制中心处可用, 协同检测框架如图 6 所示。

检测到系统的变化之后, 需要对观测量进行估计, 从而获得系统状态。分布式估计由分布式网络和分布式算法组成。而协同估计^[19]是在分布式网络中, 各节点之间互相交换采集信息, 本节点根据交换信息更新并修正自身节点信息。协同式估计相较于集中式估计有以下的优势^[30-32]: 协同式估计各节

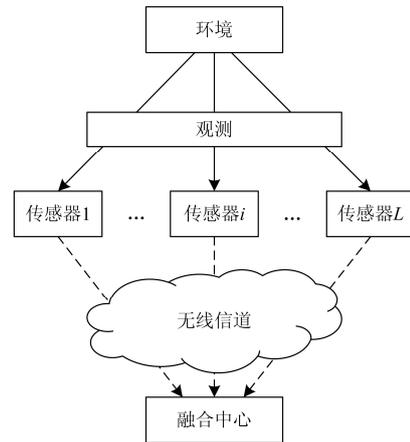


图 6 协同检测框架

Fig. 6 Cooperative detection framework

点独立进行本节点的信息处理, 并与相邻节点进行信息交换, 可有效降低计算时间与计算量, 并增加网络的鲁棒性。

考虑一个由 N 个传感器组成的 WSN 系统, 估计一个确定性参数 S , 由于融合中心收到的是量化观测值, 基于此量化观测值, 目标是得到均方误差相对最小的 \hat{S} 。第 n 个传感器可观测到:

$$x(n) = s + w(n), n \in (0, N-1) \quad (7)$$

式中, $w(n)$ 为高斯白噪声, 服从 $(0, \sigma^2)$ 分布, 不同传感器的 $w(n)$ 独立且同分布。

构造的量化的指标为

$$b_k(n) = 1\{x(n) \in B_k(n)\}, k \in [1, K] \quad (8)$$

当 $x(n) \in B_k(n) \subset R^M$ 时取 1, 否则取 0。

信号量化后, 采用网络传输路径, 将量化信息传输至其他节点, 交互信息后更新自身节点信息, 选择合适的分布式算法协同估计确定性参数 S 。

理想的分布式估计需要具备如下特点^[33]。

(1) 准确估计: 大规模系统分区后, 在系统量测值不客观时, 各区域仍需要准确估计系统运行状态。

(2) 通信负担小: 信息交互时, 要尽可能降低通信维度, 减少通信负担, 减小相应的时间, 达到更好的实时性要求。

(3) 分布式架构: 分布式估计的精度要与集中式估计相近。

(4) 实时性: 计算量小、实时性好。

(5) 鲁棒性: 要具有鲁棒性。

2 电力系统分布式状态估计

2.1 系统分区方法

文献^[34]中介绍了目前电网的分区方法及不同

分区方法的研究重点。在已有的研究中, 主要有搭接式系统分区^[31]、非重叠系统分区^[35-37]、地理辖区式分区^[23]。由于电力系统的系统紧密相连、地域覆盖辽阔, 常按地理位置进行管理, 故选取地理辖区原则的系统分区方法。

文献[23]中基于地理辖区式分区, 将紧密相连的系统分成 N 个子区域。用 $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T, \dots, \mathbf{x}_N^T]^T$ 表示 n 维系统状态量, \mathbf{x}_i 为区域 i 的状态量。

以图7所示系统为例, 说明区域 i 的状态量 $\mathbf{x}_i = [\mathbf{x}_{i,int}^T, \mathbf{x}_{i,bint}^T, \mathbf{x}_{i,bext}^T]^T$ 的定义。

(1) 区域 i 内部状态 $\mathbf{x}_{i,int}$: 区域 i 内未和别的子区域连接的状态量;

(2) 区域 i 内部边界状态 $\mathbf{x}_{i,bint}$: 区域 i 内和别的子区域连接的状态量;

(3) 区域 i 外部边界状态 $\mathbf{x}_{i,bext}$: 别的子区域中与区域 i 连接的状态量。

同样地可知区域 j 的各状态量的定义。

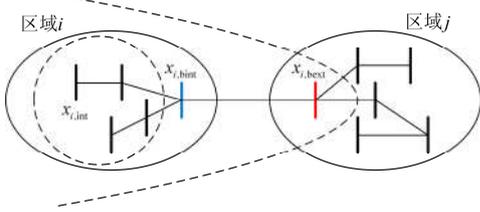


图7 二分区系统

Fig. 7 Two partition interconnected power system

2.2 互联的多区域状态估计

通过划分子区域, 可以将大规模复杂的电力系统转换成几个互联的子区域的状态估计问题, 从而实现整体状态估计的降维处理。

(1) 子区域的状态估计

a) 静态状态估计

静态状态估计为根据 i 时刻的观测量并通过一定的算法得到该时刻相对准确的系统状态的方法。在20世纪70年代, F. C. Schweppe等人提出加权最小二乘法(WLS)^[38], 并得到了广泛的应用。已知区域 i 含 n_i 个节点和 b_i 条支路, 在其他条件已知并考虑有测量噪声的情况下, 测量方程为

$$z_i = h_i(x_i) + v_i \quad (9)$$

式中: z_i 是 m_i 维的测量量; $h_i(\bullet)$ 是测量函数; v_i 表示测量噪声。

按照WLS建立的目标函数为

$$\min J_i(x_i) = [z_i - h(x_i)]^T \mathbf{R}_i^{-1} [z_i - h(x_i)] \quad (10)$$

式中, \mathbf{R}_i 为 $m_i \times m_i$ 测量误差方阵。

根据迭代公式求得满足 $J_i(x_i)$ 的 x_i 值。

$$\hat{x}_i^{(k+1)} = \hat{x}_i^{(k)} + \Delta \hat{x}_i^{(k)} \quad (11)$$

式中, $\Delta \hat{x}_i^{(k)} = (\mathbf{H}_i^T(\hat{x}_i^{(k)}) \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i(\hat{x}_i^{(k)}))^{-1} \mathbf{H}_i^T(\hat{x}_i^{(k)}) \cdot$

$$\mathbf{R}_i^{-1} (z_i - h_i(\hat{x}_i^{(k)})), \quad \mathbf{H}_i(\hat{x}_i^{(k)}) = \left. \frac{\partial h_i(x_i)}{\partial x_i} \right|_{x_i = \hat{x}_i^{(k)}}$$

WLS估计器模型简单、收敛性好, 但由于计算量和内存量大, 出现了各种改进算法^[39-42], 主要有: 快速解耦状态估计法、量测变换法、正交变换法、混合法、带等式约束的法方程法等。根据实际情况选择合适的算法以达到最优的估计。

b) 动态状态估计

动态状态估计在完成静态估计所有功能的同时还具有预测功能, 且无需迭代即可得到估计结果。1960年, 卡尔曼提出了线性卡尔曼滤波器^[43], 并在很多工程实际中得到广泛应用。给定一个区域 j 其运行状态方程可由式(12)表示。

$$x_{j,k} = \mathbf{F}_{j,k-1} x_{j,k-1} + \mathbf{G}_{j,k-1} \omega_{j,k-1} \quad (12)$$

系统量测模型写为

$$z_{j,k} = \mathbf{H}_{j,k} x_{j,k} + v_{j,k} \quad (13)$$

式中: 下标 j 表示区域 j , 下标 k 表示 k 时刻; $x_{j,k}$ 为状态矢量; $\mathbf{F}_{j,k}$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{G}_{j,k}$ 为控制矢量; $z_{j,k}$ 为本地量测矢量; $\mathbf{H}_{j,k}$ 为量测矩阵; $\omega_{j,k}$ 和 $v_{j,k}$ 分别表示预测模型误差和量测误差。

卡尔曼滤波算法可分为两个过程: 预测步和量测更新, 其中预测步阶段:

$$\hat{x}_{j,k|k-1} = \mathbf{F}_{j,k-1} \hat{x}_{j,k-1|k-1} + \mathbf{G}_{j,k-1} \quad (14)$$

$$P_{j,k|k-1} = \mathbf{F}_{j,k-1} P_{j,k-1|k-1} \mathbf{F}_{j,k-1}^T + \mathbf{Q}_{j,k-1} \quad (15)$$

式中, \mathbf{Q}_i 表示系统过程协方差。

量测更新阶段:

$$\hat{x}_{j,k|k} = \hat{x}_{j,k|k-1} + K_{j,k-1} (z_{j,k} - \mathbf{H}_{j,k-1} \hat{x}_{j,k|k-1}) \quad (16)$$

$$P_{j,k|k} = P_{j,k|k-1} - K_{j,k-1} \mathbf{H}_{j,k-1} P_{j,k|k-1} \quad (17)$$

$$K_{j,k} = P_{j,k|k-1} \mathbf{H}_{j,k}^T (\mathbf{H}_{j,k-1} P_{j,k-1|k-1} \mathbf{H}_{j,k-1}^T + R_{j,k-1})^{-1} \quad (18)$$

由于大规模的电力系统是高维、动态的非线性系统, 为了满足更高的要求, 由此扩展了许多改进的算法, 其中具有代表性^[44-46]的有: 扩展卡尔曼滤波器(EKF)、无迹卡尔曼滤波器(UKF)、容积卡尔曼滤波器(CKF)等。

(2) 互联区域的状态估计

每个子区域独立进行区域内的状态估计, 同时进行边界状态的协调, 若每个子区域的参考节点均配置有PMU, 则不需要进行参考节点相角差的计算; 若未配有PMU, 则需要协调中心与各子区域共

同协调计算相角差，以便实现全系统的互联估计。互联区域状态估计流程如图 8 所示。

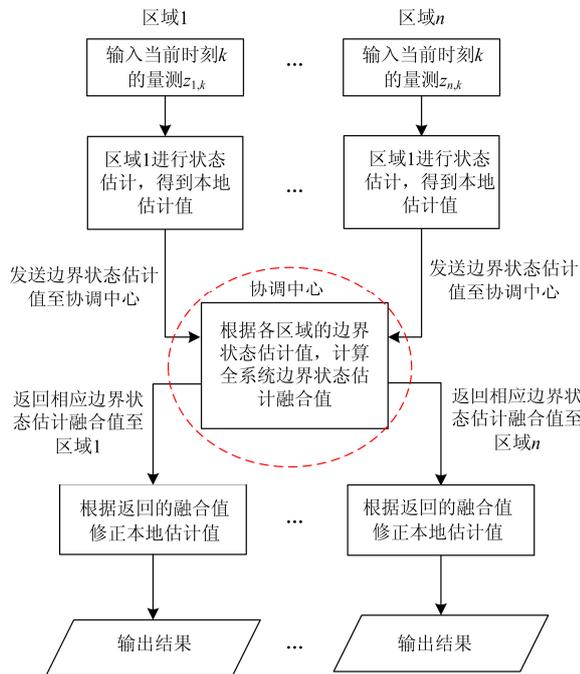


图 8 互联区域状态估计流程图

Fig. 8 Flow chart of state estimation in partition interconnected power system

2.3 分布式状态估计研究进展

电力系统状态估计是 EMS 的重要组成部分，为电网安全运行、调度、控制提供了实现条件。近年来，随着 PMU(Phasor Measurement Unit)的发展，基于 PMU 的 WAMS^[47-48]测量系统逐渐凸显优势，但伴随而来的是海量系统量测数据的处理问题。基于 WAMS 的状态估计主要分为集中式和分布式两种，集中式模式难以满足状态估计的实时性要求，可靠性和可扩展性不强。而分布式状态估计^[49-50](DSE)可以避免繁杂的海量数据集中式处理，且具有良好的可靠性与可扩展性。因此，DSE 提供了有效的解决方案。

现有的 DSE 结构主要分成两大类：分层式结构^[47]与分散式结构^[51]，如图 9 所示。

在分层式结构中，文献[52]基于 SCADA 和 PMU 混合量测，提出了分布式动态状态估计(DDSE)算法，单算法精度较集中式状态估计差；文献[53-55]都基于相量测量单元(PMU)提出关于 DDSE 模型或算法的改进，当配有 PMU 的边界节点的测量误差大时，会影响收敛性，进而造成估计精度的降低。文献[56-57]中，区域电网完成本地估计后，协调中心协调边界信息不断迭代至区域估计结果收敛，通

信量有所增加，但实际中较不易实现。综上所述，在分层式结构中，存在着系统估计精度不足、数据交互通信量较大、算法复杂不易实现等不足。

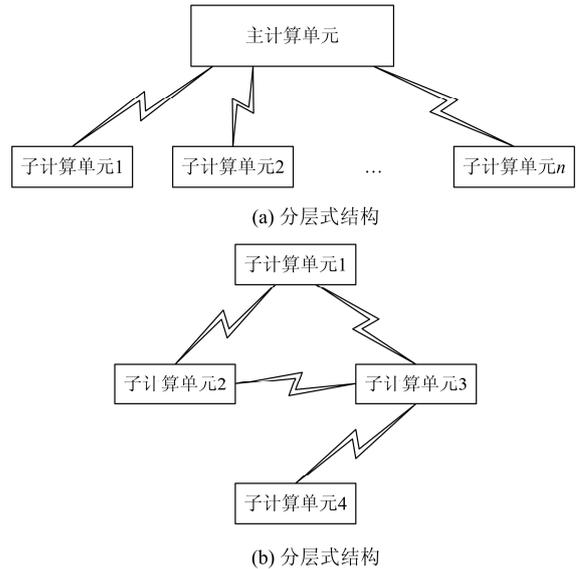


图 9 分布式状态估计结构

Fig. 9 Diagram of distributed signal processing

在分散式结构中，文献[58]建立了带约束的最小二乘估计模型，在每次状态估计过程中只需要交换边界的估计信息。文献[57]和文献[59]提出一种基于 Consensus Innovations 的 DSE 方法，这种方法用于任意通信拓扑。文献[60]基于所提方法能够在系统不客观的情况下，仍保证其估计精度，但达到收敛耗费时间较长。文献[51]提出 DSE 方法，克服文献[60]中渐进收敛速度慢的缺点，但仅适用于树型拓扑。目前关于分散式状态估计研究处于初步阶段，在算法上渐进收敛，收敛性与收敛速度难以保证，且算法参数的选择受拓扑结构的影响大。

随着电力系统自动化程度的加深，对信号的处理要求越来越高^[61-62]，星型通信拓扑将逐渐被网状或者是链状通信拓扑所取代，未来电网的控制与调度将越来越趋向于分散式^[63-65]。

3 应用前景

分布式信号处理技术主要是通过分布式局部信号采集进行整个系统的融合估计/检测。大规模复杂电力(能源)系统的分布式信号处理就是一个“盲人摸象”的过程，通过传感器只能感知系统的一部分，如何利用传感器量化压缩后信号形成动态系统的整体状态是分布式信号处理的关键。随着能源互联网的发展，需要采集的数据种类、数量日益增加，WSN 和 IOT 的高速发展，为今后的复杂电力(能源)系统

的分布式信号处理奠定了基础。

WSN 应用广泛, 主要在以下领域有重要的应用: 工业控制、智能交通、环境监测、农业生产、军事应用和基础设施状态监测。其他领域包括智能家居、物流管理、管道监测、航空监测、健康监护、行为监测和生物学等。

电力物联网^[66]在电力系统主要有以下几个方面的应用。

(1) 发输变配电环节: 设备环境检测, 设备状态检测以及气象检测等。

(2) 用户侧的数据连接: 家用电器使用监测、工厂车间设备监测、建筑能耗情况监测、城市公共基础设施监测。

(3) 智慧能源新业务的数据连接: 智能电表、碳市场交易、可再生能源的监测包括发电数据及各种组件的运行状态。

4 结论

随着信息系统的高速发展, 对采集的信号处理要求越来越高, 已有的模型与算法明显不适用, 需要研究新的模型与算法来满足庞大的计算量与实时性要求。综合已有的研究, 对分布式感知和协同估计/检测进行展望。

(1) 分布式感知

1) 大规模系统中, 按照香农采样, 会耗费大量的传输成本, 如何在保证信息完好无损的情况下, 有效降低所采集的数据量, 即压缩感知^[67-68], 将成为以后研究重点。

2) 在弱信号环境(强干扰、目标机动等)下, 如何保证数据不丢失以及降低通信时延。

3) 通过合理分配分布式网络节点, 获得更好的经济性和收益, 提高网络覆盖率和减少冗余节点的数目。

(2) 协同估计/检测

1) 降低数据处理复杂度, 保证实时性以及通信系统的鲁棒性。

2) 在能力约束、有限通信带宽的限制下进行通信, 寻求全局估计/检测与局部估计/检测在功能上的平衡和优化, 并根据需求变化进行动态的调整。

3) 没有融合或控制中心参与时, 如何能保证估计/检测的精度。

参考文献

- [1] GRAVINA R, ALINIA P, GHASEMZADEH H, et al. Multi-sensor fusion in body sensor networks: state-of-the-art and research challenges[J]. Information Fusion, 2016, 35: 68-80.
- [2] 梁子鹏, 陈皓勇, 王勇超, 等. 含电动汽车的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2647-2656. LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, WANG Yongchao, et al. Robust economic dispatch of microgrids containing electric vehicles[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2647-2656.
- [3] 李洪峰, 李红霞, 陈志刚, 等. 一种新型电动汽车充电桩技术方案探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 142-147. LI Hongfeng, LI Hongxia, CHEN Zhigang, et al. Discussion on technology scheme of a new EV charging pile[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 142-147.
- [4] 王珺, 顾伟, 张成龙, 等. 智能社区综合能源优化管理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 89-97. WANG Jun, GU Wei, ZHANG Chenglong, et al. Research on integrated energy management for smart community[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 89-97.
- [5] 谢维信, 陈曾平, 裴继红, 等. 大数据背景下的信号处理[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 43(12): 1525-1546. XIE Weixin, CHEN Zengping, PEI Jijiang, et al. Signal processing in the context of big data[J]. Scientia Sinica, 2013, 43(12): 1525-1546.
- [6] 王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1157-1166. WANG Zhongjie, XIE Lulu. Cyber-physical systems: a survey[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1157-1166.
- [7] 郑宁, 杨曦, 吴双力. 低功耗广域网络技术综述[J]. 信息通信技术, 2017, 11(1): 47-54. ZHENG Ning, YANG Xi, WU Shuangli. A survey of low-power wide-area network technology[J]. Information & Communications Technologies, 2017, 11(1): 47-54.
- [8] 郑浩. LoRa 技术在低功耗广域网络中的实现和应用[J]. 信息通信技术, 2017, 11(1): 19-26. ZHENG Hao. The implementation and application of LoRa modulation for LPWAN[J]. Information & Communications Technologies, 2017, 11(1): 19-26.
- [9] 邹玉龙, 丁晓进, 王全全. NB-IoT 关键技术及应用前景[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(1): 43-46. ZOU Yulong, DING Xiaojin, WANG Quanquan. Key technologies and application prospect for NB-IoT[J]. Zte Technology Journal, 2017, 23(1): 43-46.
- [10] 赵太飞, 陈伦斌, 袁麓, 等. 基于 LoRa 的智能抄表系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9): 298-301. ZHAO Taifei, CHEN Lunbin, YUAN Lu, et al. Design and implementation of smart meter reading system based

- on LoRa[J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(9): 298-301.
- [11] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. *计算机学报*, 2013, 36(1): 143-167.
CAO Junwei, WAN Yuxin, TU Guoyu, et al. Information system architecture for smart grids[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(1): 143-167.
- [12] LI D. Distributed signal processing over large-scale complex systems[D]. Texas: Texas A & M University, 2017.
- [13] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(1): 215-227.
QIAN Zhihong, WANG Yijun. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 215-227.
- [14] 杜加根. 无线传感器网络在智能电网中应用的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
DU Jiagen. Research on application of wireless sensor networks[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [15] AMINIFAR F, FOTOHI-FIRUZABAD M, SAFDARI-AN A, et al. Synchrophasor measurement technology in power systems: panorama and state-of-the-art[J]. *IEEE Access*, 2014, 2: 1607-1628.
- [16] AMIN S M, WOLLENBERG B F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century[J]. *IEEE Power & Energy Magazine*, 2005, 3(5): 34-41.
- [17] SHERSON T, HEUSDENS R, KLEIJN W B. On the duality of globally constrained separable problems and its application to distributed signal processing[C] // *Signal Processing Conference*, August 29-September 2, 2016, Budapest, Hungary: 1083-1087.
- [18] 王硕. 分布式协同估计方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
WANG Shuo. Research on distributed collaborative estimation[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [19] 张华滋. 无线网络中的分布式信号处理与信息传播[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
ZHANG Huazi. Distributed signal processing and information spreading in wireless network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [20] TERZIJA V, VALVERDE G, CAI D, et al. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 99(1): 80-93.
- [21] SWAMI A. *Wireless sensor networks: signal processing and communications perspectives*[M]. Wiley, 2007.
- [22] MURTAZA T, ANDREA C. Distributed and decentralized multicamera tracking[J]. *Signal Processing Magazine*, 2011, 28(3): 46-58.
- [23] 蔡永智. 分布式电力系统状态估计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
CAI Yongzhi. Study on distributed power system state estimation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [24] LEUNG H, CHANDANA S, WEI S. Distributed sensing based on intelligent sensor networks[J]. *IEEE Circuits & Systems Magazine*, 2008, 8(2): 38-52.
- [25] 康莉, 谢维信, 黄建军, 等. 无线传感器网络中的分布式压缩感知技术[J]. *信号处理*, 2013, 29(11): 1560-1567.
KANG Li, XIE Weixin, HUANG Jianjun, et al. Distributed compressive sensing for wireless sensor networks[J]. *Journal of Signal Processing*, 2013, 29(11): 1560-1567.
- [26] FARAGHER R. Understanding the basis of the Kalman filter via a simple and intuitive derivation [lecture notes][J]. *Signal Processing Magazine*, 2012, 29(5): 128-132.
- [27] 陈善雄, 何中市, 熊海灵, 等. 一种基于压缩感知的无线传感信号重构算法[J]. *计算机学报*, 2015, 38(3): 614-624.
CHEN Shanxiong, HE Zhongshi, XIONG Hailing, et al. A reconstruction algorithm of wireless sensor signal based on compressed sensing[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2015, 38(3): 614-624.
- [28] 孙斌, 金心宇. 压缩感知在无线传感器网络目标跟踪中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(5): 463-468.
SUN Bin, JIN Xinyu. Applications of compressive sensing in target tracking of wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronic Measurement & Instrumentation*, 2014, 28(5): 463-468.
- [29] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [30] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C] // *Hawaii International Conference on System Sciences*, January 7-7, 2000, Maui, USA: 8-20.
- [31] FALCÃO D M, WU F F, MURPHY L. Parallel and distributed state estimation[J]. *Transactions on Power Systems*, 1995, 10(2): 724-730.
- [32] PREDD J B, Kulkarni S R, POOR H V. Distributed learning in wireless sensor networks[M]. John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2007.
- [33] TAI X. New state estimation techniques for smart power networks with communication constraints NOVA[J]. *European Neurology*, 2013, 36(3): 125-33.

- [34] 孙江山, 刘敏, 邓磊, 等. 电力系统分区和解耦状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 162-169.
SUN Jiangshan, LIU Min, DENG Lei, et al. Review of the research on the partition and decoupled state estimation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 162-169.
- [35] KOBAYASHI H, NARITA S, HAMMAM M S A A. Model coordination method applied to power system control and estimation problems[J]. Lecture Notes in Economics & Mathematical Systems, 1974, 93: 114-128.
- [36] WALLACH Y, HANDSCHIN E, BONGERS C. A efficient parallel processing method for power system state estimation[J]. Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(11): 4402-4406.
- [37] CUTSEM T V, HORWARD J L, RIBBENS-PAVELLA M. A two-level static state estimator for electric power systems[J]. Transactions on Power Apparatus & Systems, 1981, PAS-100(8): 3722-3732.
- [38] SCHWEPPE F C, WILDES J, ROM D B. Power system static-state estimation, part I, II, III[J]. Transactions on Power Apparatus and System, 1970, 89(1): 120-135.
- [39] 韩富春, 任先成. 快速解耦状态估计算法研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(6): 45-48.
HAN Fuchun, REN Xiancheng. A new state estimation based on fast decoupling and retaining nonlinearity[J]. Proceedings of CSU-EPSCA, 2003, 15(6): 45-48.
- [40] 程浩忠, 袁青山, 汪一华, 等. 基于等效电流量测变换的电力系统状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(14): 25-29.
CHENG Haozhong, YUAN Qingshan, WANG Yihua, et al. A state estimation method of power systems based on equivalent current measurement transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(14): 25-29.
- [41] 卢志刚, 田莎莎, 邵奇, 等. 基于正交变换与置信域的量测方差估计与权重设置算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 67-74.
LU Zhigang, TIAN Shasha, SHAO Qi, et al. Measurement variance estimation and weights configuration algorithm based on orthogonal transformation and trust region[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 67-74.
- [42] 李可文, 张步涵, 曲伟君. 一种基于量测变换的快速解耦状态估计方法[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(2): 61-63.
LI Kenwen, ZHANG Buhan, QU Weijun. A fast decoupled state estimation method based on transformed measurement[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2000.
- [43] KALMAN R. A new approach to linear filtering and predicted problems[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(2): 61-63.
- [44] 赵洪山, 田甜. 基于自适应无迹卡尔曼滤波的电力系统动态状态估计[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 188-192.
ZHAO Hongshan, TIAN Tian. Dynamic state estimation for power system based on an adaptive unscented Kalman filter[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 188-192.
- [45] IENKARAN A, SIMON H. Cubature Kalman filter[J]. Transactions on Automatic Control, 2009, 54(6): 1254-1269.
- [46] 蔡永智, 陈皓勇, 万楚林. 基于最小二乘估计融合的分布式电力系统动态状态估计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 29-35.
CAI Yongzhi, CHEN Haoyong, WAN Chulin. Distributed dynamic state estimation for power systems based on least square estimation fusion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 29-35.
- [47] BRUNO C, CANDIA C, FRANCHI L, et al. Possibility of enhancing classical weighted least squares state estimation with linear PMU measurements[C] // Bucharest PowerTech, June 28-July 2, 2009, Bucharest, Romania: 1-6.
- [48] KORRES G N, MANOUSAKIS N M. State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1514-1524.
- [49] 蔡永智, 陈皓勇, 郭曼兰. 采用有限时间平均一致性协议的电力系统分布式状态估计[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(8): 1007-1014.
CAI Yongzhi, CHEN Haoyong, GUO Manlan. Distributed power system state estimation using finite-time average consensus protocol[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(8): 1007-1014.
- [50] 蔡永智, 陈皓勇, 万楚林. 基于局部信息融合和估计投影法的多区域电力系统状态估计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 69-77.
CAI Yongzhi, CHEN Haoyong, WAN Chulin. Multi-area power system state estimation based on partial information fusion and estimate projection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 69-77.
- [51] TAI X, LIN Z, FU M, et al. A new distributed state estimation technique for power networks[C] // American Control Conference, June 17-19, 2013, Washington DC, USA: 3338-3343.
- [52] 孙一冰. 分布式动态状态估计算法及其在电力系统中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2017.
SUN Yibing. Distributed dynamic state estimation

- algorithms and application in power systems[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [53] SHARMA A, SRIVASTAVA S C, CHAKRABARTI S. Multi area state estimation for smart grid application utilizing all SCADA and PMU measurements[C] // Innovative Smart Grid Technologies, May 20-23, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia: 525-530.
- [54] 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.
- [55] 刘辉乐, 刘天琪, 彭锦新. 基于 PMU 的分布式电力系统动态状态估计新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 34-39.
- LIU Huile, LIU Tianqi, PENG Jinxin. New distributed power system dynamic state estimation algorithm based on PMU[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 34-39.
- [56] WANG S, GAO W, MELIOPOULOS A P S. An alternative method for power system dynamic state estimation based on unscented transform[J]. Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 942-950.
- [57] KAR S, HUG G, MOHAMMADI J, et al. Distributed state estimation and energy management in smart grids: a consensus+ innovations approach[J]. Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(6): 1022-1038.
- [58] GONZÁLEZ X, RAMÍREZ J M, MARMOLEJO J A, et al. Methodology for multi-area state estimation solved by a decomposition method[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 123: 92-99.
- [59] XIE L, CHOI D, SOUMMYA K, et al. Fully distributed state estimation for wide-area monitoring systems[J]. Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1154-1169.
- [60] KEKATOS V, GIANNAKIS G B. Distributed robust power system state estimation[J]. Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1617-1626.
- [61] 胡春潮, 何杰, 马凯. 基于信息冗余的电力系统分布式状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 111-115.
- HU Chunchao, HE Jie, MA Kai. Power system distributed state estimation based on information redundancy of secondary system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 111-115.
- [62] 刘科研, 盛万兴, 何开元, 等. 基于拉格朗日松弛技术的复杂有源配电网分布式状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 125-132.
- LIU Keyan, SHENG Wanxing, HE Kaiyuan, et al. Distributed state estimation of complex active distribution network based on Lagrange relaxation technique[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 125-132.
- [63] YAN W, WEN L, LI W, et al. Decomposition-coordination interior point method and its application to multi-area optimal reactive power flow[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2011, 33(1): 55-60.
- [64] JEYADEVI S, BASKAR S, BABULAL C K, et al. Solving multi-objective optimal reactive power dispatch using modified NSGA-II[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2011, 32(2): 219-228.
- [65] GUO Q, SUN H, LIU Y, et al. Distributed automatic voltage control framework for large-scale wind integration in China[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA: 1-5.
- [66] 刘建明, 赵子岩, 季翔. 物联网技术在电力输电系统中的研究与应用[J]. 物联网学报, 2018, 2(1): 88-102.
- LIU Jianming, ZHAO Ziyang, JI Xiang. Research and application of internet of things in power transmission and distribution system[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(1): 88-102.
- [67] 曹思扬, 戴朝华, 朱云芳, 等. 一种新的电能质量扰动信号压缩感知识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 7-12.
- CAO Siyang, DAI Chaoyang, ZHU Yunfang, et al. A novel compressed sensing-based recognition method for power quality disturbance signals[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 7-12.
- [68] 尹立敏, 齐敏, 雷钢, 等. 基于超完备字典的压缩感知电能质量数据重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 88-94.
- YIN Limin, QI Min, LEI Gang, et al. Reconstruction of compressed sensing power quality data based on over complete dictionary[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 88-94.

收稿日期: 2018-03-10

作者简介:

陈皓勇(1975—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划、运行与控制, 新能源并网与智能电网技术, 电力经济与电力市场, 综合能源系统等; E-mail: eehychen@scut.edu.cn

王晓娟(1994—), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统分析运行与控制。E-mail: juanviolet@126.com

(编辑 许威)