

基于协作传输的智能电网数据通信系统设计

崔正杰^{1,2}, 刘南杰^{1,2}, 倪振华³, 赵海涛^{1,2}

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学 网络基因工程研究所, 江苏 南京 210003);

3. 国网上海市电力公司 信息通信公司, 上海 200122)

摘要 随着物联网技术的发展, 智能电网被引入到下一代电网建设中, 而现有的电力通信网络建设滞后于电网对数据采集与传输的新要求。针对这种情况, 为满足科学、合理的发电、输电和配电的调度, 设计了一种用于电网数据采集、传输与处理的通信系统。首先提议了包括局域网、邻域网和广域网的网络结构; 然后构建数据协作传输的网络模型, 设立中继站执行中继传输来防止数据的拥塞和丢包, 最后根据成本最小化原则得出中继站的最佳传输策略。分析结果表明, 本系统能够实现在智能电网中获取准确、及时的用电数据, 达到科学调度电网资源的目的。

关键词 通信网络; 智能电网; 协作传输; 最佳策略

中图分类号 TP399

文献标识码 A

Design of data communication system for smart grid based on cooperative transmission

CUI Zheng-jie^{1,2}, LIU Nan-jie^{1,2}, GE Jian-fei³, ZHAO Hai-tao^{1,2}

(1. Institute of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(2. Network Gene Engineering Research Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(3. Information & Telecommunication Co., Ltd., State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract With the development of IOT technology, the smart grid is introduced into the next generation of electric power network construction. But the requirement of data acquisition and transmission is difficult to be satisfied in the existing communication network in the grid. To meet the scientific scheduling of power generation, transmission and distribution, a communication system used for data transmission in smart grid is designed in view of the demand for reliable data acquisition and transmission. A network structure including home area network, neighborhood area network and wide area network were proposed in the system. Relay stations are deployed to perform relay transmission to prevent the congestion and loss of the packet. The optimum transmission strategy of relay station is obtained according to the cost minimization principle. Analysis results show that electricity data can be acquired accurately and timely in the smart grid by using this system. The goal of achieving the best scheduling of grid resources is discussed.

Key words communication network; cooperative transmission; smart grid

0 引言

现代社会能源供给及能源消费结构的不平衡, 对能源供应稳定性和效率方面要求的不断提高, 催生了智能电网的发展。与传统电网相比, 智能电网通过密布各个环节的传感器, 实现电网与用户的互动, 是电力网和信息技术的融合。它利用分散式计算系统来提供实时分析, 其目的是在提高效率的同时, 有效地利用电力供需系统, 达到节省电力资源的目的, 为进行科学的供电决策、智能调度提供了平台[1]。

智能电网是在物联网技术的基础上发展起来的。在智能电网中, 终端数据上传到管理平台需要一定的数据传输网络, 但是智能电网中的网络又有着不同的要求, 比如快速灵活部署、传输稳定可靠等特点[2-3]。当前电网虽然采用了一些局域网和广域网技术来传输电网数据, 但没有考虑电网

数据具有安全性、可靠性和实时性的特殊要求。设计一种与智能电网紧密融合的高效、可靠的通信系统架构, 来确保电网数据传输的效率和可靠性, 从而在电力调度中做出最佳的决策显得十分重要[2-3]。

基于合作多样性的协作传输已被引入到通过利用无线信道的广播特性来提高性能(即可靠性和吞吐量)上来。协作传输的各种问题(例如, 调度[4], 功率分配[5], 路由[6])已在文献中解决, 但他们考虑的是传统网络, 没有考虑电网数据具有安全性、可靠性和实时性的特殊要求。本文设计了一种基于协作传输的智能电网通信系统, 特别的, 考虑了智能电网中电表数据的最佳协作传输。

1 基于协作传输的智能电网数据通信系统设计

本系统包括数据采集部分、数据传输部分和数据处理部分。首先提议了一种适用的数据通信网络结构,在这种网络体系下利用智能电表收集用户数据,并发送到系统的处理与控制中心,中心对数据分析后做出科学决策,反馈至电网执行。为了避免数据收集和传输中的拥塞,提出在无线网络中应用协作传输,设立社区中继站来为数据聚合单元(DAU, data aggregator unit)执行中继传输。最后提出非合作博弈模型,根据成本最小化原则分析中继传输的最佳协作传输策略,并使用纳什均衡作为社区中继传输的最佳方案(根据成本最小化原则)。本文提议的通信系统目的是支撑智能电网自由、安全的传输用电数据[7],使电网处理中心做出科学合理的电力调度,实现成本最小化。

1.1 智能电网中的数据通信网络结构设计

图1显示了本系统中的数据通信网络相关的组成部分。其中主要包括以下几个组成部分:家用电器、智能电表、数据聚合单元(data aggregator unit, DAU)、输配电系统和电表数据管理系统(meter data management system, MDMS)。其中家用电器是智能电网中的能量消耗单元,智能化的家用电器能够向智能电表发送用电信息和电力需求信息。智能电表负责从家用电器收集各种信息,比如用电数据、故障数据、用电需求信息和用户设备数据等信息,并通过家域网网关发送给DAU。数据聚合单元DAU是一个用于从智能电表或家庭网关收集电表数据的通信设备。电表数据通过DAU发送给控制中心,用于管理电量消耗和供电决策分析。电表数据管理系统MDMS(meter data management system)是系统的处理、控制中心,它提供电表数据的存储、管理和处理,以便系统应用程序和设备正常使用这些数据。同时,MDMS收集发电厂和输配电的状态和参数数据,进行电网内的合理调度,以达到最优化的目的。

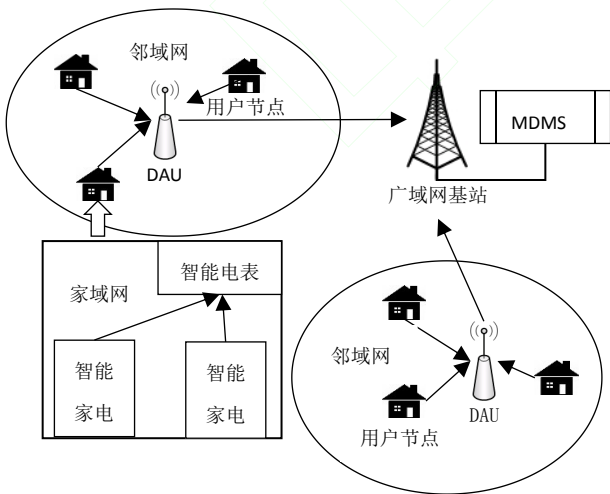


图1 系统网络结构

为了支持智能电网的相应功能,可以采用已经被开发的不同的数据通信和网络架构:家庭能源管理系统(Home

energy management system, HEMS), 广域测量系统(Wide-area measurement system, WAMS), 先进计量基础架构(Advanced metering infrastructure, AMI), 传感器和执行器网络(Sensor and actuator network, SANET)。

可以使用不同的无线网络结构来支持本系统中的数据传送[8]。如图1所示,系统使用三种不同规模和位置的主要网络,分别是:家域网(HAN, Home area network), 邻域网(NAN, Neighborhood area network), 和广域网(WAN, Wide area network):

家域网使用短距离或者局域无线传输技术(例如WiFi和ZigBee),把带有传感器和处理器的电器、室内终端、智能电表、控制设备等连接成一个家庭域网络HAN,以支持实时电表数据传输、动态定价和负载控制,通过家庭网关把数据传输到外部邻域网中的实体,家庭网关可以内置在智能电表中或者独立安装。

邻域网(NAN)由小区中的若干家域网组成。家域网网关通过邻域网将电表数据传输给DAU。DAU和家域网网关的通信可采用WLAN等相关网络技术[9]。此外,DAU可以作为邻域网网关把收集到的数据通过广域网传到MDMS。

广域网(WAN)用于在智能电网中连接远程系统(例如,MDMS, AMI, 同步光纤网络SONET)。它能把用户、发电厂、变电站、电力局等节点连接成一个系统,实现电网资源合理调度。广域网网关可以使用宽带连接(例如,3G, 卫星, WiMAX)来收集所需的数据[10]。本系统的中继传输是在广域网范围内执行的,用于从DAU向MDMS传输数据的过程中。

1.2 中继传输的网络模型设计

在本文的智能电网模型中,电表数据(电力消耗和电力需求信息)是通过智能电表从家用电器收集而来。一个服务区被划分为M个社区,每个社区对应为一群住宅。 N_m 表示社区m的节点(用户)数。所有的社区通过邻域网NAN(可采用单跳或多跳WIFI)把智能电表收集的用电数据发送给数据聚合单元DAU。然后DAU把电表数据通过WAN(如WIMAX)发给MDMS。MDMS对所有的社区进行需求估算,根据估算得到的需求总数据向发电商制定发电合同量,并给用户区域分配供电量。为了提高可靠性和速率,每个社区投资部署一个中继站为DAU执行协作传输,以提高从DAU到MDMS之间的广域网(WAN)链接的性能,因此,可以避免DAU从大量节点收集电表数据时的拥塞[11]。图2为如上所述的一个包含3个社区的网络模型的示意图,图中中继站2在为DAU执行中继传输。中继站可以被放置在社区的不同位置(比如在DAU和MDMS之间),以提高使用中继传输时DAU的传输性能。

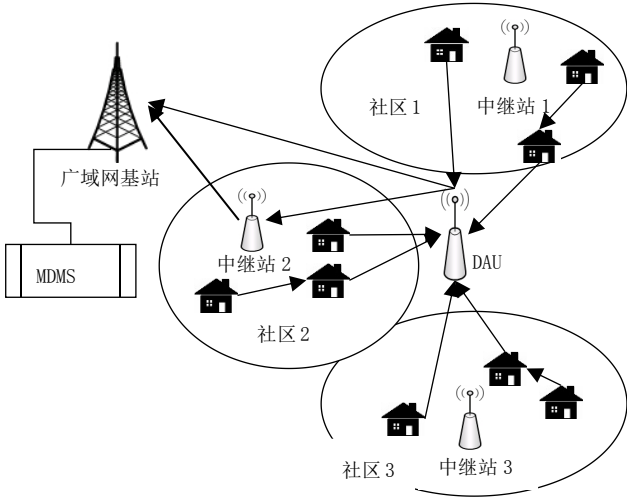


图2 中继协作传输网络模型

考虑了从 DAU 到 MDMS 的两跳协作传输（可以使用 IEEE 802.16j 和 802.16m 中的帧结构）。社区中继站采用解码转发（DF）的中继方法，即：假设每个中继站和 DAU 处在同一频率信道上。首先，DAU 发送电表数据的数据包给 MDMS。同时，所有小区的中继站也可以接收到这个 DAU 发送的数据。如果一个中继站决定执行中继传输（即根据社区已选定的博弈策略），它将对从 DAU 中接收到的数据包进行解码。然后中继站把解码数据包从 DAU 传送到 MDMS 中。设 c 为当前中继站，用 $r(c)$ 表示中继站 c 的传输速度。已知信道质量，可以通过计算自适应调制下的多个中继站的频谱效率求出传输速率 $r(c)$ [12, Eq. 5]。

2 系统中的电力需求成本估算和最佳中继传输策略

为了通过协作传输通信系统收集电网数据，以达到社区电网的效率最优目标（成本最小化），本节首先进行社区电力需求和成本估算，然后根据成本最小化原则得出基于博弈论的最佳协作传输策略。

2.1 社区电力需求成本估算

由于不确定性（如随机电力需求），一般来说，一个电力系统的运营决策分两阶段。第一阶段，供电公司根据预期的负载从发电厂预订电量。这一阶段被称为单位承诺，实际操作之前签订合同。第二阶段称为经济调度，即遇到实际的需求后，把预订的电量提供给用户，然而，如果预订的电量不够（即没有预订那么多），就会从可能的发电厂购买额外的电力。因为在单位承诺阶段的协议（即被预订的电量）是事先决定的，供电公司可以选择和购买价格比在经济调度阶段便宜的电。前一个阶段价格用 P_f 表示，后一个用 P_o 表示。通过两个决策阶段，供电公司可以有效地在不确定的情况下调度电力供应给消费者。

MDMS 首先根据 DAU 所传输的电表数据估计所有社区所有

节点的电力需求。这个估计是在估计周期内进行的。然后，根据估计的功率需求，MDMS 在用电周期之前决定单位承诺阶段的电力储备量和在经济调度阶段购买的额外电力供应量。

对于电力需求估计，在估计阶段一个服务区域的每个节点通过 DAU 发送一个电量消耗的样本（即电力需求信息）到 MDMS。所有样品数据被聚合起来，并且电力消费期间服务区域的电力需求总量由 MDMS 计算。在社区 m 里节点 n 的平均电力需求用 $P_{m,n}$ 表示。如果在 DAU 和 MDMS 间数据传输没有丢包（即没有拥塞），估计的电力需求总量用

$$E = D + \alpha = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} P_{m,n} + \alpha \quad (1)$$

其中 $D = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} P_{m,n}$ 是根据电表数据统计而估计的用电量， α 是由于不确定事件引起的电量需求量。例如在夏天，根据天气预报，如果第二天温度升高，可能导致空调用电量增大，则在统计预测的基础上加上一定的额外用电需求 α ，反之，则在统计预测的基础上减去 α ，即 α 可为正也可为负。其他社会因素，如某一电视节目直播、节假日等也会对 α 产生影响。然而，如果在 DAU 中有拥塞并且用 L 表示丢包率（比如由于缺少缓冲间隔），总的能量需求估计为 $\tilde{E}(L) = \tilde{D}(L) + \alpha = (1 - L)D + \alpha$ ，所有节点的数据包丢失概率认为是相同和独立的。在这种情况下，因为 MDMS 缺少完整的数据，丢包导致比较低的能量需求估计。对于电力需求 z ，实际的能量需求是随机的，用 $f(z)$ 来表示电力密度函数（PDF）。在需求估计误差下的（比如因为可能的 DAU 丢包 L ）电费可以从下式获得：

$$C^{pow}(L) = P_f \tilde{E}(L) + \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} P_o \max(0, z - \tilde{E}(L)) f(z) dz \quad (1)$$

E_{\min} 和 E_{\max} 分别是最小和最大的能量需求。在有需求量估计误差时，电费的定义如式 1 所示，它由在单位承诺阶段的预留电量花费（即 $P_f \tilde{E}(L)$ ）和在经济调度阶段额外的电费

$$\left(\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} P_o \max(0, z - \tilde{E}(L)) f(z) dz \right)$$

组成，其中经济调度阶段额外的电量具有可选价格，在单位承诺阶段预留的电量供应没能够满足需求时的才会出现这部分电费。需要注意的是，为了简化电费的计算，电能需求可以离散成一个有限的集合，在这个集合中，公式（1）中的电力需求的概率密度函数的集合，可以用近似的概率质量函数（PMF）的总和来替换。

2.2 中继站的最佳协作传输策略

智能电网中服务区域中的社区可以通过有策略的为 DUA 执行中继传输，理性的进行智能化决策，使他们的成本最小化。例如：考虑图 2 所示的场景，社区 1 的中继站为 DAU 执行中继传输。因此，由于更高的传输速率，DAU 的丢包率将被减少，这将产生较小的需求估计误差以及更少的电费（即，在单位承诺阶段将预留足够的电力供应）。在这种情况下，社区 2 和 3 也受益于社区 1 中继站的中继传输，但不用支付任何费用。由于社区 1 意识到了这个情况，所以即使中继传输会降低他的电费，它可能也不会一直为 DAU 执行中继传输。在这种情况下，由于社区 2 和 3 是理性的，他们必须为 DUA 进行中继传输来提高 MDMS 的决策准确性，降低电费。因此，对所有社区来说，寻找一个为 DUA 执行中继传输的均衡策略是很重要的，以达到他们各自的成本最小化。

在智能电网的一个服务区域中，根据上述的社区之间非合作的情形，非合作博弈模型[13]可以制定如下：玩家是在服务区域中的社区，总的玩家数是 M。社区 m 的策略 x_m 就是为数据包从 DAU 到 MDMS 执行中继传输的概率。玩家的目标是最小化总成本。社区 m 总成本定义为如下：

$$C_m^{tot}(x_m, x_{-m}) = C_m^{pow}(L(x_m, x_{-m})) + C_m^{rel} x_m \quad (2)$$

其中 x_{-m} 是由除了社区 m 以外的其他所有社区的中继站执行中继传输的概率的策略空间。 $C_m^{pow}(L)$ 是仅仅考虑社区 m 中的节点时根据式(1)得到的社区 m 的电费。 C_m^{rel} 是中继传输的花费（例如由于电能消费和中继站的带宽使用）。 $L(x_m, x_{-m})$ 表示根据中继传输的概率所定义的数据丢包率。丢包率可通过下式获得：

$$L(x_m, x_{-m}) = \frac{\sum_{m=1}^M N_m - R(x_1, \dots, x_M)}{\sum_{m=1}^M N_m} \quad (3)$$

其中， $\sum_{m=1}^M N_m$ 表示在估算周期内所生成的、到达 DAU 的电表数据的数据包总数。 $R(x_1, \dots, x_M)$ 是给定所有社区的中继传输概率时 DAU 在每个估算周期内的平均传输速率，它可由所有中继站执行中继传输的概率空间结合中继站的传输速度 $r(c)$ 来求得。

在智能电网中的一个多社区的服务区域，考虑纳什均衡

[14]作为中继传输的非合作博弈模型解决方案。首先，社区 m 的最佳响应策略根据如下得出：

$$x_m^* = \min_{x_m} C_m^{tot}(x_m, x_{-m})。然后当$$

$$C_m^{tot}(x_m^*, x_{-m}^*) \leq C_m^{tot}(x_m, x_{-m}^*), \forall m \in M \text{ 时，纳什}$$

均衡被定义为 x_m^* ，即，纳什均衡是所有策略里是自身成本最小的一个，根据如下获得：

$$x_m^* = \min_{x_m} C_m^{tot}(x_m, x_{-m}^*)，其中，x_{-m}^* 是社区 m 以$$

外的其他所有的社区的最佳响应策略的策略空间。在纳什均衡中，如果其他社区保持他们的中继策略不变，那么没有社区可以通过改变中继传输概率来降低方程 2 所定义的单个总费用。数值方法（比如单纯性算法[15]）可以用于获得最佳响应策略和随后的纳什均衡。

通过分析可知，在本文所述系统中，智能电网中多个社区的中继站可以通过执行中继传输来提高 DAU 性能，避免数据传输中的拥塞和丢包，从而为系统中心（MDMS）的决策提供更准确的基础数据，做出合理的调度，这将带来更低的总成本；中继站可以策略性的调整中继传输的概率来获得最低的成本。此模型存在许多纳什均衡点，我们假设中继站能够沿着纳什均衡搜索，并且选择能够为所有中继站产生最低成本的方案，即均衡选择可以用于得到最佳解决方案。

3 系统在智能电网中的应用

综上所述，本系统包括三大部分，即数据采集终端、传输网络和信息处理与控制中心。数据采集终端包括各种装有传感器和处理器的家用电器、室内终端、智能电表和控制设备等，它负责用户用电的原始数据的采集工作。传输网络包括如前所述的家域网、邻域网和广域网，它负责把各种电网数据传输给信息处理与控制中心，特别的，在广域网传输过程中，本系统通过中继站按策略地来执行协作传输，来保证数据通信的可靠性，并使成本最小化。电网数据管理系统

（MDMS）为本系统的信息处理中心，是整个系统的控制中心。它对收到的电网数据进行分析，做出配电、发电的决策，并把决策结果反馈给配电站、分布式发电站等电网中的节点进行执行。图 3 为系统通信结构示意图。

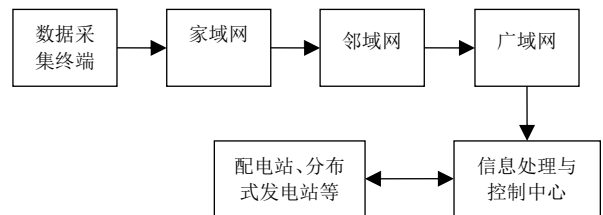


图3 系统通信结构示意图

本系统首先对中继站所在社区的用电成本进行估算，根据成本最小化原则得出中继站执行协作传输的最佳策略（执行中继传输的概率），各社区中继站按策略为DAU执行中继传输，以避免数据拥塞和丢包，并使各自的成本最小化。然后系统中心根据收到的电网数据进行分析和决策，将决策结果反馈到电网中的各发电、配电节点（如配电站和分布式发电站等）并执行，根据决策结果实现对电网资源的科学调度，其工作流程如图4所示。

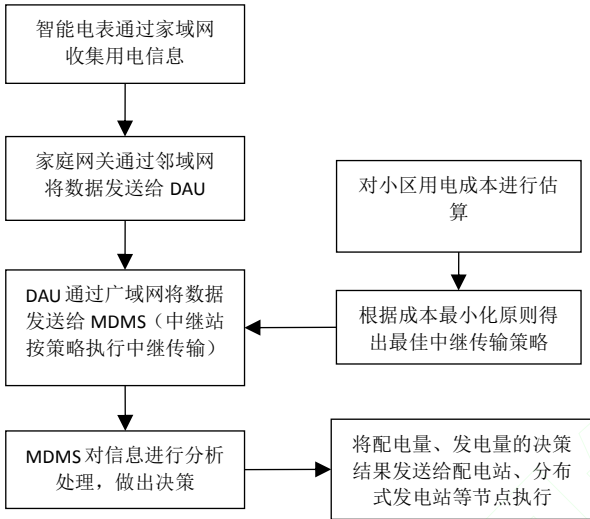


图4 系统工作流程

4 总结

物联网技术的发展催生了智能电网的建设，各种通信、信息技术被应用于智能电网中，以实现科学的电力资源调度。针对智能电网数据传输的要求。本文设计了一种用于智能电网中数据传输的通信系统，首先构建智能电网通信网络模型，将网络分为家域网、邻域网和广域网；然后建立了中继传输的网络模型，并评估电力需求和成本，根据成本最小化原则确立中继站的最佳传输策略（执行中继传输的概率）；特别的，本系统利用中继站进行协作传输，可以提高智能电网数据传输的速率和可靠性，改善网络性能，避免数据拥塞和丢包，利用纳什均衡结果作为中继站最佳传输策略；最后，本系统的信息处理中心通过对电网数据进行处理、分析，最终作出科学决策，实现输配电方面的科学调度，获得最大的效益。

参考文献:

[1] EC Research. European Smart Grids Technology Platform Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. EUROPEAN COMMISSION, 2006. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf.
[2] 邓晓智. 浅谈通信技术在智能电网中的应用[J]. 信息通信, 2014 (1):

243.

[3] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (17): 10-15.
[4] S. Senthuran, A. Anpalagan, and O. Das. Cooperative Subcarrier and Power Allocation for A Two-Hop Decode-and-Forward OFCMD Based Relay Network[J]. IEEE Trans. Wireless Commun. 2009, 8 (9): 4797-4805.
[5] L. Le and E. Hossain, Cross-Layer Optimization Frameworks For Multihop Wireless Networks Using Cooperative Diversity[J]. IEEE Trans. Wireless Commun. 2008, 7 (7): 2592-2602.
[6] Y. Yang et al. Relay Technologies for WiMax and LTE Advanced Mobile Systems[J]. IEEE Commun. Mag. 2009, 47 (10): 100-105.
[7] 黄毕尧, 郭经红, 权楠, 等. 国家电网公司智能电网 IPv6 应用探讨[J]. 电信科学, 2013, 22(9): 26-31.
[8] Ahmed, Mohammad Helal Uddin. Smart Grid Cooperative Communication with Smart Relay[J]. JOURNAL OF COMMUNICATIONS AND NETWORKS. 2012, 14 (6): 640-652.
[9] 李林江. WLAN 无感知认证关键技术探讨[J]. 电信科学, 2013, 22 (9): 44-50.
[10] 黄秀丽, 张涛, 王玉斐. 电力系统通信中 WWAN 安全研究[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22 (5), 245-249.
[11] 崔正杰, 葛剑飞, 刘南杰. 智能电网中基于排队论的协作传输模型研究[J]. 华东电力, 2013, 41 (11): 2296-2300.
[12] B. Wollenberg, A. Wood. Power Generation, Operation and Control[M]. Wiley-Interscience, 1996: 340-351.
[13] 汪贤裕, 肖玉明. 博弈论及其应用[M]. 北京: 科学出版社,
[14] M. J. Osborne. An Introduction to Game Theory[M], Oxford Univ. Press, 2003: 322-347.
[15] E. K. P. Chong, S. H. Zak. An Introduction to Optimization[M], Wiley-Interscience, 2008: 289-315.
2008: 17-24.

基金项目

国家电网公司科技项目资助基金 (No. 52090F135015)、国家重点基础研究发展计划(973 计划) (No. 2013CB329005)、国家自然科学基金 (No. 61302100, 61201162)、中国博士后研究基金 (No. 2013M531391)、教育部博士点基金 (No. 20133223120002)、江苏省博士后研究基金 (No. 1202083C)

作者信息:

崔正杰 (1988-), 男, 汉族, 安徽亳州人, 南京邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为无线网络与物联网技术。

刘南杰 (1956-), 男, 天津人, 博士, 南京邮电大学教授, 硕士生导师, 南京邮电大学网络基因工程研究所所长, 教育部工程研究中心副主任, 物联网研究院副院长, 江苏省

南亿迪纳数字科技发展有限公司 CEO、首席科学家，主要研究方向为泛在通信、物联网技术，

倪振华，男，1966 年出生于上海，高级工程师，主要从事电力通信、信息及自动化工作。

赵海涛（1983-），男，山东潍坊人，博士，南京邮电大学副教授、网络基因工程研究所所长助理，主要研究方向为无线网络与泛在通信。

