

QoS 驱动的电力通信网效用最大化资源分配机制^①

李 敏, 许振飞, 许崇志, 年安君

(国网蚌埠供电公司 信通公司, 蚌埠 233000)

通讯作者: 李 敏, E-mail: 544891117@qq.com

摘 要: 智能电网业务的多样性和对 QoS 的不同需求, 是电力通信网资源分配时急需解决的问题. 网络虚拟化是网络转型的关键技术, 在保障业务 QoS 和提高资源利用率方面具有非常大的优势. 本文基于网络虚拟化技术, 对 QoS 驱动的电力通信网资源分配问题进行了形式化的描述, 提出了基于三方博弈的两阶段资源分配模型. 基于此模型, 提出一种 QoS 驱动的电力通信网效用最大化的资源分配机制. 通过对提出的资源分配机制的分配策略性能分析, 证明了本文提出的资源分配机制满足占优策略激励兼容特性, 并且可以实现系统利润最大化的目标. 通过仿真实验, 验证了本文提出的机制能够实现电力通信网的效用最大化, 提高了电力通信网的资源利用率.

关键词: 网络虚拟化; 电力通信网; 资源分配; 拍卖

引用格式: 李敏, 许振飞, 许崇志, 年安君. QoS 驱动的电力通信网效用最大化资源分配机制. 计算机系统应用, 2018, 27(7): 265-271. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6292.html>

QoS-Driven Utility Maximizing Resource Allocation Mechanism for Power Communication Network

LI Min, XU Zhen-Fei, XU Chong-Zhi, NIAN An-Jun

(Information & Telecommunication Company, State Grid Bengbu Electric Power Company, Bengbu 233000, China)

Abstract: The diversity of Smart Grid services and the different QoS requirements are the urgent problems to be solved for allocating resources of power communication network. Network virtualization is the key technology of network transformation, which has a great advantage in ensuring QoS and improving resource utilization. Based on network virtualization technology, this paper describes the problem of QoS-driven resource allocation for power communication network and proposes a two-stage resource allocation model based on tripartite game, and then QoS-Driven Utility Maximizing Resource Allocation Mechanism (QDUMRAM) is proposed. It is proved that the QDUMRAM satisfies the compatibility of the dominant strategy and can achieve the goal of maximizing the system profit. Simulation results show that the QDUMRAM can maximize the utility and improve the resource utilization rate for the power communication network.

Key words: network virtualization; power communication network; resource allocation; auction

引言

随着智能电网研究和应用的快速发展, 电力通信网在电力行业中的作用越来越重要. 当前, 电力通信网主要由底层物理网络、上层业务逻辑网络构成^[1]. 其中, 底层物理网络主要由光纤通信网构成, 并辅

以微波、卫星等传输方式. 上层业务逻辑网络主要由路由器、交换机等数字通信网络构成, 完成电力调度及业务的实时控制. 电力通信逻辑网络承载的业务主要包括配网保护、配电网视频监控、配网运行状态检测、用电信息采集自动化等电力通信业务, 各类业务对网

① 收稿时间: 2017-07-18; 修改时间: 2017-08-04; 采用时间: 2017-08-14; csa 在线出版时间: 2018-06-27

络延迟、带宽、网络可靠性等要求不同^[2]。

上层业务逻辑网络的稳定运营,对于电力业务的稳定运行起着非常关键的作用。但是,当前电力系统固有的底层物理网络的光纤覆盖水平较低,还存在光纤芯数紧张,资源不足的情况,还有较多地区的底层物理网络采用租用第三方光纤实现电力通信的问题。为解决这些问题,已有部分研究提出一些解决方法^[3-5]。文献[3,4]研究均衡电力通信网络的经济性、可靠性和业务分布,以最小的代价建设最可靠的电力通信网。文献[5]制定了不同优先级的 QoS 差异化策略。但是,这几种 QoS 保障机制只适用于传统网络。网络虚拟化技术是当前网络转型的关键技术,在 QoS 保障方面具有较大优势^[6-10]。网络虚拟化环境下,电力通信网包括基础设施提供商 (Infrastructure Providers, InPs) 和服务提供商 (Service Providers, SPs)。其中 InPs 创造和管理基础网络,包含计算节点、链路资源等物理资源。而 SPs 根据电力通信业务的需求,为业务提供差异性服务。文献[11]通过提高休眠节点和链路数量,提高底层网络资源的利用率。文献[12]采用隐马尔科夫模型描述满足资源约束的可用的底层网络节点拓扑信息。文献[13]建立了高效节能节点映射运输模型。文献[14]用概率理论辅助分析了每个虚拟节点的多个可用物理节点被选中的概率。上述的虚拟化资源分配主要解决提高底层节点或链路资源利用率的问题,缺少对多个服务提供商和多个基础设施提供商环境下电力通信网络的带宽容量、资源成本、资源价格等 QoS 要素的综合考虑,不能很好的解决电力通信网在 QoS 驱动的资源分配时面临的问题。

为了有效地保证智能电网中业务的隔离性和解决智能电网资源高效分配问题,该文借助网络虚拟化技术,首先对 QoS 驱动的 SP 资源分配问题进行了形式化的描述,提出了基于三方博弈的两阶段资源分配模型。该模型通过引入一类“资源分配中心”实体,将资源分配问题转化为由资源提供者、资源请求者、资源分配中心三方组成的博弈过程。基于这个资源分配模型,提出一种 QoS 驱动的电力通信网效用最大化的资源分配机制。通过对提出的资源分配机制的分配策略性能分析,证明了本文提出的资源分配机制满足占优策略激励兼容特性,并且可以实现系统利润最大化的目标。最后,通过仿真实验,验证了本文的资源分配机制的有效性。

1 问题描述

设 InP 集合为 $I_{InP} = \{InP_1, InP_2, \dots, InP_i\}$, InP_i 为 SP 提供计算资源和链路资源。设 InP_i 的计算资源的固定平均成本为 $f_{InP_i}^c$, 计算资源的单位成本为 $u_{InP_i}^c$, 计算资源的最大容量为 $CP_{InP_i}^c$ 。 InP_i 的链路资源的固定平均成本为 $f_{InP_i}^e$, 链路资源的单位成本为 $u_{InP_i}^e$, 链路资源的最大容量为 $CP_{InP_i}^e$ 。当 InP_i 的市场上的计算资源供给量为 $y_{InP_i}^c$, 链路资源供给量为 $y_{InP_i}^e$ 时, InP_i 消耗的成本 C_{InP_i} 为:

$$C_{InP_i} = \begin{cases} 0 & y_{InP_i}^c = 0, y_{InP_i}^e = 0 \\ f_{InP_i}^c + y_{InP_i}^c \times u_{InP_i}^c + & 0 < y_{InP_i}^c \leq CP_{InP_i}^c \\ f_{InP_i}^e + y_{InP_i}^e \times u_{InP_i}^e & 0 < y_{InP_i}^e \leq CP_{InP_i}^e \end{cases} \quad (1)$$

设 SP 集合为 $I_{SP} = \{SP_1, SP_2, \dots, SP_j\}$, SP_j 为用户提供服务,需要使用 InP_i 提供的计算资源和链路资源。设 SP_j 的计算资源需求量为 $y_{SP_j}^c$, 链路资源需求量为 $y_{SP_j}^e$ 时,对于每一单位资源, InP_i 的利润为实际交易的价格减去成本。所以, QoS 驱动的最优的资源分配问题就是 InP_i 在确保满足 SP_j 的 QoS 要求的前提下,使 InP_i 消耗的总成本最小。

$$\mathbf{X}^* = \arg \min_{\mathbf{X}} \sum_i \{(\lambda_i f_{InP_i}^c + y_{InP_i}^c \times u_{InP_i}^c) + (\gamma_i f_{InP_i}^e + y_{InP_i}^e \times u_{InP_i}^e)\} \quad (2)$$

$$\sum_j y_{SP_j}^c = \sum_i y_{InP_i}^c, \quad \sum_j y_{SP_j}^e = \sum_i y_{InP_i}^e \quad (3)$$

$$y_{InP_i}^c \leq CP_{InP_i}^c, \quad y_{InP_i}^e \leq CP_{InP_i}^e \quad (4)$$

$$\lambda_i = \begin{cases} 1, & y_{InP_i}^c > 0 \\ 0, & y_{InP_i}^c = 0 \end{cases}, \quad \gamma_i = \begin{cases} 1, & y_{InP_i}^e > 0 \\ 0, & y_{InP_i}^e = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示资源分配时, n 个 InP 的资源供给量信息。 $\mathbf{X}^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$ 表示最优资源分配情况下 InP 的资源供给量。式 (3) 表示 InP_i 总的计算资源和带宽资源供给量等于 SP_j 总的计算资源和带宽资源需求量。式 (4) 表示 InP_i 的计算资源和带宽资源的供给量都不大于计算资源和带宽资源的最大容量。式 (5) 说明 InP_i 的供给量大于 0 时,才会产生固定成本。

2 QoS 驱动的资源分配机制

根据 QoS 驱动的资源分配问题的形式化描述,本小节首先提出了基于三方博弈的两阶段资源分配模型。其次,基于这个资源分配模型, QoS 驱动的资源分配机

制被提出. 最后, 通过对提出的资源分配机制的分配策略性能分析, 证明了本文提出的资源分配机制的有效性.

2.1 资源分配模型

由于拍卖机制可操作性强, 可使资源在短时间内被合理分配, 获得系统范围内最优解或较优解^[15-17]. 拍卖机制已被成功应用到网络资源分配^[18-20]. 本文提出的基于三方博弈的两阶段资源分配模型如图 1 所示, 该模型通过引入一类“资源分配中心”实体, 将电力通信网的资源分配问题转化为由资源提供者、资源请求者、资源分配中心三方组成的博弈过程. 模型主要包括 InP Agent 模块、SP Agent 模块、资源分配中心 Agent 模块.

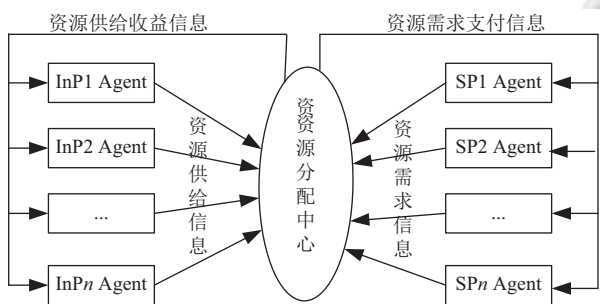


图 1 基于三方博弈的两阶段资源分配模型

资源分配时, 在第一阶段, InP Agent 向资源分配中心上报资源供给信息, SP Agent 向资源分配中心提出资源需求信息. 在第二阶段, 资源分配中心使用资源分配机制, 执行资源分配, 并向 SP Agent 返回资源需求的支付信息, 向 InP Agent 返回资源供给的效用信息.

2.2 InP 效用函数

InP 的效用为销售计算资源和带宽资源带来的收益. 如果 InP 能够被激励上报自己资源的真实情况, 资源分配中心才能够求解出真实的资源分配情况, 否则, 会出现资源分配错误. 例如, 假设 InP 的计算资源容量为 150 个, 但是 InP 出于自私的目的, 误报自己的计算资源容量为 200 个, 当资源分配中心为其分配 180 个计算资源请求时, 由于 InP 不能提供 SP 120 个计算资源, 导致资源分配失败, 影响资源分配中心和 InP 的市场信誉. 为了使 InP 能够被激励上报自己资源的真实情况, 本文定义 QoS 驱动 InP 的效用函数为:

$$U_i(x_i, R_i, \theta_i) = R_i - C_i(x_i, \theta_i) - P_i \quad (6)$$

其中 $\theta_i = (\widehat{f_{InP_i}^c}, \widehat{u_{InP_i}^c}, \widehat{c_{InP_i}^c}, \widehat{f_{InP_i}^e}, \widehat{u_{InP_i}^e}, \widehat{c_{InP_i}^e})$ 表示 InP_i 上报给资源分配中心的资源供给的相关信息. R_i 表示

InP_i 销售它的 θ_i 类型的资源 $x_i \in \mathbf{x}$ 给 SP 后的收益. $C_i(x_i, \theta_i)$ 表示 InP_i 分配它的 θ_i 类型的资源 $x_i \in \mathbf{x}$ 给 SP 后的花费. P_i 表示 InP_i 谎报自己的资源类型 θ_i 的惩罚.

本文的资源分配机制的目标是: 通过调整每个 InP_i 提供商的效用值, 促使每个 InP_i 说真话. 所以, 对 InP_i, 收益 R_i 被定义为它参加资源分配后, 带来的社会福利.

$$R_i = \min_{\mathbf{x}} \left[\sum_{\substack{y_{InP_j}^c \leq c_{InP_j}^c \\ y_{InP_j}^e \leq c_{InP_j}^e \\ InP_j \in I_{InP} \setminus i}} (\alpha \widehat{f_{InP_j}^c} + \widehat{u_{InP_j}^c} x_j^c + \beta \widehat{f_{InP_j}^e} + \widehat{u_{InP_j}^e} x_j^e) \right] - \left[\sum_{InP_j \in I_{InP}, -i} (\alpha^* \widehat{f_{InP_j}^c} + \widehat{u_{InP_j}^c} x_j^{c*} + \beta \widehat{f_{InP_j}^e} + \widehat{u_{InP_j}^e} x_j^{e*}) \right] \quad (7)$$

其中, x_j^{c*} 表示 InP_i 最优的计算资源分配数量. x_j^{e*} 表示 InP_i 最优的带宽资源分配数量. 公式 (7) 的前半部分表示当 InP_i 不参加资源分配时, 最优资源分配策略的总花费. 公式的后半部分表示当 InP_i 参加资源分配时, 最优资源分配策略的总花费减去 InP_i 的花费. 因此, InP_i 的收益表示 InP_i 参加资源分配后带来的总体花费的减小数值, 并且 InP_i 的收益永远是非负值. 因为参与资源分配的 InP_i 数量的增加, 不会带来最优的资源分配策略的总花费增加.

对 InP_i, 花费的大小与资源的固定成本、分配给 SP 的资源数量、资源的单位价格相关, 本文定义 InP_i 的花费如式 (8) 所示, InP_i 的目标是花费最小.

$$C_i(x_i, \theta_i) = (\lambda_i f_{InP_i}^c + y_{InP_i}^c \times u_{InP_i}^c) + (\gamma_i f_{InP_i}^e + y_{InP_i}^e \times u_{InP_i}^e) \quad (8)$$

为了防止 InP 说谎, 导致资源分配失败, 影响资源分配中心和 InP 的市场信誉. 本文对故意误报资源供给信息的 InP 进行惩罚:

$$P_i = R_i \{ (x_i^{c*} \geq \overline{x_i^c}) \text{ or } (x_i^{e*} \geq \overline{x_i^e}) \} \quad (9)$$

其中, x_i^{c*} 表示 InP_i 被要求分配的计算资源数量. x_i^{e*} 表示 InP_i 被要求分配的链路资源数量. $\overline{x_i^c}$ 表示 InP_i 实际的计算资源数量. $\overline{x_i^e}$ 表示 InP_i 实际的链路资源数量. 式 (9) 表示, 当资源分配中心检测底层网络提供商 InP_i 不能确保其上 SP 业务按 QoS 要求运行时, 资源分配中心会对底层网络提供商进行惩罚. 惩罚强度为 InP_i 被要求分配的计算资源数量和链路资源数量带来的收益值

R_i , 即, InP_i 参加资源分配后带来的社会福利, 如式 (7) 表示.

2.3 QoS 驱动的电力通信网效用最大化的资源分配机制

基于资源分配模型和 InP 效用函数的定义, 本文提出的 QoS 驱动的资源分配机制如下:

1) n 个 InP Agent 向资源分配中心上报资源供给信息 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$;

2) m 个 SP Agent 向资源分配中心提出资源需求信息 $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$;

3) 资源分配中心使用公式 (2), 为每个 SP 需求分配资源, 得到分配向量 $\widehat{\mathbf{x}}^*$;

4) 对每一个 InP_i , 资源分配中心检测它是否能够确保其上 SP 业务按 QoS 要求运行, 如果不能, 则使用式 (9) 对 InP_i 进行惩罚;

5) 资源分配中心使用式 (6) 计算 InP 的效用值, 结算后完成本次交易.

在该机制中, “资源分配中心检测 InP 是否能够确保其上 SP 业务按 QoS 要求运行” 是基于 SP 向资源分配中心的反馈获得, 所以, 说谎话只有当 InP 虚报的容

量不能满足给他分配的资源请求时, 资源分配中心才会发现, 并对其进行惩罚. 在后续研究中, 可以对此机制进行优化, 提高 SP 业务的 QoS.

3 分配策略性能分析

有效的拍卖机制是指每个参与者都可以得到占优策略. 由文献[16]可知, 要实现占优策略, 参与者需要实现激励相容性、资源分配效率两个目标. 其中, 激励相容性是指投标者出于自利的目的, 而投标自己的真实成本函数, 需要证明投标真实估价是所有投标者的占优策略 (使用定理 1 证明)、参与者是个体理性的并且都会积极的参与到拍卖中来 (使用定理 2 证明). 资源分配效率是指实现系统利润的最大化, 可以使用定理 3 证明.

定理 1. 对于每一个交易者的拍卖价格和数量是策略性防伪的 (Strategy-Proof).

证明:

首先证明 InP 上报的固定成本和单位成本是真实的. InP_i 的效用函数最大化表示为:

$$\arg \max_{\theta_i \in \Theta_i} (U_i(\widehat{\theta}_i), \mathbf{x}) = \arg \max_{\theta_i \in \Theta_i} (R_i - C_i(\mathbf{x}, \widehat{\theta}_i) - P_i) = \arg \max_{\theta_i \in \Theta_i} \left(\min_{\mathbf{x}} \sum_{\substack{y_{InP_j}^c \leq c_{InP_j}^c \\ y_{InP_j}^e \leq c_{InP_j}^e \\ InP_j \in I_{InP} \setminus i}} (\alpha \widehat{f}_{InP_j}^c + \widehat{u}_{InP_j}^c x_j^c + \beta \widehat{f}_{InP_j}^e + \widehat{u}_{InP_j}^e x_j^e) \right) - \left[\sum_{InP_j \in I_{InP}, -i} (\alpha^* \widehat{f}_{InP_j}^c + \widehat{u}_{InP_j}^c \widehat{x}_j^{c*} + \beta \widehat{f}_{InP_j}^e + \widehat{u}_{InP_j}^e \widehat{x}_j^{e*}) \right] - (\alpha^* \widehat{f}_{InP_i}^c + \widehat{x}_i^{c*} \times u_{InP_i}^c) - (\beta^* \widehat{f}_{InP_i}^e + \widehat{x}_i^{e*} \times u_{InP_i}^e) - 0$$

因为

$$\left[\min_{\mathbf{x}} \sum_{\substack{y_{InP_j}^c \leq c_{InP_j}^c \\ y_{InP_j}^e \leq c_{InP_j}^e \\ InP_j \in I_{InP} \setminus i}} (\alpha \widehat{f}_{InP_j}^c + \widehat{u}_{InP_j}^c x_j^c + \beta \widehat{f}_{InP_j}^e + \widehat{u}_{InP_j}^e x_j^e) \right]$$

与 InP_i 无关, 所以

$$\left[\sum_{InP_j \in I_{InP}, -i} (\alpha^* \widehat{f}_{InP_j}^c + \widehat{u}_{InP_j}^c \widehat{x}_j^{c*} + \beta \widehat{f}_{InP_j}^e + \widehat{u}_{InP_j}^e \widehat{x}_j^{e*}) \right] = \min_{InP_j \in I_{InP}} \sum_{InP_j \in I_{InP}} (\alpha \widehat{f}_{InP_j}^c + \widehat{u}_{InP_j}^c \widehat{x}_j^{c*} + \beta \widehat{f}_{InP_j}^e + \widehat{u}_{InP_j}^e \widehat{x}_j^{e*}) - (\alpha^* \widehat{f}_{InP_i}^c + \widehat{u}_{InP_i}^c \widehat{x}_i^{c*} + \beta^* \widehat{f}_{InP_i}^e + \widehat{u}_{InP_i}^e \widehat{x}_i^{e*})$$

上式变为:

$$\arg \max_{\theta_i \in \Theta_i} \left(- \min_{InP_j \in I_{InP}} \sum_{InP_j \in I_{InP}} (\alpha \widehat{f}_{InP_j}^c + \widehat{u}_{InP_j}^c \widehat{x}_j^{c*} + \beta \widehat{f}_{InP_j}^e + \widehat{u}_{InP_j}^e \widehat{x}_j^{e*}) + (\alpha^* (\widehat{f}_{InP_i}^c - f_{InP_i}^c) + \widehat{x}_i^{c*} (u_{InP_i}^c - u_{InP_i}^c)) + (\beta^* (\widehat{f}_{InP_i}^e - f_{InP_i}^e) + \widehat{x}_i^{e*} (u_{InP_i}^e - u_{InP_i}^e)) \right)$$

由于第一部分会影响全局的最优资源分配结果, 所以, 资源分配中心会限制单个 InP 对其固定成本和单位价格的误报. 如发现误报的 InP 扰乱市场价格机制, 会将其从交易市场中剔除. 所以, 对于固定成本和单位价格来说, 真实的取值是占优策略.

其次证明每个 InP_i 报真实的容量时, 是最优策略. 当 InP_i 误报自己的容量时, $P_i = R_i \{ (x_i^{c*} \geq \overline{x_i^c}) \text{ or } (x_i^{e*} \geq \overline{x_i^e}) \}$

因为 $R_i > 0$, 所以, $P_i > 0$;

$$\begin{aligned} \arg \max_{\hat{\theta}_i \in \Theta_i} (U_i(\hat{\theta}_i), \mathbf{x}) &= \arg \max_{\hat{\theta}_i \in \Theta_i} (R_i - C_i(\mathbf{x}, \hat{\theta}_i) - P_i) \\ &< \arg \max_{\hat{\theta}_i \in \Theta_i} (R_i - C_i(\mathbf{x}, \hat{\theta}_i)) \end{aligned}$$

所以, 每个 InP 报真实的容量是最优策略.

综上所述, 对于每个 InP, 真实的上报自己的固定成本、单位成本以及容量的策略, 是每个交易者的占优策略.

$$\arg \max_{\hat{\theta}_i \in \Theta_i} \left(\min_{\mathbf{x}} \sum_{\substack{y_{InP_j}^c \leq cp_{InP_j}^c, \\ y_{InP_j}^e \leq cp_{InP_j}^e, \\ InP_j \in I_{InP} \setminus i}} (\alpha \widehat{f}_{InP_j}^c + \widehat{u}_{InP_j}^c x_j^c + \beta \widehat{f}_{InP_j}^e + \widehat{u}_{InP_j}^e x_j^e) - \left[\sum_{InP_j \in I_{InP}, -i} (\alpha^* \widehat{f}_{InP_j}^c + \widehat{u}_{InP_j}^c x_j^{c*} + \beta \widehat{f}_{InP_j}^e + \widehat{u}_{InP_j}^e x_j^{e*}) \right] \right)$$

又因为

$$\left[\sum_{InP_j \in I_{InP}, -i} (\alpha^* \widehat{f}_{InP_j}^c + \widehat{u}_{InP_j}^c x_j^{c*} + \beta \widehat{f}_{InP_j}^e + \widehat{u}_{InP_j}^e x_j^{e*}) \right]$$

的参与者的个数比

$$\left[\min_{\mathbf{x}} \sum_{\substack{y_{InP_j}^c \leq cp_{InP_j}^c, \\ y_{InP_j}^e \leq cp_{InP_j}^e, \\ InP_j \in I_{InP} \setminus i}} (\alpha \widehat{f}_{InP_j}^c + \widehat{u}_{InP_j}^c x_j^c + \beta \widehat{f}_{InP_j}^e + \widehat{u}_{InP_j}^e x_j^e) \right]$$

的参与者的个数多一个 InP_i , 所以, 前者的花费比后者的大, 并且后者的取值还要在总花费中减去 InP_i 的花费, 所以, 效用函数一定取非负值. 所以, 机制是个体理性的.

证毕.

定理 3. 证明机制的分配效率是较高的.

证明:

首先, 式 (2) 的优化目标是实现系统利润最大化, 能够产生比传统资源分配策略更大的交易量, 从而提高了网络资源利用率. 其次, InP 真实的上报自己的价格, 这样 SP 会按照用户的需求, 真实的向 InP 申请资源. 如果 InP 提高自己的价格, SP 必将提高服务价格, 从而导致用户的使用需求降低, 导致市场处于资源过剩状态. 所以, 本文提出的资源分配机制, 有助于提高 InP 资源的使用效率. 因此本文的资源分配机制的分配效率较高.

证毕.

证毕.

定理 2. 每个参与者是个人理性的 (Individual Rational).

证明:

要证明每个参与者是个人理性的, 需要证明参与者的效用函数一直取非负值. 因为每个 InP 上报自己真实的情况, 所以, 效用函数为:

4 仿真

4.1 环境

本文使用 Matlab 环境进行仿真. 仿真中包括 10 个 InP 作为资源供给者, 10 个 SP 作为资源需求者. InP 的固定启动成本 $f_{InP_i}^c$ 和 $f_{InP_i}^e$ 都服从均匀分布 (25, 50), 资源单位成本 $u_{InP_i}^c$ 和 $u_{InP_i}^e$ 都服从均匀分布 (1.5, 2.5), 资源的最大供给量 $cp_{InP_i}^c$ 和 $cp_{InP_i}^e$ 都服从均匀分布 (25, 50). 设定 SP 请求的计算资源容量与链路资源容量数量相同, SP 的资源需求量从初始 600, 步长 50 递增, 直到卖者的总供给量, 随机分布到所有的买者当中.

4.2 评价指标

1) InP 的总效用

InP 的总效用定义为 N 个 InP 的效用值之和.

$$U_{InP} = \sum_{i=1}^N U_i(x_i, R_i, \theta_i) \quad (10)$$

2) InP 的资源平均利用率

InP 的资源平均利用率定义为被使用的 InP 资源数量除以总的 InP 资源数量.

$$R_{InP} = \frac{y_{InP_i}^c + y_{InP_i}^e}{cp_{InP_i}^c + cp_{InP_i}^e} \quad (11)$$

4.3 验证 QoS 驱动的资源分配机制的有效性

QoS 驱动的资源分配机制的有效性, 通过验证 InP Agent 在说谎和说实话两种环境下, InP 市场总效用的变化情况. 从 10 个 InP 中随机选择 h 个 InP 夸大自己的资源容量 t 个, 实现 InP 说谎. 其中 $1 \leq h \leq 3$, $1 \leq t \leq 10$.

1) 说谎和说实话两种环境下 InP 的总效用比较

说谎和说实话两种环境下 InP 的总效用比较如图

2所示。图中X轴表示资源需求量递增,从600开始;Y轴表示InP获得的总效用值。从图2可知,在总需求量变化时,当InP说谎,InP的总效用值都低于InP上报真实容量时的总效用值。所以,在多个网络环境下,本文提出的机制都能保证说真话得到更多的InP的总效用。但是,在个别环境下,说谎话还是能得到较大的InP的总效用。由于说谎话只有当InP虚报的容量不能满足给他分配的资源请求时,资源分配中心会对其进行惩罚。

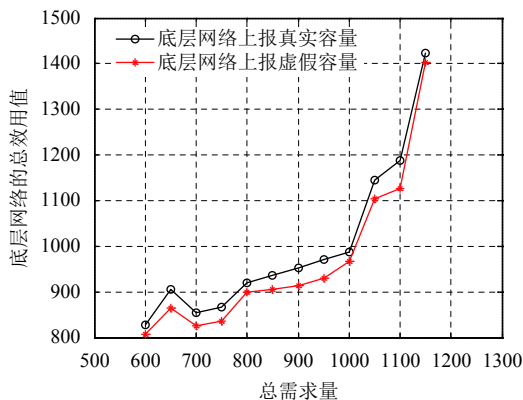


图2 说谎和说实话两种环境下InP的总效用比较

2) 说谎和说实话两种环境下InP的平均利用率

说谎和说实话两种环境下InP的平均利用率比较如图3所示。图中X轴表示资源需求量递增,从600开始;Y轴表示InP的平均利用率。从图3可知,在总需求量变化时,当InP说谎时,InP的平均利用率都低于InP上报真实容量时的平均利用率。所以,在多个网络环境下,本文提出的机制都能保证说真话得到更多的InP的平均利用率。由于本文提出的机制提高了InP的资源利用率,所以,本文的机制可以保证SP得到较好的容量保证。

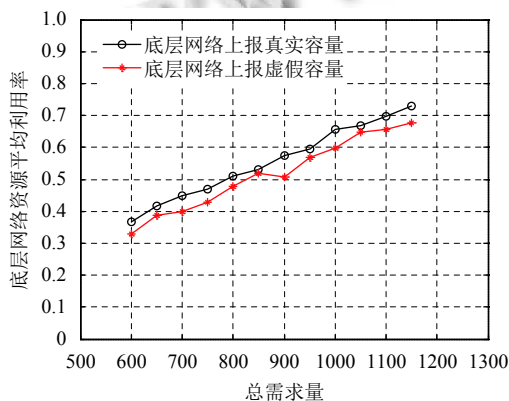


图3 说谎和说实话两种环境下InP资源平均利用率比较

5 结语

随着智能电网的快速发展,电力通信业务需要的带宽容量、资源成本、资源价格等QoS要素在资源分配中越来越重要,仅考虑提高电力通信网络资源利用率的研究已经不能解决这个问题。为了有效地保证智能电网中业务的隔离性和解决智能电网资源高效分配问题,该文借助网络虚拟化技术,首先对QoS驱动的SP资源分配问题进行了形式化的描述,提出了基于三方博弈的两阶段资源分配模型。该模型通过引入一类“资源分配中心”实体,将资源分配问题转化为由资源提供者、资源请求者、资源分配中心三方组成的博弈过程。基于这个资源分配模型,提出一种QoS驱动的电力通信网效用最大化的资源分配机制。对于拍卖者及其获胜者确定占优策略问题,证明了参与者集合能够实现激励相容和系统利润最大化两个目标。最后,通过仿真实验,验证了本文资源分配机制的有效性。

参考文献

- 曹军威,万宇鑫,涂国煜,等.智能电网信息系统体系结构研究.计算机学报,2013,36(1):143-167.
- 孟洛明,孙康,韦磊,等.一种面向电力无线专网的虚拟资源优化分配机制.电子与信息学报,2017,39(7):1711-1718.
- 石悦,邱雪松,郭少勇,等.基于改进遗传算法的电力光传输网规划方法.通信学报,2016,37(1):116-122. [doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2016013]
- Shi Y, Qiu XS, Guo SY. Genetic algorithm-based redundancy optimization method for smart grid communication network. China Communications, 2015, 12(8): 73-84. [doi: 10.1109/CC.2015.7224708]
- Yu R, Zhong WF, Xie S L, et al. QoS differential scheduling in cognitive-radio-based smart grid networks: An adaptive dynamic programming approach. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(2): 435-443. [doi: 10.1109/TNNLS.2015.2411673]
- Matias J, Garay J, Toledo N, et al. Toward an SDN-enabled NFV architecture. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 187-193. [doi: 10.1109/MCOM.2015.7081093]
- Liang CC, Yu FR. Wireless network virtualization: A survey, some research issues and challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 358-380.
- Correa ES, Fletscher LA, Botero JF. Virtual data center embedding: A survey. IEEE Latin America Transactions, 2015, 13(5): 1661-1670. [doi: 10.1109/TLA.2015.7112029]

- 9 Melo M, Sargento S, Killat U, *et al.* Optimal virtual network embedding: Energy aware formulation. *Computer Networks*, 2015, 91: 184–195. [doi: [10.1016/j.comnet.2015.08.011](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.08.011)]
- 10 Guan XJ, Choi BY, Song S. Energy efficient virtual network embedding for green data centers using data center topology and future migration. *Computer Communications*, 2015, 69: 50–59. [doi: [10.1016/j.comcom.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2015.05.003)]
- 11 陈晓华, 李春芝, 陈良育, 等. 主动休眠节点链路的高效节能虚拟网络映射. *软件学报*, 2014, 25(7): 1416–1431.
- 12 刘彩霞, 卢干强, 汤红波, 等. 一种基于 Viterbi 算法的虚拟网络功能自适应部署方法. *电子与信息学报*, 2016, 38(11): 2922–2930.
- 13 陈晓华, 李春芝, 陈良育, 等. 虚拟网络映射高效节能运输模型及算法. *电子学报*, 2016, 44(3): 725–731.
- 14 胡颖, 庄雷, 陈鸿昶, 等. 时间和能量感知的贝叶斯虚拟网络映射. *通信学报*, 2016, 37(6): 106–118. [doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2016105](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2016105)]
- 15 Xia M, Koehler G J, Whinston A B. Pricing combinatorial auctions. *European Journal of Operational Research*, 2004, 154(1): 251–270. [doi: [10.1016/S0377-2217\(02\)00678-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00678-1)]
- 16 Vickrey W. Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders. *Journal of Finance*, 1961, 16(1): 8–37. [doi: [10.1111/j.1540-6261.1961.tb02789.x](https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1961.tb02789.x)]
- 17 Myerson RB. Optimal auction design. *Mathematics of Operations Research*, 1981, 6(1): 58–73. [doi: [10.1287/moor.6.1.58](https://doi.org/10.1287/moor.6.1.58)]
- 18 刘志新, 申妍燕, 关新平. 一种基于 VCG 拍卖的分布式网络资源分配机制. *电子学报*, 2010, 38(8): 1929–1934.
- 19 Bae J, Beigman E, Berry RA, *et al.* Sequential bandwidth and power auctions for distributed spectrum sharing. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(7): 1193–1203. [doi: [10.1109/JSAC.2008.080916](https://doi.org/10.1109/JSAC.2008.080916)]
- 20 Fu FW, Kozat UC. Wireless network virtualization as a sequential auction game. *Proceedings of 2010 IEEE INFOCOM*. San Diego, CA, USA. 2010.