

面向配电网高频采集的通信资源智能编排技术

路韬, 张捷, 张永旺, 陈鹏, 刘日荣, 张科, 李嘉杰

(广东电网有限责任公司计量中心, 广东 清远 511500)

摘要: 高比例新能源接入背景下配电网高频采集业务发展迅速, 接入终端数量与业务采集量激增, 对配电网数据采集、传输与处理能力提出了更高要求。因此, 提出了面向配电网高频采集的通信资源智能编排技术。首先, 构建面向配电网高频采集的通信资源智能编排框架。其次, 在考虑高频采集业务对时延与能耗敏感性的基础上建立以满足差异化业务需求为目标的优化模型。最后, 针对终端决策耦合、网关选择冲突等问题, 提出基于业务差异性感知的通信资源智能编排算法, 通过改进的单边匹配实现配电网高频采集业务差异化需求保障, 避免计算资源浪费。仿真结果表明所提算法相较于对比算法终端平均能耗分别降低 58.54% 和 73.98%, 平均数据处理时延分别降低 51.99% 和 69.93%。

关键词: 配电网; 高频采集; 业务差异性感知; 智能编排; 单边匹配

Intelligent Scheduling Technology of Communication Resource for High Frequency Collection in Distribution Networks

LU Tao, ZHANG Jie, ZHANG Yongwang, CHEN Peng, LIU Rirong, ZHANG Ke, LI Jiajie

(Metrology Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Qingyuan, Guangdong 511500, China)

Abstract: Under the background of high proportion of new energy access, the development of high frequency distribution data collection business is rapid, and the number of access terminals and business collection volume has surged, which puts higher requirements on the data collection, transmission, and processing capabilities of distribution networks. Therefore, a communication resource intelligent scheduling technology for high frequency collection in distribution networks is proposed. Firstly, a communication resource intelligent scheduling framework is constructed for high frequency collection in distribution networks. Secondly, based on considering the sensitivity of high frequency connection services to latency and energy consumption, an optimization model is established with the goal of meeting differentiated business requirements. Finally, in response to issues such as terminal decision coupling and gateway selection conflicts, a communication resource intelligent scheduling algorithm based on business differentiation awareness is proposed. Through improved unilateral matching, the differentiated demand guarantee of high frequency collection business in distribution networks is achieved, avoiding the waste of computing resources. The simulation results show that the proposed algorithm reduces the average energy consumption of terminals by 58.54% and 73.98% respectively, and reduces the average data processing latency by 51.99% and 69.93% respectively compared to the comparative algorithm.

Key words: distribution network; high frequency collection; service differentiation awareness; intelligent scheduling; unilateral matching

0 引言

在风电、光伏等新能源高比例接入背景下分布式资源与配电网间的双向互动频次大幅增加, 配电网业务数据采集朝着高频次方向发展^[1-3]。此外,

设备状态全景监测、碳足迹监测、负荷精准控制、需求响应等新兴配网业务数据采集量庞大, 并且对时延、能耗等方面提出了差异化需求。然而, 传统配电网基于云计算框架处理业务数据、配电网主站通信、计算资源配置难以支撑业务采集数据爆发式

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFE0118400); 中国南方电网有限责任公司科技项目(035900KK52220012, GDKJXM20220909)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFE0118400); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(035900KK52220012, GDKJXM20220909)。

增长。如何对通信资源进行智能化编排,保障配电网高频采集业务差异化服务质量(quality of service, QoS)需求成为亟需解决的问题。

边缘计算将计算资源下沉至网络边缘侧,通过业务数据就近卸载显著提高配电网高频采集数据传输处理能力^[4-6]。文献[7]针对智能电表差异化供电监测响应时延要求,提出了基于边缘计算的配电网高频同步数据采集架构,通过多跳无线网络提升了配电网用电信息采集效率。文献[8]提出了配电台区分钟级数据同频采集策略,通过部署边缘计算设备实现台区采集数据共享共用。然而,配网终端设备到边缘网关之间本地通信环境复杂时不同服务器的信道质量差异明显,业务与信道不匹配导致配电网 QoS 难以保障^[9-12]。

为实现高频采集场景下通信资源的协调管理从而满足配电网业务 QoS 需求,相关学者进行了智能化通信资源编排技术研究。文献[13]提出了配电网业务耦合的边缘计算业务卸载方法,采用 K-means 算法求解终端部署与任务卸载双层优化问题,实现了业务通信资源供需平衡与多终端协同。文献[14]提出了卸载成本感知的配电网通信资源调度方法,通过最小化网络卸载成本实现配电网高效云边协同。然而,高比例新能源接入场景下配电网业务对时延、能耗等方面要求各异,上述文献未考虑配电网业务差异化需求对编排决策的影响,不适用于配电网多业务共存情况下通信资源智能编排。

在差异化需求保障方面,文献[15]分析了配电网各种类型的业务在时延、吞吐量、能耗等 QoS 指标下的差异化需求,在兼顾能耗的同时以增加传输功率的方式减小传输时延。文献[16]考虑基于边缘计算的电力无线传感网场景下业务 QoS 差异化需求,提出了一种边缘增强分布式电力无线传感网资源分配机制,有效降低平均访问时延与能耗。然而,实际配电网场景信道与接入网关选择相耦合,上述文献仅从业务数据传输或处理单一角度考虑网络编排决策,未对通信资源的联合分配加以分析。文献[17]提出联合资源分配的动态任务卸载方案,联合优化时延、能耗与风险,优化终端任务卸载决策。文献[18]提出基于博弈论的联合优化算法,对卸载模式选择、卸载份额分配和资源分配进行联合优化,显著降低总延迟。然而,配电网高频采集场景下配电网终端海量并发任务传输与卸载需求导致

多设备之间存在决策耦合和竞争冲突,上述文献未考虑终端与边缘网关之间的双向选择,导致部分服务器接收卸载需求数量超过其配额,限制了网络整体编排效用的提升。

匹配理论可以通过设置偏好列表在配电网差异化业务与通信方式之间建立稳定的匹配关系,对多主体之间的选择冲突问题加以优化。文献[19]提出一对一匹配算法来优化多种无线通信方式共存场景下许可与未许可频段的通信资源分配,但忽略了终端设备间由于决策耦合而导致的资源竞争问题。文献[20]提出了一种改进转移匹配算法进行资源分配,通过用户不断交换匹配资源从而形成稳定转移匹配,降低了网络时延。文献[21]提出了一种基于三维配额匹配的延迟敏感任务卸载算法,通过将采用设备、网关和通道之间的三维匹配问题转化为双向配额匹配问题,以最小化能耗与设备吞吐量之间的加权差。然而,上述文献没有分析配电业务在时延与能耗性能上的需求差异性,并且未考虑数据采集频次长时约束,无法实现高频采集场景下配电网多业务差异性通信保障。

针对上述挑战,本文提出了面向配电网高频采集的通信资源智能编排技术。首先,搭建了面向配电网高频采集的通信资源智能编排框架,支撑了配电网高频采集业务数据采集、传输与处理;其次,分析了多类型配电网高频采集业务对能耗与时延的差异化需求,建立了在满足数据采集频次长时约束前提下以保障业务差异化需求为目标的优化问题;最后,提出了一种基于业务差异性感知的智能化通信资源编排技术,对终端-采集频次-网关进行降维匹配,并通过配额可变的单边匹配算法将匹配数量比配额偏小的网关调节至与实际数量一致,保障了配电网通信资源的充分利用。

1 模型构建

1.1 系统模型

图 1 为面向配电网高频采集的通信资源智能编排框架,包括通信编排主站层、边缘接入网关层以及终端层。其中,通信编排主站层负责收集网络状态信息,并下发相应的通信资源编排策略;边缘接入网关层汇聚终端层业务数据,边缘网关根据主站下发的卸载决策对业务数据进行实时处理,网关集

合表示为 $\mathcal{G} = \{G_1, \dots, G_n, \dots, G_N\}$, N 为网关数量; 终端层包括分布式电源、箱式变压器、负荷开关、储能等配电网主体运行设备及安装在各个设备附近的采集终端, 终端高频采集配电网电力数据并将数据以无线通信的方式传输至网关, 定义采集终端集合为 $\mathcal{D} = \{D_1, \dots, D_m, \dots, D_M\}$, M 为采集终端数量。本文引入时隙模型描述配电网高频采集的通信资源编排过程, 时隙集合为 $\mathcal{T} = \{1, \dots, t, \dots, T\}$, 其中 T 为时隙数量, 网络状态和卸载决策在单个时隙内不变, 在不同时隙间动态变化^[22]。定义网关选择决策变量 $x_{m,n}(t) \in \{0, 1\}$, $x_{m,n}(t) = 1$ 表示终端 D_m 将数据传输至边缘网关 G_n , 否则 $x_{m,n}(t) = 0$ 。由于采集终端天线数量有限, 每个终端单次只能选择一个边缘网关卸载数据, 即:

$$\sum_{n=1}^N x_{m,n}(t) \leq 1 \quad (1)$$

由于每个边缘网关配置的无线通信端口数量有限, 因此每个时隙所能接受的终端数量有限, 即:

$$\sum_{m=1}^M x_{m,n}(t) \leq Z_n^{\text{WL}} \quad (2)$$

式中 Z_n^{WL} 为边缘网关 G_n 的无线端口数量, 上标 WL 为 wireless 的简称。

定义采集频次选择变量 $y_{m,k}(t) \in \{0, 1\}$, 其中 $k = 0, 1, \dots, K$, K 为采集数量, $y_{m,k}(t) = 1$ 表示该时隙内终端 D_m 选择采集频次为 k , 其他频次下

$y_{m,k}(t) = 0$ 。为保障配电网业务数据高频采集有条不紊地进行, 每个时隙每个终端只能选一个频次进行数据采集, 即:

$$\sum_{k=0}^K y_{m,k}(t) \leq 1 \quad (3)$$

每个终端单次采集的数据量为 $A_{m,0}$, 则每个终端在 t 时隙内产生的业务数据量 $A_m(t)$ 为:

$$A_m(t) = \sum_{k=0}^K y_{m,k}(t) k A_{m,0} \quad (4)$$

配电网高频采集场景下终端每时隙平均采集数据量只有高于业务开展所需最小的数据量, 主站层才能分析结果并支撑对应业务运行, 因此设置高频采集业务的平均采集数据量约束为:

$$\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T A_m(t) \geq A_{m,\min} \quad (5)$$

式中 $A_{m,\min}$ 为配电网高频采集场景下业务开展所需最小的数据量。

1.2 传输模型

当终端 D_m 以无线通信方式进行数据卸载时, 终端 D_m 与网关 G_n 之间的无线信道传输速率 $R_{m,n}(t)$ 为^[23-24]:

$$R_{m,n}(t) = B_{m,n}(t) \log_2 \left(1 + \frac{P_m(t) V_{m,n}(t)}{N_0 + \delta_{m,n}(t)} \right) \quad (6)$$

式中: $B_{m,n}(t)$ 、 $P_m(t)$ 、 $V_{m,n}(t)$ 和 $\delta_{m,n}(t)$ 分别为终端 D_m 到网关 G_n 的无线信道带宽、信号发射功率、信

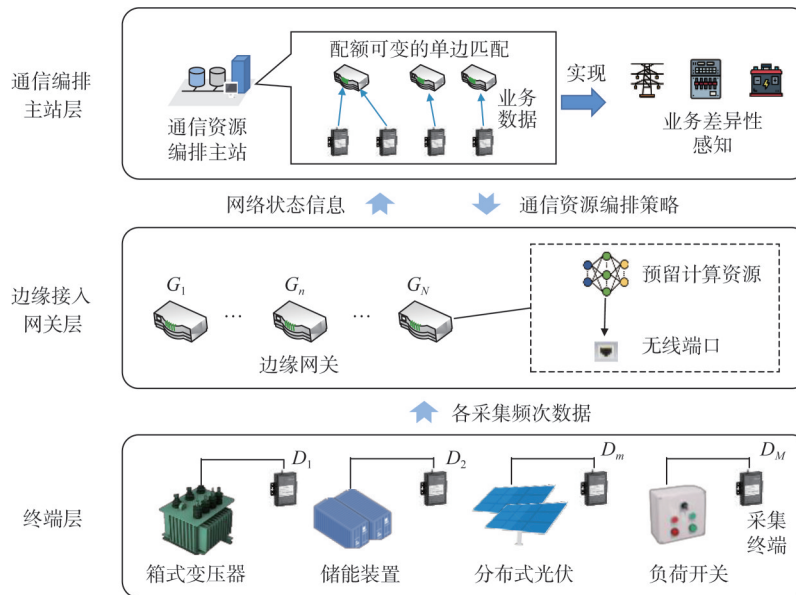


图1 面向配电网高频采集的通信资源智能编排框架

Fig. 1 Intelligent scheduling framework of communication resource for high frequency collection in distribution networks

道增益以及电磁干扰； N_0 为加性高斯白噪声功率密度。

则终端 D_m 到网关 G_n 的传输时延 $\tau_{m,n}^{\text{trans}}(t)$ 为：

$$\tau_{m,n}^{\text{trans}}(t) = \frac{A_m(t)}{R_{m,n}(t)} \quad (7)$$

对应的传输能耗 $E_{m,n}^{\text{trans}}(t)$ 为：

$$E_{m,n}^{\text{trans}}(t) = P_m(t) \tau_{m,n}^{\text{trans}}(t) \quad (8)$$

1.3 计算模型

时隙 t 内每个边缘网关均有一定的空闲计算资源 $\phi_n(t)$ ，边缘网关将空闲资源均分给当前时隙接入的所有采集数据，在数据传输初期，边缘网关给所有的端口均预留计算资源 $\bar{\phi}_n(t)$ 。

$$\bar{\phi}_n(t) = \frac{\phi_n(t)}{Z_n^{\text{WL}}} \quad (9)$$

因此，终端 D_m 选择网关 G_n 时的业务数据处理时延 $\tau_{m,n}^{\text{com}}(t)$ 为：

$$\tau_{m,n}^{\text{com}}(t) = \frac{A_m(t) \lambda_m(t)}{\bar{\phi}_n(t)} \quad (10)$$

式中 $\lambda_m(t)$ 为时隙 t 时终端 D_m 业务数据的计算复杂度，用每比特所需CPU频率数表示。

1.4 问题构建

综上所述，终端的数据传输与处理总时延 $\tau_m(t)$ 与总能耗 $E_m(t)$ 为：

$$\tau_m(t) = \sum_{n=1}^N x_{m,n}(t) [\tau_{m,n}^{\text{trans}}(t) + \tau_{m,n}^{\text{com}}(t)] \quad (11)$$

$$E_m(t) = \sum_{n=1}^N x_{m,n}(t) E_{m,n}^{\text{trans}}(t) \quad (12)$$

式中 N 为网关数量。

面向配电网高频采集场景，为了实现多种配电网高频采集业务并发接入场景下的时延和能耗联合优化。本文将优化目标设置为最小化单个时隙内每个终端业务数据处理时延和能耗的加权和，即：

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\{x_{m,n}(t)\}, \{y_{m,k}(t)\}} \sum_{m=1}^M [\tau_m(t) + \omega_m E_m(t)] \\ \text{s.t. } C_1: \sum_{n=1}^N x_{m,n}(t) \leq 1, \forall D_m \in \mathcal{D}, \forall G_n \in \mathcal{G} \\ C_2: \sum_{k=0}^K y_{m,k}(t) \leq 1, \forall D_m \in \mathcal{D} \\ C_3: \sum_{k=0}^K \sum_{m=1}^M x_{m,n}(t) y_{m,k}(t) \leq Z_n^{\text{WL}}, \forall G_n \in \mathcal{G} \\ C_4: \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T A_m(t) \geq A_{m,\min}, \forall D_m \in \mathcal{D} \end{array} \right. \quad (13)$$

式中： ω_m 为衡量业务对于时延和能耗的差异化性能需求的变量，分为能耗敏感业务、时延敏感业务、一般业务三类； $A_{m,\min}$ 为支撑业务开展所需最小采集数据量； C_1 为网关选择约束； C_2 为采集频次选择约束； C_3 为每个边缘网关无线通信端口的配额约束； C_4 为高频采集业务的平均采集数据量约束； M 为终端数量； $\mathcal{D}$ 为所有终端的集合； $\mathcal{G}$ 为所有网关的集合。

2 基于业务差异性感知的通信资源智能编排算法

2.1 问题转化

为降低时延和能耗，终端往往倾向于采集更少的数据，导致平均采集数据量、网关通信端口与计算资源配额约束无法被满足。因此，本文将平均采集数据量约束 C_4 转化为虚拟队列 $Q_m(t)$ ^[25]，用来表示当前高频采集业务数据量偏离平均采集数据量约束的程度，值越大偏离程度越高，在后续优化中应对该终端业务数据采集量加以提高。虚拟队列更新公式为：

$$Q_m(t+1) = \max\{Q_m(t) + A_{m,\min} - A_m(t), 0\} \quad (14)$$

优化问题P1涉及到高频采集终端、边缘网关与采集频次之间的相互选择，由于网关通信端口和计算资源配额的限制以及高频采集业务差异性采集频次需求的影响。因此，将原优化问题转化为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\{x_{m,n}(t)\}, \{y_{m,k}(t)\}} \sum_{m=1}^M [\tau_m(t) + \omega_m E_m(t) - Q_m(t) A_m(t)] \\ \text{s.t. } C_1 - C_3 \end{array} \right. \quad (15)$$

2.2 算法设计

然而，优化问题式(15)仍然难以通过传统凸优化的方法加以解决。匹配理论考虑个体偏好，能够用于指导设计参与个体之间的资源匹配机制，以实现智能化通信资源编排。基于匹配理论^[26]，本文将优化问题式(15)等价于高频采集终端、边缘网关与采集频次选择之间的三维匹配问题，每个终端根据自身时延与能耗的需求选择边缘网关及相应的采集频次，并进行业务数据传输。然而，求解三维匹配需要大量繁琐步骤，复杂度较高，因此，进一步把边缘网关与采集频次进行组合，将三维匹配问题简化为终端 D_m 与资源块 $\{G_n, k\}$ 之间的二维一对一匹

配问题,匹配关系定义为 θ 。

定义1(匹配问题):由于边缘网关和采集频次选择决策变量的限制,在每个时隙每个终端任务数据只被允许选择1个资源块进行数据采集、传输与处理。通信资源智能编排优化问题P2等价的二维一对一匹配问题如式(16)~(17)所示。式(16)表示由于边缘网关和采集频次选择决策变量的限制,在每个时隙每个终端任务数据只被允许选择1个资源块进行数据采集、传输与处理;式(17)表示每个边缘网关无线通信端口最多可处理 Z_n^{WL} 个终端的数据。

$$\begin{cases} \theta(D_m) \subseteq \mathcal{W}, |\theta(D_m)| = 1 \\ \forall W_n \in \mathcal{W} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \theta(W_n) \subseteq \mathcal{D}, |\theta(W_n)| \leq Z_n^{\text{WL}} \\ \forall D_m \in \mathcal{D} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\theta(D_m)$ 表示 D_m 的匹配关系; $\mathcal{W}$ 为资源块集合, $\mathcal{W} = \{G_n, k\}$; $\mathcal{D}$ 为终端集合; W_n 为资源块集合中某一边缘网关与采集频次组合; $\theta(W_n)$ 为 W_n 的匹配关系; Z_n^{WL} 为最大终端数量。

定义2(匹配决策变量):将边缘网关和采集频次选择决策变量进行聚合,定义新的匹配决策变量为 $\xi_{m,n,k}(t) \in \{0, 1\}$,其中 $\xi_{m,n,k}(t) = 1$ 表示终端 D_m 选择边缘网关 G_n 和采集频次 k 进行业务数据采集与处理,即 $x_{m,n}(t) = 1$ 且 $y_{m,k}(t) = 1$,否则 $\xi_{m,n,k}(t) = 0$ 。

定义3(合理匹配):若与当前匹配关系相对比,不存在任何终端更倾向于与其他边缘服务器进行匹配,则称当前匹配为合理匹配。

基于上述定义,本文提出了一种基于业务差异性感知的通信资源智能编排算法。根据不同高频采集业务对时延和能耗的敏感程度建立偏好列表,能够满足差异化业务的不同处理需求。此外,采用配额可变的升价匹配算法对计算资源可能存在的浪费进行处理与优化。所提算法包括初始化、偏好列表构建、单边匹配、决策执行4个阶段。

所提算法具体实施步骤如下。

1)初始化:定义未匹配的终端任务数据集为 η ,定义边缘网关-采集频次资源块的匹配成本为 $H_{m,n,k}(t)$ 。在每个时隙初,对于 $\forall D_m \in \mathcal{D}$ 以及 $\forall W_n \in \mathcal{W}$,初始化变量 $H_{m,n,k}(t) = 0$, $\xi_{m,n,k}(t) = 0$,初始化终端数据集 $\eta = \mathcal{D}$ 。设置一个空集 π 用于

存储匹配请求超过网关无线端口数量的资源块。

2)偏好列表构建:由于高频采集终端业务对时延与能耗的敏感程度不同,能耗和时延敏感型业务分别更倾向于选择具有更低能耗和时延的资源块进行数据处理,一般业务介于二者之间,因此将终端 D_m 对资源块的偏好 $\Omega_{m,n,k}(t)$ 定义为:

$$\Omega_{m,n,k}(t) = \frac{1}{\tau_m(t) + \omega_m E_m(t) - Q_m(t) A_m(t)} - H_{m,n,k}(t) \quad (18)$$

每个终端根据偏好值的大小对其准备选择的资源块进行从高到底的排序,从而构建出对应终端的偏好列表。

3)升价匹配:根据建立的偏好列表,每个终端对其列表中偏好值 $\Omega_{m,n,k}(t)$ 最大的资源块发出匹配请求。匹配过程中存在多个终端选择同一资源块而导致超出该资源块网关无线端口配额 Z_n^{WL} 的情况,此时,将这些资源块加入资源集合,并提升该资源块的匹配成本,即:

$$H_{m,n,k}(t+1) = H_{m,n,k}(t) + \Delta H_{m,n,k} \left[\frac{1}{\tau_m(t) + \omega_m \bar{E}_m(t)} \right] \quad (19)$$

式中: $\Delta H_{m,n,k}$ 为梯度成本增量; $\tau_m(t)$ 和 $\bar{E}_m(t)$ 分别为截至当前时隙获得的平均时延与平均能耗性能,即:

$$\bar{\tau}_m(t) = \frac{1}{t-1} \sum_{a=1}^{t-1} \tau_m(a) \quad (20)$$

$$\bar{E}_m(t) = \frac{1}{t-1} \sum_{a=1}^{t-1} E_m(a) \quad (21)$$

$1/[\bar{\tau}_m(t) + \omega_m \bar{E}_m(t)]$ 能够对高频采集业务差异性进行感知,依据历史经验,对于时延与能耗性能表现较差的终端,应当尽可能降低其成本增量,从而在竞争匹配中获得有利先决条件,从而获得更优性能同时通过成本增量的差异化提升算法收敛度。升价匹配后,会出现实际终端匹配数量未达到边缘网关通信端口配额的情况,而导致计算资源的浪费。此时,该边缘网关按照目前终端匹配数量更新原定配额,并均分总计算资源。同时,各个终端根据式(18)更新偏好值 $\Omega_{m,n,k}(t)$,同步更新业务偏好列表,并重新选择资源块,若存在超额现象则再次进行升价匹配。重复执行偏好列表构建与升价匹配步骤,直到所有边缘网关的配额总和与终端数量相一致。

4)决策执行: 所有 $D_m \in \mathcal{D}$ 根据 $\{\xi_{m,n,k}(t)\}$ 卸载业务数据。

3 仿真分析

3.1 仿真参数

本文考虑 $200 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 条带状区域内配电网高频采集场景, 包含 15 个边缘接入网关和 120 个终端, 每个边缘接入网关配备基站与终端进行无线通信。场景中共包含时延敏感型业务、能耗敏感型业务、一般业务 3 种类型。时延敏感型业务对数据处理时延要求较高, 即 $\omega_m = 20$; 能耗敏感型业务优化目标中能耗比例更高, 即 $\omega_m = 200$; 一般业务对时延和能耗需求均衡, 即 $\omega_m = 100$ 。基站和配电网终端之间的电磁干扰服从 Alpha 稳定分布^[27], 路径损耗服从正态分布^[28], 信道增益的数值大小为路径损耗的相反数; 其余仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
T	200	$B_{m,n}(t)/\text{MHz}$	$[1, 1.2]$
Z_n^{WL}	5	$P_m(t)/\text{W}$	$[0.1, 0.5]$
$V_{m,n}(t)/\text{dB}$	$[3, 6]$	$\delta_{m,n}(t)/\text{dBm}$	$[16, -26]$
$\phi_n(t)/\text{Cycle}$	$[10^7, 10^8]$	$\lambda_m(t)/(\text{Cycle} \cdot \text{Mbit}^{-1})$	$[2 \times 10^6, 5 \times 10^6]$
$A_{m,\min}/\text{Mbits}$	2	$\Delta H_{m,n,k}$	50
N_0/dBm	-114	K	4

在仿真过程中本文将所提算法与两种具有一定创新性的通信资源编排算法进行对比: 第一种为基于 Q-learning 的配电网通信资源编排算法 (Q-learning based distribution network communication resource arrangement, QCRA) 算法^[29], 该算法通过 Q-Learning 优化资源块匹配成本, 将其边缘接入网关通信端口配额固定; 第二种为基于 SARSA 的配电网通信资源编排 (SARSA based distribution network communication resource arrangement, SCRA) 算法^[30], 该算法通过 SARSA 算法优化资源编排决策, 不考虑匹配成本, 边缘接入网关通信端口配额固定。此外, QCRA 和 SCRA 均未考虑业务差异化需求感知和平均采集数据量长时约束。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 能耗和数据处理时延随时隙变化情况

图 2 展示了终端平均能耗随时隙变化情况。仿

真结果表明, 随着时隙数量增加, 所提算法终端平均能耗下降最快, QCRA 次之, SCRA 最慢。截至 $t = 200$, 所提算法相较 QCRA 和 SCRA 分别降低终端平均能耗 58.54 % 和 73.98 %。其原因在于所提算法考虑业务差异化需求感知, 通过设置参数 ω_m 提升能耗敏感型业务的能耗优化性能。QCRA 未考虑业务差异化需求感知, 对能耗敏感型业务的能耗优化效果不如所提算法。SCRA 未考虑业务差异化需求感知, 部分终端为了避免冲突需要选择采集频次更高的资源块, 进一步增大终端数据传输能耗, 因此终端平均能耗最高。

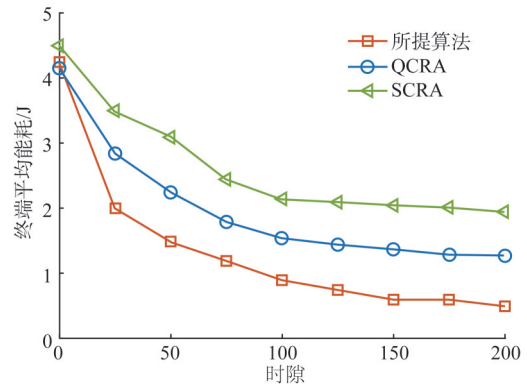


图 2 终端平均能耗随时隙变化情况对比

Fig. 2 Device average energy consumptions versus time slots

图 3 展示了平均数据处理时延随时隙变化情况。仿真结果表明, 随着时隙数量增加, 所提算法平均数据处理时延下降最快, QCRA 次之, SCRA 最慢。截至 $t = 200$, 所提算法相较 QCRA 和 SCRA 分别降低平均数据处理时延 51.99 % 和 69.93 %。其原因在于所提算法考虑业务差异化需求感知, 且动态更新边缘网关通信端口的原定配额, 基于数据实际卸载情况进行计算资源再分配。而 QCRA 和 SCRA 采用固定的边缘网关通信端口配额处理高频采集数据, 导致未满足配额的边缘网关计算资源浪费。其中, SCRA 未考虑匹配成本, 导致终端间资源冲突加剧, 部分终端无法请求到合理的资源块, 因此平均数据处理时延最高。

3.2.2 能耗和数据处理时延随终端数量变化情况

图 4 展示了边缘网关数量固定下 3 种算法能耗与数据处理时延随终端数量的变化的对比。仿真结果表明, 随着终端数量的增加, 3 种方法的总能耗与数据处理时延均有不同幅度的上升。其中, 所提算法的上升幅度最小, QCRA 次之, SCRA 最大。

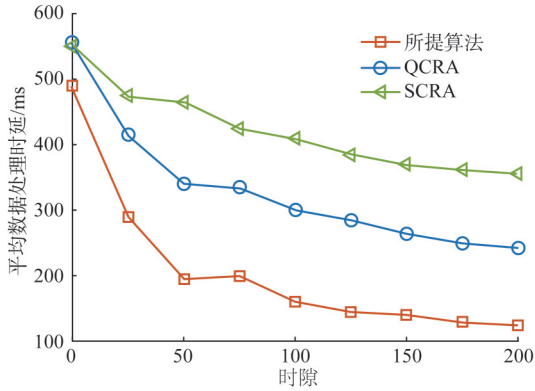


图3 平均数据处理时延随时隙变化情况对比

Fig. 3 Comparison of average data processing delays versus time slots

当终端数量为120时所提算法相较QCRA和SCRA分别降低终端总能耗47.83%和66.67%,数据处理时延58.33%和75.01%。其原因在于所提算法考虑业务差异化的需求感知和平均采集数据量长时约束,动态调整匹配价格与网关配额进行资源分配,有效降低因资源冲突导致的终端能耗与数据处理时延。QCRA通过优化匹配成本以降低资源冲突,在终端数量较少时效果较好,但QCRA未考虑平均采集数据量长时约束,导致随着终端数量的增加,传输与处理数据的能耗与时延增加。SCRA未考虑业务差异化的需求感知与资源块的匹配成本,无法动态优化采集频次与资源分配,导致终端数据量增加,资源冲突加剧,能耗与数据处理时延最大。

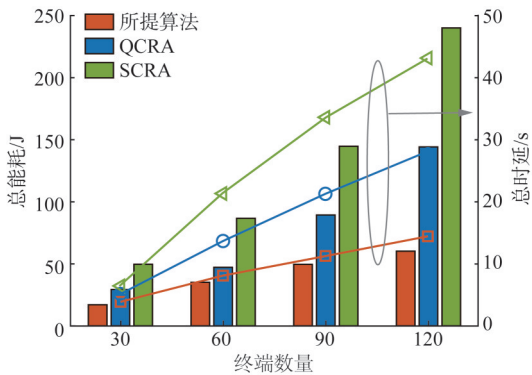


图4 数据处理时延随终端数量变化对比

Fig. 4 Comparison of data processing delays with the numbers of terminals

3.2.3 采集量虚拟赤字

图5展示了3种算法采集量虚拟赤字对比情况。

采集量虚拟赤字表示当前高频采集业务数据量偏离平均采集数据量约束的程度。仿真结果表明,相较于QCRA和SCRA,所提算法分别降低采集量虚拟赤字37.91%和49.64%。其原因在于所提算法考虑高频采集业务平均采集量长时约束,并通过构建虚拟队列解耦长时约束,在满足平均采集量长时约束的前提下优化时延和能耗的加权和。而QCRA和SCRA未考虑平均采集量长时约束决策,采集量虚拟赤字高于所提算法。其中SCRA未考虑匹配成本导致资源冲突加剧,部分终端需要增大采集频次避免资源冲突,导致数据采集量进一步增大,因此采集量虚拟赤字最高。

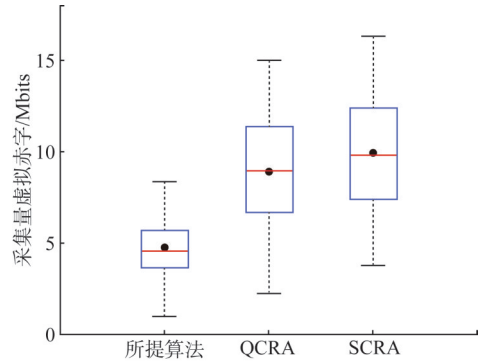


图5 采集量虚拟赤字箱线图

Fig. 5 Virtual deficit boxplots of collection volumes

3.2.4 不同业务类型的时延和能耗优化效果

图6—7分别表示3种算法对不同类型业务的时延和能耗优化效果。

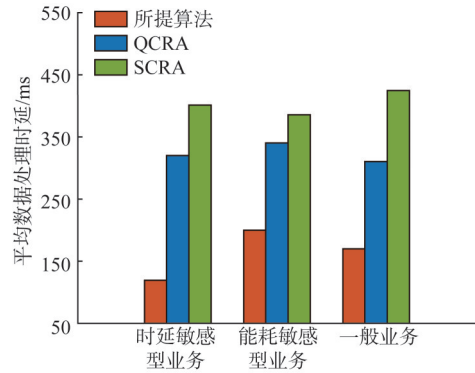


图6 不同类型业务的时延优化效果对比

Fig. 6 Data processing delays optimization effects of different types of services

时延优化性能是指通过减少数据传输和处理所需的时间,从而提高多种配电网高频采集业务并发接入场景下配电网的响应速度和效率;能耗优化性

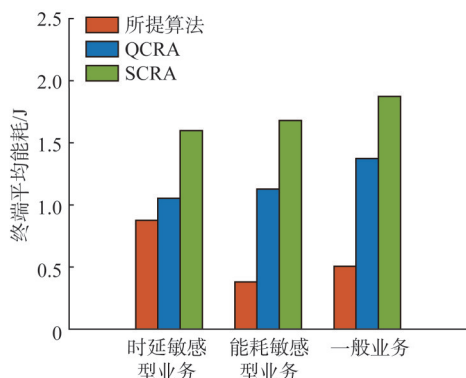


图7 不同类型业务的能耗优化效果对比

Fig. 7 Energy consumption optimization effects of different types of services

能是指通过降低数据传输和处理所需的能量消耗,从而延长多种配电网高频采集业务并发接入场景下配电网的续航时间并减少能源成本。仿真结果表明,对于时延敏感型业务,所提算法侧重于优化高频采集数据处理时延,并且对终端能耗的优化效果与QCRA相差不明显。对于能耗敏感型业务,所提算法侧重于优化终端能耗,并且同时保证平均数据处理时延的优化效果。其原因在于,所提算法通过调节参数 ω_m 感知业务差异化需求,最大程度上缓解了终端之间的资源冲突。对于时延敏感型业务,所提算法相较于QCRA和SCRA时延优化性能分别提升了73.42%和78.42%。对于能耗敏感型业务,所提算法相较于QCRA和SCRA能耗优化性能分别提升了62.83%和74.07%。

3.2.5 计算复杂度

图8展示了3种算法计算复杂度随终端数量变化情况。所提算法与QCRA均通过提升匹配成本解决终端间资源冲突,而所提算法通过业务差异化需求感知使不同类型间业务资源冲突概率下降,同等条件下计算复杂度比QCRA低51.06%。与SCRA相比,所提算法在提高计算复杂度58.42%的同时降低了终端平均能耗73.98%,降低平均数据处理时延69.93%。其原因在于所提算法通过竞价匹配、业务差异化需求感知以及配额动态更新能够实现更合理的配电网通信资源分配。

4 结论

针对高比例新能源接入场景下配电网高频采集业务量及通信需求爆发式增长问题,本文提出了一

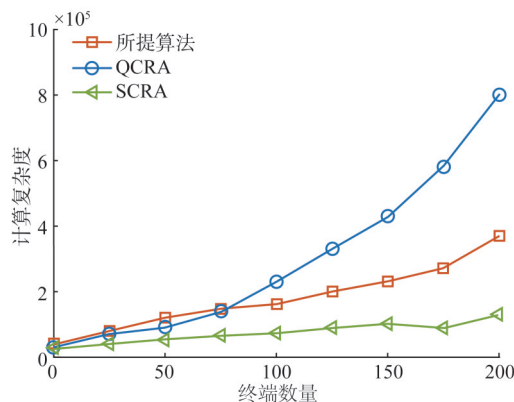


图8 计算复杂度随终端数量变化情况对比

Fig. 8 Comparison of computational complexities versus the numbers of devices

种面向配电网高频采集的通信资源智能编排技术,通过改进的单边匹配解决了采集频次、通信端口配额、平均采集数据量约束下最小化终端业务数据处理时延和能耗加权问题,保障了配电网高频采集业务差异化需求,避免了计算资源浪费,实现了配电网通信资源的智能编排。相较于QCRA和SCRA算法,所提算法分别降低了终端平均能耗58.54%和73.98%,降低了平均数据处理时延51.99%和69.93%。未来研究中将进一步考虑高并发场景下配电网通信资源的分配以及业务数据传输安全性的问题,深入研究更为安全高效的配电网通信资源智能编排方案。

参考文献

- [1] 赵伟, 黄子洋, 潘艳, 等. 直流馈入的高比例新能源受端电网静态电压稳定分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(6): 11-19.
ZHAO Wei, HUANG Ziyang, PAN Yan, et al. Static voltage stability analysis of receiving-end grid with DC infeed high penetration renewable energy [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(6): 11-19.
- [2] 陈亚鹏, 刘朋矩, 周振宇, 等. 面向业务可靠承载的电力弹性光网络自主协同决策[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5821-5831, 5877.
CHEN Yapeng, LIU Pengju, ZHOU Zhenyu, et al. Autonomous collaborative decision-making for power elastic optical network oriented to service reliable bearing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5821-5831, 5877.
- [3] 邱建, 张建新, 朱煜昆, 等. 光伏并网稳定控制系统设计方法及其在南方电网的应用与实践[J]. 南方电网技术, 2024, 18(7): 139-148.
QIU Jian, ZHANG Jianxin, ZHU Yukun, et al. Design method of stability control system for photovoltaic grid-connected sta-

- tion and its application and practice in CSG[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(7): 139 – 148.
- [4] SONG M, LEE Y, KIM K. Reward-oriented task offloading under limited edge server power for multiaccess edge computing [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(17): 13425 – 13438.
- [5] 徐唐海, 鲁宗相, 乔颖, 等. 源荷储多类型灵活性资源协调的高比例可再生能源电源规划[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 27 – 34.
- XU Tanghai, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. High proportion renewable energy power supply planning with multi-type flexible resources coordinated by source, load and storage [J]. Global Energy Internet, 2019, 2(1): 27 – 34.
- [6] LIAO H, ZHOU Z, ZHAO X, et al. Learning-based context-aware resource allocation for edge-computing-empowered industrial IoT [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(5): 4260 – 4277.
- [7] 张晓天, 张健男, 黄冶, 等. 边缘技术在能源设备数据采集调度中的算法研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15230 – 15236.
- ZHANG Xiaotian, ZHANG Jiannan, HUANG Ye, et al. Edge technology in energy equipment data acquisition and scheduling algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(34): 15230 – 15236.
- [8] 韦磊, 蒋承伶, 朱红, 等. 基于物联网的台区数据分钟级同频采集方案设计及应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(8): 54 – 60.
- WEI Lei, JIANG Chengling, ZHU Hong, et al. Design and application of minute-level same-frequency data acquisition scheme based on Internet of Things [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(8): 54 – 60.
- [9] 王翌雪, 高雪莲, 汤亿则, 等. 差异化服务质量性能驱动的5G配电网边缘计算优化方法[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(4): 339 – 347.
- WANG Yixue, GAO Xuelian, TANG Yize, et al. Differentiated quality of service performance driven edge computing optimization method in 5G power distribution network [J]. Global Energy Internet, 2022, 5(4): 339 – 347.
- [10] 陈亚鹏, 周振宇, 韩东升, 等. 电力+5G前传网中融合时延敏感网络技术的流量调度方法[J]. 电子学报, 2023, 51(5): 1141 – 1147.
- CHEN Yapeng, ZHOU Zhenyu, HAN Dongsheng, et al. TSN-integrated flow scheduling method in power+5G fronthaul network [J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(5): 1141 – 1147.
- [11] 田美君, 刘沈全, 汪隆君, 等. 非理想通信环境下主动配电网多源协同调控策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(11): 42 – 51.
- TIAN Meijun, LIU Shenquan, WANG Longjun, et al. Multi-source coordinated control strategy for active distribution network in non-ideal communication environment [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(11): 42 – 51.
- [12] 周振宇, 王翌, 廖海君, 等. 电力物联网5G云-边-端协同框架与资源调度方法[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1641 – 1651.
- ZHOU Zhenyu, WANG Zhao, LIAO Haijun, et al. 5G cloud-edge-end collaboration framework and resource scheduling method of power Internet of things [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1641 – 1651.
- [13] 陈元桦, 蔡泽祥, 岑伯维, 等. 考虑任务耦合的配电网边缘计算终端部署与任务分配方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 32 – 40.
- CHEN Yuanbi, CAI Zexiang, CEN Bowei, et al. Deployment and task allocation method of edge computing terminal considering task coupling in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 32 – 40.
- [14] 康逸群, 蔡泽祥, 曾兴, 等. 考虑卸载成本的配电网能量管理业务云边协同调度方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(9): 61 – 68.
- KANG Yiqun, CAI Zexiang, ZENG Xing, et al. Cloud-edge collaborative dispatching method for distribution network energy management business considering offloading cost [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9): 61 – 68.
- [15] 龙隆, 刘子辰, 陆在旺, 等. 移动边缘网络下服务缓存与资源分配联合优化策略[J]. 通信学报, 2023, 44(1): 64 – 74.
- LONG Long, LIU Zichen, LU Zaiwang, et al. Joint optimization strategy of service cache and resource allocation in mobile edge network [J]. Journal of Communication, 2023, 44(1): 64 – 74.
- [16] 吴钢, 周金辉, 李慧. 面向边缘增强分布式电力无线传感网的资源分配[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 77 – 85, 98.
- WU Gang, ZHOU Jinhui, LI Hui. Resource allocation for edge-enhanced distributed powerwireless sensor network [J]. Electric Power, 2023, 56(8): 77 – 85, 98.
- [17] 薛建彬, 安悦, 关向瑞, 等. 车载多接入边缘网络中联合资源分配和动态任务卸载方案[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(6): 61 – 69.
- XUE Jianbin, AN Yue, GUAN Xiangrui, et al. Joint resource allocation and dynamic task offloading scheme in vehicle multi-access edge network [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(6): 61 – 69.
- [18] WANG X, HAN Y, SHI H, et al. JOAGT: delay-oriented joint optimization of computation offloading and resource allocation in D2D-assisted MEC system [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(9): 1780 – 1784.
- [19] GAO Y, WU Y, HU H, et al. Licensed and unlicensed bands allocation for cellular users: a matching-based approach [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 969 – 972.
- [20] 刘岗, 赵杭生, 李大力, 等. 异构网络资源分配: 改进多对一转移匹配[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(15): 91 – 96.
- LIU Gang, ZHAO Hangsheng, LI Dali, et al. Resource allocation in heterogeneous network networks: modified many-to-one swap matching [J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(15): 91 – 96.
- [21] SHI C, ZHANG S, WANG R, et al. Three-dimensional quota matching - based latency - sensitive task offloading for multi-mode green IoT in smart buildings [J]. IET Communications, 2022, 16(15): 1865 – 1874.
- [22] GAO H, MA W, HE S, et al. Time-segmented multi-level reconfiguration in distribution network: a novel cloud-edge collaboration framework [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 3319 – 3322.
- [23] 毛水强, 洪健, 任华, 等. 面向电力物联网的5G移动边缘计算任务卸载方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 105 – 111.
- MAO Shuiqiang, HONG Jian, REN Hua, et al. 5G mobile edge computing task offloading method for power internet of things [J]. Electrical Measurement & Instrument, 2022, 59

- (2): 105 – 111.
- [24] 薛激光, 王珺, 张笑怡, 等. 一种低压台区本地 HPLC+RF 双模自组织通信网络身份认证方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 219 – 224.
- XUE Jiguang, WANG Jun, ZHANG Xiaoyi, et al. A local HPLC+RF dual-mode communication Adhoc network identity authentication method in low-voltage station area[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(1): 219 – 224.
- [25] GUO M, GUAN Q, CHEN W, et al. Delay-optimal scheduling of VMs in a queueing cloud computing system with heterogeneous workloads[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2022, 15(1): 110 – 123.
- [26] 肖勇, 金鑫, 冯俊豪. 一种适用于电力异构通信的链路速率跨层匹配机制[J]. 计算机科学, 2021, 48(S2): 495 – 499.
- XIAO Yong, JIN Xin, FENG Junhao. Cross-layer matching mechanism of link communication rate for heterogeneous communication in power system[J]. Computer Science, 2021, 48(S2): 495 – 499.
- [27] 廖海君, 贾泽晗, 周振宇, 等. 面向调控信息新鲜度保障的电力至简物联网资源优化[J]. 通信学报, 2022, 43(7): 203 – 214.
- LIAO Haijun, JIA Zehan, ZHOU Zhenyu, et al. Dispatching and control information freshness guaranteed resource optimization in simplified power Internet of Things[J]. Journal on Communications, 2022, 43(7): 203 – 214.
- [28] SUN Y, ZHOU S, XU J. EMM: energy-aware mobility management for mobile edge computing in ultra dense networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(11): 2637 – 2646.
- [29] ZHOU Z, GUO Y, HE Y, et al. Access control and resource allocation for M2M communications in industrial automation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(5): 3093 – 3103.
- [30] FAN Y, WANG L, WU W, et al. Cloud/edge computing resource allocation and pricing for mobile blockchain: an iterative greedy and search approach[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2021, 8(2): 451 – 463.

收稿日期: 2023-09-28; 网络首发日期: 2024-05-22

作者简介:

路韬(1993), 男, 通信作者, 工程师, 硕士, 研究方向为电力通信, 计量通信技术, Tao_lu1108@163.com;

张捷(1987), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力通信, 电能计量管理;

张永旺(1984), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力通信, 电能计量管理。

(上接第 72 页 Continued from Page 72)

- [24] 郑远, 杜豫川, 孙立军. 美国联邦公路局路阻函数探讨[J]. 交通与运输(学术版), 2007(1): 24 – 26.
- ZHENG Yuan, DU Yuchuan, SUN Lijun. Considerations on problems in the BPR function[J]. Traffic & Transportation, 2007(1): 24 – 26.
- [25] FENG C, MINING F, BING H, et al. Multistage and dynamic layout optimization for electric vehicle charging stations based on the behavior analysis of travelers[J]. World Electric Vehicle Journal, 2021, 12(4): 243 – 243.
- [26] 夏立民. 交通系统中最优路径选择算法的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2007.

都师范大学, 2007.

收稿日期: 2023-11-10; 网络首发日期: 2024-07-02

作者简介:

赵晶晶(1980), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为电力系统弹性、新能源发电并网控制技术, jjzhao_sh@163.com;

马闻鹤(1998), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统弹性和优化运行, Mwh12_21@163.com;

宋扬洋(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源并网及配电网优化运行。