

基于云边协同架构的负荷侧资源参与微网调频策略

赵文猛¹,程哲²,周保荣¹,毛田¹,王滔¹,王业震^{3*},吴秋伟³

(1.南方电网科学研究院有限责任公司,广东广州 510530; 2.中国南方电网有限责任公司,广东广州 510530; 3.清华大学深圳国际研究生院,广东深圳 518071)

摘要:针对传统集中式调频模式严重依赖中心节点,存在通信延迟和数据隐私泄露的问题,提出一种基于云边协同架构的负荷侧资源参与微网调频策略。基于云边协同架构搭建系统调频框架,实现系统调频任务的分解并充分利用虚拟电厂的边缘计算能力;基于负荷侧灵活性资源的运行特性,构建考虑用户满意度的温控负荷和电动汽车充电站两种负荷侧资源的调频模型;考虑云边通信系统传输故障风险的影响,计及调频和碳排成本以及用户满意度,提出具有通信故障响应能力的负荷侧资源参与微网调频策略。基于IEEE 33节点系统的算例分析表明,所提方法相较于其他对比方法,能够降低调频成本、提升用户满意度以及降低调频碳排放。

关键词:调频;负荷侧资源;云边协同;温控负荷;电动汽车

中图分类号:TM711

文献标志码:A

引用格式:赵文猛,程哲,周保荣,等. 基于云边协同架构的负荷侧资源参与微网调频策略[J]. 山东大学学报(工学版),2026,56(1):179-188.

ZHAO Wenmeng, CHENG Zhe, ZHOU Baorong, et al. A frequency regulation strategy for microgrids involving load-side resources based on cloud-edge collaborative architecture[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(1):179-188.

A frequency regulation strategy for microgrids involving load-side resources based on cloud-edge collaborative architecture

ZHAO Wenmeng¹, CHENG Zhe², ZHOU Baorong¹, MAO Tian¹, WANG Tao¹, WANG Yezhen^{3*}, WU Qiuwei³

(1. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510530, Guangdong, China; 2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510530, Guangdong, China; 3. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518071, Guangdong, China)

Abstract: To address the limitations of traditional centralized frequency regulation approaches, which heavily relied on central nodes and faced issues such as communication latency and data privacy leakage, this study proposed a frequency regulation strategy for microgrids based on a cloud-edge collaborative architecture with participation from load-side resources. A system-level frequency regulation framework was established under the cloud-edge architecture, enabling the decomposition of regulation tasks and the effective utilization of edge computing capabilities within virtual power plants. Considering the operational characteristics of flexible load-side resources, frequency regulation models were developed for thermostatically controlled loads and electric vehicle charging stations, incorporating user satisfaction. Taking into account the risks of communication failures in cloud-edge systems, a regulation strategy was proposed that considered regulation cost, carbon emissions, and user satisfaction, while enhancing the response capability under communication disruptions. Case studies based on the IEEE 33-bus system demonstrated that the proposed method outperformed benchmark approaches in reducing regulation costs, improving user satisfaction, and lowering carbon emissions associated with frequency regulation.

Keywords: frequency regulation; demand-side resources; cloud-edge collaboration; temperature controlled load; electric vehicle

收稿日期:2024-11-22

基金项目:深圳供电局有限公司科技资助项目(SZKJXM20220036)

第一作者简介:赵文猛(1990—),男,河北保定人,高级工程师,博士,主要研究方向为新型储能、综合能源等业务管理。E-mail:zhaowm@csg.cn

*通信作者简介:王业震(2001—),男,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,主要研究方向为人工智能在智能电力、智能交通系统的应用。

E-mail:wangyezhen23@mails.tsinghua.edu.cn

0 引言

频率调节(调频)是维持电力系统稳定性的重要手段之一,通过调节发电量或负荷侧资源实现供需平衡,应对电网频率波动,确保系统安全、可靠运行^[1]。传统电力系统的调频主要依赖发电机组,然而随着大量可再生能源并入电网,系统转动惯量减小,供电不确定性增加,因此电网的频率调节面临着越来越大的压力^[2]。首先,发电机组的调频响应速度较慢,难以有效应对电力负荷的快速变化。例如,在负荷骤增时,发电机组的爬坡速度可能限制它快速调整电网频率的能力,导致电网频率波动超出安全范围。其次,依赖发电机组调频通常伴随着持续的化石燃料消耗,不仅降低了能源利用效率,还带来了较高的碳排放和环境成本。据国际能源署统计,全球与燃料消耗相关的碳排放中,超过40%来自发电和供热^[3]。因此,引入更灵活高效的调频手段以应对电力系统的动态变化已成为急待解决的问题。

负荷侧资源的多样化为电力系统提供相较传统发电机组更加灵活且高效的调频替代方案。如温控负荷和电动汽车负荷等负荷侧资源,凭借其高度灵活性,已广泛应用于频率调节^[4-6]。学者们对负荷侧资源参与电力系统调频进行了深入研究。文献[7]构建一种两级自动功率控制架构,基于华北电网数据提出调峰自适应预控与基线调频相结合的控制策略,优化负荷侧资源与常规机组的协调控制,提升电网的调峰调频能力;文献[8]提出一种基于虚拟同步机控制的变频空调负荷改造方法,使其能够参与微网调频与互动调控,从而提升电网频率调节能力和微网运行的稳定性;文献[9]建立一种计及补偿效果的需求侧资源调频辅助服务市场机制,建立电能与调频联合市场出清及补偿模型,验证该模型能提高需求侧资源中标率与收益,减少系统对调频备用容量的需求及购买成本,从而优化调频市场的运行效率并提升系统稳定性。

尽管上述内容对负荷侧资源参与调频的研究做出了显著贡献,但仍有一些问题需要关注。上述研究大多依赖于集中式计算,由中心节点直接将调频信号发送至各负荷侧资源,但这种方式存在一定的局限性。首先,大量数据传输容易导致通信拥堵延迟,难以实时响应电力系统的频率波动,影响调频效率和系统稳定性^[10];其次,集中式处理需要将所有负荷数据上传至中央服务器进行计算,增加了数据隐私泄露的风险;再次,中央节点的故障可能导致系统瘫痪,缺乏鲁棒性和可靠性支持。因此,

这种模式难以应对未来电力系统中负荷侧资源多样化和分布式发展的需求^[11]。

为了解决上述问题,一些学者提出基于云边协同架构的负荷侧资源调频模型^[12-13]。文献[12]中研究者关注电动汽车调频服务中的接入分散和充电需求不确定性问题,提出基于云边融合的调控框架及长短期记忆(long short-term memory, LSTM)预测方法,通过滚动评估和分层分解提高调频响应速度和效率;文献[13]中研究者考虑虚拟电厂在日前计划和实时运行阶段存在的功率偏差,提出基于云边协同的实时调控策略,旨在提高调控效率并降低功率偏差对电网运行的影响,达到优化电厂调控性能和提升系统稳定性的效果。在引入云边协同架构后,分配计算任务至边缘节点,提高运算速度并提升系统调频的响应能力,避免单点故障后系统失效的发生,但是现有文献对碳排放和用户满意度的关注仍然不足。传统调频方案往往忽视使用化石能源带来的高碳排放问题,导致无法在碳中和目标下实现电力系统的可持续发展。此外,用户在参与调频过程中可能面临温控设备等舒适度下降的问题,现有研究较少考虑如何平衡用户对舒适度的需求和系统调频的要求。这可能降低用户对调频响应的参与意愿。

为了解决上述问题,本研究提出一种基于云边协同架构的微网调频策略,充分利用负荷侧资源参与调频过程。首先,该方法设计云边协同的调频框架,将调频任务进行合理分解,并有效利用虚拟电厂的边缘计算能力。其次,基于负荷侧灵活性资源的运行特性,进一步构建调频模型,涵盖考虑用户满意度的温控负荷和电动汽车充电站两类主要负荷资源。再次,考虑云边通信系统可能存在的传输故障风险,提出一种故障发生时的调频负载转移策略。该策略能够掌握下属线路的实时通信状态,当某条通信线路出现故障时,它所承担的调频负载将分配至其他通信良好的负荷集群。最后,综合考虑调频成本、调频失败惩罚、碳排放以及用户满意度因素,提出优化的调频策略。基于IEEE 33节点系统的仿真结果验证了所提策略的有效性,表现出在降低调频成本、提高用户满意度以及减少碳排放方面的显著优势。

1 基于云边协同的负荷侧资源调频框架

本研究提出的基于云边协同架构的负荷侧资源调频模型如图1所示。

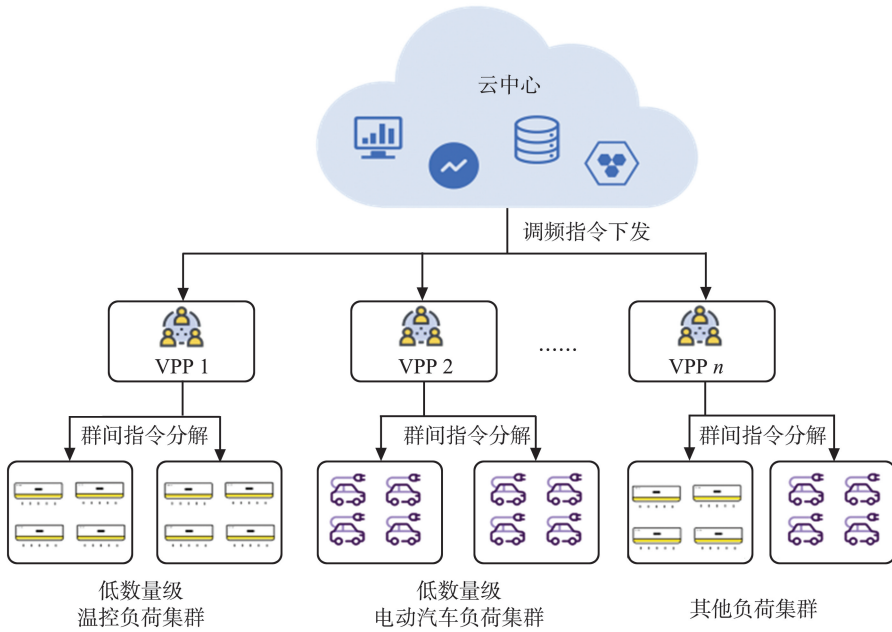


图 1 基于云边协同架构下的负荷侧资源调频模型

Fig.1 Demand-side resource frequency regulation model based on cloud edge collaboration architecture

由图 1 可知,该模型由 3 层构成,旨在协调多种负荷侧资源参与电力系统的频率调节。第 1 层为电力系统的调度中心,位于云端,通过自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 系统综合分析系统运行数据并下发调频指令。第 2 层由多个虚拟电厂 (virtual power plant, VPP) 组成,位于系统的边缘位置。作为云中心与负荷集群的通信媒介,每个 VPP 接收来自云中心的调频指令,并根据 VPP 内包含的

如灵活性负荷、分布式储能、发电机等资源状态,将这些指令进一步分解为具体的操作命令。第 3 层为负荷侧资源,包括温控负荷集群、储能负荷集群、电动汽车负荷集群及其他类型的负荷集群。这些资源位于调频执行的最末端,直接从 VPP 接收指令,并通过调整自身的功率输出响应电力系统的频率调节需求。

为实现负荷侧资源调频的高效控制,本研究建立一种云边协同的多层次通信架构,如图 2 所示。

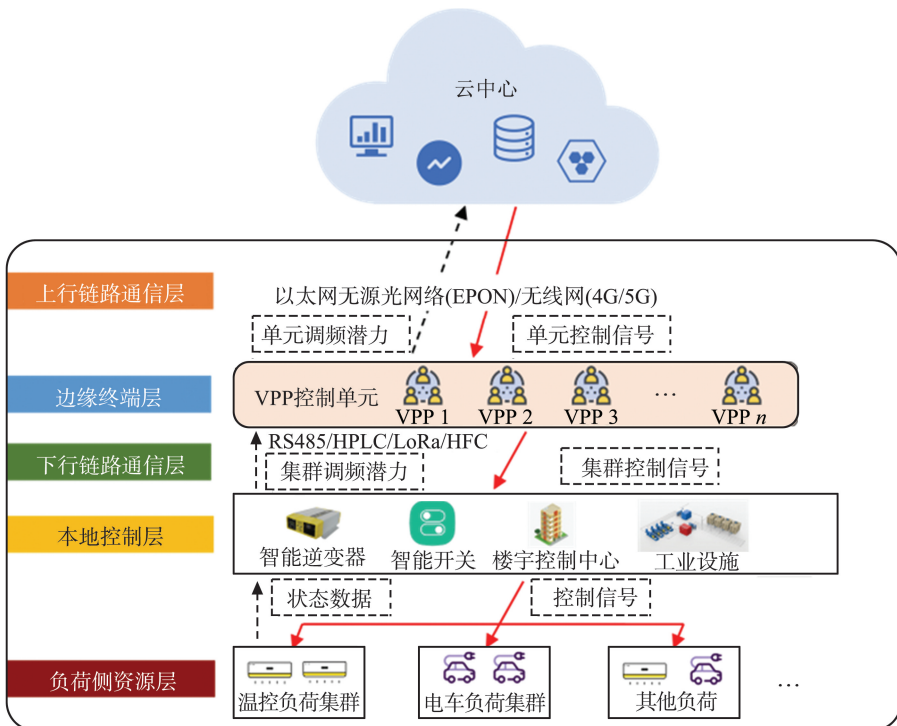


图 2 云边协同下的系统通信架构图

Fig.2 System communication architecture diagram under cloud edge collaboration

该通信架构包括上行链路通信层、边缘终端层、下行链路通信层、本地控制层和负荷侧资源层,实现了从云中心到负荷集群的全链路通信机制^[13]。接下来详细介绍该架构的各个组成部分及其通信策略。

(1) 上行链路通信层:通过以太网无源光网络和无线网链接云中心和各 VPP 控制单元,负责将单元调频潜力反馈至云中心,并传输单元控制信号至各 VPP 控制单元。

(2) 边缘终端层:由各 VPP 控制单元构成。该层从本地终端收集数据,评估集群的调节能力,并通过上行链路通信层将这些信息上报给云中心。当云中心将各集群控制信号下发到各 VPP 后,VPP 控制单元需快速分解指令并传输至各控制终端。

(3) 下行链路通信层:负责边缘终端与本地控制终端之间的有线和无线短程通信。最常用的通信策略包括高速电力线载波和高速射频。

(4) 本地控制层与负荷侧资源层:本地控制层主要负责执行来自上级 VPP 控制单元的调频指令,直接管理和调控各类物理设备的运行状态。这一层的设备通常包括智能逆变器、智能开关、楼宇控制中心、工业设施等。负荷侧资源层为频率调节的物理对象,本研究主要考虑温控负荷、电动汽车充电站 2 种负荷集群。

2 负荷侧资源模型

2.1 温控负荷

在本研究中,以空调设备为例对温控负荷(temperature controlled load, TCL)进行建模。采用一阶等效热模型描述空调运作时室内温度变化^[14-15],等效热参数模型的一阶微分方程式为

$$C \frac{dT_t^{\text{in}}}{dt} = \frac{T_t^{\text{out}} - T_t^{\text{in}}}{R} + Q_t, \quad (1)$$

式中: C 为等效热容; R 为等效电阻; T_t^{out} 、 T_t^{in} 分别为 t 时刻室外、室内温度; Q_t 为空调在 t 时刻的制冷/制热量,当 $Q_t > 0$ 时,表示空调属于制冷工作状态,当 $Q_t < 0$ 时,表示空调属于制热工作状态。

将式(1)离散化处理后,可得室内环境温度的一阶递推公式

$$T_{t+1}^{\text{in}} = T_{t+1}^{\text{out}} - Q_t R - (T_t^{\text{out}} - T_t^{\text{in}} - Q_t R) e^{-\frac{\Delta t}{RC}}, \quad (2)$$

式中, Δt 为时间间隔。

空调的制冷/制热公式表示为

$$Q_{i,j,t} = \eta_{i,j} p_{i,j,t}^{\text{cl}}, \quad \forall i, j, t, \quad (3)$$

$$-s_{i,j,t} p_{i,j}^r \leq p_{i,j,t}^{\text{cl}} \leq s_{i,j,t} p_{i,j}^r, \quad \forall i, j, t, \quad (4)$$

式中, i 为 VPP 控制单元, j 为负荷侧资源, $Q_{i,j,t}$ 为第 i 个 VPP 控制单元的第 j 个空调负荷在 t 时刻的制冷/制热量, $\eta_{i,j}$ 为 VPP 控制单元 i 的第 j 个空调负荷的能效转化系数, $p_{i,j,t}^{\text{cl}}$ 为 VPP 控制单元 i 的第 j 个空调负荷在 t 时刻的功率, $s_{i,j,t}$ 为 VPP 控制单元 i 的第 j 个空调负荷在 t 时刻工作状态的二元变量(1 为运行,0 为关闭), $p_{i,j}^r$ 为 VPP 控制单元 i 的第 j 个空调负荷的额定功率。

假定用户对空调的设定温度为 $T_{i,j}^{\text{set}}$,空调在接收到调频指令后允许在一定范围内进行温度变化,具体表达式为

$$T_{i,j}^{\text{min}} = T_{i,j}^{\text{set}} - \delta_{i,j}/2, \quad \forall i, j, \quad (5)$$

$$T_{i,j}^{\text{max}} = T_{i,j}^{\text{set}} + \delta_{i,j}/2, \quad \forall i, j, \quad (6)$$

式中, $T_{i,j}^{\text{min}}$ 、 $T_{i,j}^{\text{max}}$ 分别为 VPP 控制单元 i 的第 j 个空调负荷允许的最低温度、最高温度, $\delta_{i,j}$ 为 VPP 控制单元 i 的第 j 个空调负荷允许的温度偏差。

以空调制冷模式为例,当空调处于关闭状态时,室内的温度会逐渐升高;当空调处于运行状态时,室内的温度会逐渐降低。空调的温度保持在 $T_{i,j}^{\text{min}}$ 和 $T_{i,j}^{\text{max}}$ 的区间中,不断切换开断状态。以制冷状态为例,空调的工作状态公式表示为

$$s_{i,j,t} = \begin{cases} 0, & T_{i,j,t}^{\text{in}} < T_{i,j}^{\text{min}} \\ 1, & T_{i,j,t}^{\text{in}} \geq T_{i,j}^{\text{max}} \\ s_{i,j,t-1}, & T_{i,j}^{\text{min}} \leq T_t^{\text{in}} \leq T_{i,j}^{\text{max}} \end{cases}. \quad (7)$$

综上所述,VPP 控制单元 i 的聚合温控负荷为

$$p_{i,t}^{\text{cl},b} = \sum_{j \in \Omega_i^{\text{cl}}} p_{i,j,t}^{\text{cl}}, \quad \forall i, t, \quad (8)$$

式中, $p_{i,t}^{\text{cl},b}$ 为 VPP 控制单元 i 在 t 时刻的聚合温控负荷, Ω_i^{cl} 为 VPP 控制单元 i 的空调负荷群集合。

由此,可得温控负荷参与系统调频的上调频容量 $p_{i,t}^{\text{cl},\text{up}}$ 和下调频容量 $p_{i,t}^{\text{cl},\text{down}}$,公式为

$$p_{i,t}^{\text{cl},\text{up}} = p_{i,t}^{\text{cl},b}, \quad \forall i, t, \quad (9)$$

$$p_{i,t}^{\text{cl},\text{down}} = \sum_{j \in \Omega_i^{\text{cl}}} p_{i,j}^r - p_{i,t}^{\text{cl},b}, \quad \forall i, t. \quad (10)$$

2.2 电动汽车充电站负荷

电动汽车不仅可以从电网获取电能进行充电,还可以通过双向充电模式(vehicle to grid, V2G)向电网输入电能。本研究主要关注 V2G 模式下的电动汽车负荷,将电动汽车负荷分为 3 个状态:(1) 充电状态,(2) 放电状态,(3) 空闲状态。电动汽车在任意时段内只能处于其中一种状态,并且可以在不同状态之间进行转换。以单辆电动汽车为例,对其参与调频的负荷进行如下建模,公式为

$$C_{i,j,t+1} = C_{i,j,t} + \Delta t \left(\frac{\eta^{\text{ch}} p_{i,j,t}^{\text{ch}} - \rho_{i,j,t}^{\text{dis}} / \eta^{\text{dis}}}{E_{i,j}} \right), \forall i, j, \quad (11)$$

$$C_{i,j}^{\text{min}} \leq C_{i,j,t} \leq C_{i,j}^{\text{max}}, \forall i, j, t, \quad (12)$$

$$0 \leq p_{i,j,t}^{\text{ch}} \leq \mu_{i,j,t}^{\text{ch}} p_{i,j}^{\text{ch,max}}, \forall i, j, t, \quad (13)$$

$$0 \leq p_{i,j,t}^{\text{dis}} \leq \mu_{i,j,t}^{\text{dis}} p_{i,j}^{\text{dis,max}}, \forall i, j, t, \quad (14)$$

$$\mu_{i,j,t}^{\text{ch}} + \mu_{i,j,t}^{\text{dis}} \leq 1, \forall i, j, t, \quad (15)$$

式中, $C_{i,j,t}$ 为 VPP 控制单元 i 的第 j 个电动汽车在 t 时刻的电量状态, $p_{i,j,t}^{\text{ch}}$ 、 $p_{i,j,t}^{\text{dis}}$ 分别为 VPP 控制单元 i 的第 j 个电动汽车在 t 时刻的充电、放电功率, η^{ch} 、 η^{dis} 分别为充电、放电效率, $E_{i,j}$ 为 VPP 控制单元 i 第 j 个电动汽车的电池容量, $C_{i,j}^{\text{max}}$ 、 $C_{i,j}^{\text{min}}$ 分别为 VPP 控制单元 i 的第 j 个电动汽车电量状态的最大、最小值, $\mu_{i,j,t}^{\text{ch}}$ 、 $\mu_{i,j,t}^{\text{dis}}$ 分别为电动汽车充电负荷充放电状态的二元变量(1 为充/放电, 0 为不充/放电), $p_{i,j}^{\text{ch,max}}$ 、 $p_{i,j}^{\text{dis,max}}$ 分别为 VPP 控制单元 i 的第 j 个电动汽车的最大充、放电功率。式(11)表示电动汽车电量状态随时间的变化, 式(12)表示电动汽车电量状态的上下限约束, 式(13)和(14)限制了电动汽车充放电功率, 式(15)表示电动汽车无法同时进行充放电。

VPP 控制单元 i 中聚合电动汽车充电站负荷计算公式为(正常情况都属于充电状态)

$$p_{i,t}^{\text{ch,b}} = \sum_{j \in \Omega_i^{\text{ev}}} p_{i,j,t}^{\text{ch}}, \forall i, t, \quad (16)$$

式中, $p_{i,t}^{\text{ch,b}}$ 为 VPP 控制单元 i 中聚合电动汽车充电站负荷, Ω_i^{ev} 为 VPP 控制单元 i 中电动汽车充电站集合。

综上所述, 电动汽车充电站集群参与调频的上调频容量 $p_{i,t}^{\text{ev,up}}$ 和下调频容量 $p_{i,t}^{\text{ev,down}}$ 分别表示为

$$p_{i,t}^{\text{ev,up}} = \sum_{j \in \Omega_i^{\text{ev}}} p_{i,j}^{\text{dis,max}} + p_{i,t}^{\text{ch,b}}, \forall i, t, \quad (17)$$

$$p_{i,t}^{\text{ev,down}} = \sum_{j \in \Omega_i^{\text{ev}}} p_{i,j}^{\text{ch,max}} - p_{i,t}^{\text{ch,b}}, \forall i, t. \quad (18)$$

3 通信系统故障模型

3.1 上行链路通信故障

在基于云边协同架构的负荷侧资源调频系统中, 上行链路通信层主要负责从云中心向边缘终端层传输调频信号和数据。当上行链路通信层发生故障时, 可能导致数据传输的延迟或中断, 从而影响调频指令的有效执行。为了分析上行链路通信层故障对系统性能的影响, 本研究建立了上行链路通信层的故障模型。上行链路通信层故障发生可

由泊松过程建模^[16], 公式为

$$P(F_i(t) = 0) = 1 - e^{-\lambda_f t}, \quad (19)$$

式中, $F_i(t)$ 为上层链路通信层故障状态的二元变量 ($F_i(t) = 0$ 表示上层链路通信层在 t 时刻发生故障, $F_i(t) = 1$ 表示上层链路通信层正常工作), λ_f 为上层链路通信故障发生的平均速率, Δt 为时间间隔。若 $F_i(t) = 1$, 则与该上行链路连接的所有 VPP 控制单元无法参与调频控制。

3.2 边缘终端故障

与上行链路通信故障类似, 当边缘终端发生故障时, 调频信号无法从各 VPP 控制单元下发至各灵活侧资源集群, 其故障发生也可由泊松过程建模, 其公式为

$$P(E_i(t) = 0) = 1 - e^{-\lambda_d t}, \quad (20)$$

式中, $E_i(t)$ 为边缘终端故障状态的二元变量 ($E_i(t) = 0$ 表示边缘终端层在 t 时刻发生故障, $E_i(t) = 1$ 表示边缘终端层正常工作), λ_d 为边缘终端通信故障发生的平均速率。若 $E_i(t) = 1$, 则与该 VPP 控制单元所连接的相应负荷侧资源集群无法参与调频控制。

3.3 下行链路通信层与物理层故障

对于下行链路层故障, 本架构在下行链路采用双模通信方式, 其可靠性较高。对于物理层故障, 其主要来源于单一灵活资源设备故障, 对总调节量的影响较弱, 故下行链路通信层与物理层故障可忽略不计。

4 多种负荷侧资源协同参与的调频优化模型

结合上述负荷侧资源模型, 本研究建立一个多种负荷侧资源协同的最优调节模型。含有多种负荷侧资源的电力系统节点有功和无功功率平衡公式表示为

$$\sum_{k \in E_N} f_{ki,t}^p + p_{i,t}^g + \Delta p_{i,t}^{\text{AGC}} =$$

$$\sum_{h \in E_N} f_{ih,t}^p + p_{i,t}^d + p_{i,t}^{\text{tel,b}} + p_{i,t}^{\text{ch,b}} + \Delta p_{i,t}^f, \forall i, t, \quad (21)$$

$$\sum_{k \in E_N} f_{ki,t}^q + q_{i,t}^g = \sum_{h \in E_N} f_{ih,t}^q + q_{i,t}^d, \forall i, t, \quad (22)$$

$$p_t^{\text{AGC}} = \sum_{i \in E_N} \Delta p_{i,t}^{\text{AGC}}, \quad (23)$$

式中, E_N 为电网中节点的集合, $f_{ih,t}^p$ 、 $f_{ih,t}^q$ 分别为 t 时刻从节点 i 流向节点 h 的有功和无功功率, $p_{i,t}^g$ 、 $q_{i,t}^g$ 分别为 t 时刻节点 i 处发电机的有功、无功功率,

$p_{i,t}^d, q_{i,t}^d$ 分别为 t 时刻节点 i 的有功、无功基础负荷, $\Delta p_{i,t}^{\text{AGC}}$ 为 t 时刻节点 i 的调频功率指令变化, $\Delta p_{i,t}^f$ 为 t 时刻节点 i 调频失败的剩余容量。

发电机的发电公式表示为

$$p_i^{g,\min} \leq p_{i,t}^g \leq p_i^{g,\max}, \quad \forall i, t, \quad (24)$$

$$q_i^{g,\min} \leq q_{i,t}^g \leq q_i^{g,\max}, \quad \forall i, t, \quad (25)$$

$$p_{i,t+1}^g - p_{i,t}^g \leq p_i^{r,\max}, \quad \forall i, t, \quad (26)$$

$$p_{i,t}^g - p_{i,t+1}^g \leq p_i^{r,\max}, \quad \forall i, t, \quad (27)$$

式中, $p_i^{g,\min}, p_i^{g,\max}$ 分别为节点 i 的最小、最大有功功率, $q_i^{g,\min}, q_i^{g,\max}$ 分别为节点 i 的最小、最大无功功率, $p_i^{r,\max}$ 为节点 i 处发电机的最大爬坡率。式(24)和(25)限制了发电机有功和无功出力的上下限, 式(26)和(27)限制了发电机的爬坡率。

本研究采用线性化的 Distflow 模型表示电力系统的潮流方程^[17], 并忽略网络损耗, 具体表示为

$$V_{i,t} = V_{h,t} - 2(r_{ih} f_{ih,t}^p + x_{ih} f_{ih,t}^q), \quad \forall i, h, t, \quad (28)$$

式中 $V_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻电压幅值的平方。

节点电压和潮流公式可表示为

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max}, \quad \forall i, t, \quad (29)$$

$$(f_{ih,t}^p)^2 + (f_{ih,t}^q)^2 \leq S_{ih}^{\max}, \quad \forall i, h, \quad (30)$$

式中, V_i^{\min}, V_i^{\max} 分别为节点 i 电压幅值平方的最小、最大值, S_{ih}^{\max} 为线路 ih 的最大视在功率。

根据前文所述, 考虑碳排放和用户满意程度的多种负荷侧资源调频优化模型的目标函数包含 4 个部分, 分别为发电成本 C^g 、用户满意度下降成本 C^u 、调频失败惩罚成本 C^f 和碳排放成本 C^c , 具体表示为

$$C^t = C^g + C^u + C^f + C^c, \quad (31)$$

$$C^g = \sum_t \sum_{i \in E_N} [a_i (p_{i,t}^g)^2 + b_i p_{i,t}^g], \quad (32)$$

$$C^u = \sum_t \sum_{i \in E_N} c^{\text{tcl}} |T_{i,j}^{\text{set}} - T_t^{\text{in}}|, \quad (33)$$

$$C^f = \sum_t \sum_{i \in E_N} c^f \Delta p_{i,t}^f, \quad (34)$$

$$C^c = \sum_t \sum_{i \in E_N} c^t e_i^c p_{i,t}^g, \quad (35)$$

式中, C^t 为调频总成本, a_i 和 b_i 为发电成本系数, c^{tcl} 为偏离用户设定温度的单位成本, c^f 为调频失败的单位成本, c^t 为碳税, e_i^c 为节点 i 处发电机的碳排放因子。式(33)为用户满意度的计算公式, 即用户设定的温度与实际室内温度之间的差值, 用户满意度的高低直接影响用户参与调频的意愿和舒适度^[18-19]。

考虑碳排放和用户满意程度的多种负荷侧资源参与调频的优化模型表示为

$$C^t = C^g + C^u + C^c, \quad (36)$$

$$\text{s.t. (1) ~ (30).} \quad (36)$$

由于式(7)的高度非线性化, 原始模型(36)难以被现有的商业求解器直接求解。因此, 本研究将非线性公式(7)通过大 M 法转化为商业求解器易于求解的形式。

首先引入 3 个辅助二元变量 $y_{i,j,t}^{\min}, y_{i,j,t}^{\max}, y_{i,j,t}^{\text{mld}}$ 表示室内温度的指示变量。辅助变量和温度的关系公式为

$$T_{i,j,t}^{\text{in}} \leq T_{i,j}^{\text{min}} + M \cdot (1 - y_{i,j,t}^{\min}), \quad \forall i, j, t, \quad (37)$$

$$T_{i,j,t}^{\text{in}} \geq T_{i,j}^{\text{max}} - M \cdot (1 - y_{i,j,t}^{\max}), \quad \forall i, j, t, \quad (38)$$

$$T_{i,j}^{\text{min}} - M \cdot (1 - y_{i,j,t}^{\text{mld}}) \leq T_{i,j,t}^{\text{in}} \leq T_{i,j}^{\text{max}} + M \cdot (1 - y_{i,j,t}^{\text{mld}}), \quad (39)$$

式中 M 表示一个非常大的数用来对变量进行松弛。

3 个辅助二元变量和空调负荷的运行状态 $s_{i,j,t}$ 建立关系, 公式为

$$s_{i,j,t} \leq 1 - y_{i,j,t}^{\min}, \quad \forall i, j, t, \quad (40)$$

$$s_{i,j,t} \geq y_{i,j,t}^{\max}, \quad \forall i, j, t, \quad (41)$$

$$s_{i,j,t} \geq s_{i,j,t-1} - M \cdot (1 - y_{i,j,t}^{\text{mld}}), \quad \forall i, j, t. \quad (42)$$

因此, 在将非线性公式(7)转化成混合整数线性公式(37)~(42)后, 模型可直接由商业求解器求解。线性化处理后的最终模型可表示为

$$C^t = C^g + C^u + C^f + C^c, \quad (43)$$

$$\text{s.t. (2) ~ (6), (8) ~ (30), (37) ~ (42).} \quad (43)$$

5 算例分析

本研究所提出的负荷侧资源调频策略在改进的 IEEE 33 节点测试系统进行测试, 如图 3 所示。

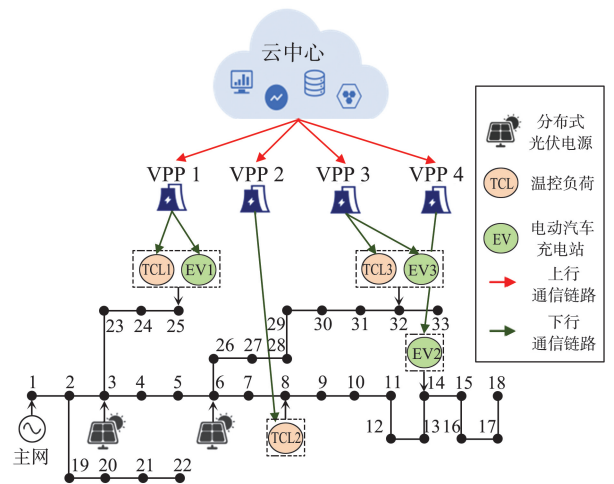


图3 改进的 IEEE 33 节点测试系统图

Fig.3 Modified IEEE-33 bus test system topology

图3 中包括 4 个 VPP 控制单元, 分别位于节点

8、14、25 和 32。各 VPP 控制单元通过 4 条上行链路与云中心进行通信,并与各负荷集群通过下行链路相连进行通信。

各 VPP 控制单元负责调控的负荷侧资源集群相关参数如表 1 所示。

表 1 负荷侧资源集群相关参数

Table 1 Parameters of the demand-side resource cluster

控制单元	位置	温控负荷数量	初始室内温度/℃	电动汽车数量/辆	初始电量占比/%
VPP1	25	50	23	20	15
VPP2	8	100	24	0	
VPP3	32	50	25	50	50
VPP4	14	0		30	85

假设本算例主网电源由传统发电机构成,为突出微网中分布式电源,本研究在节点 3 和 6 引入了分布式光伏电源协同主网中传统发电机的发电任务,其相关数学模型与传统电机类似,不同的是其发电成本为 0。算例分析中的发电机与光伏电源发电占比分别为 80%、20%。

调频指令通过对区域控制误差 (area control error, ACE) 变量进行积分得到,用于调节云边协同系统中的功率差额。调频指令变化如图 4 所示,图 4 中横坐标表示离散时刻,即对应 1 h 观测周期内每 min 的调频指令下发时刻。

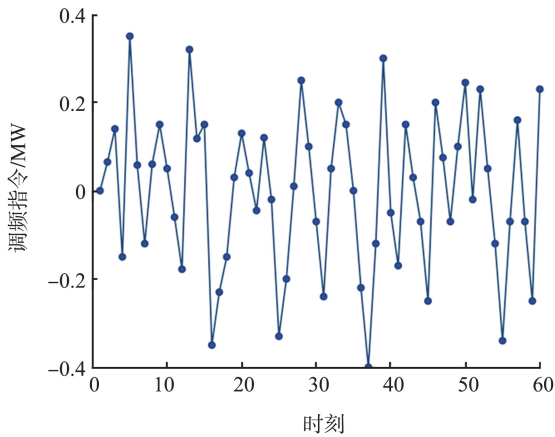


图 4 调频指令变化图

Fig.4 Frequency regulation commands

其他必要参数设置如下^[20-21]: R 为 $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{kW}$, C 为 $1.8\text{ kWh}/^\circ\text{C}$, $T_{i,j}^{\min}$ 为 $23\text{ }^\circ\text{C}$, $\delta_{i,j}$ 为 $2.4\text{ }^\circ\text{C}$, $p_{i,j}^r$ 为 1.2 kW , $p_{i,j}^{\text{ch,max}}$ 、 $p_{i,j}^{\text{dis,max}}$ 为 5 kW , $C_{i,j}^{\text{max}}$ 为 90% , $C_{i,j}^{\text{min}}$ 为 10% , a_i 为 $0.8\text{ } \$/\text{MWh}^2$, b_i 为 $28.868\text{ } \$/\text{MWh}^2$, c^t 为 $18\text{ } \$/\text{ton}$, e_i^c 为 $0.865\text{ ton}/\text{MWh}$, c^f 为 $5\text{ } 000\text{ } \$/\text{MWh}$, 上行链路通信层故障发生率为 5% , 边缘终端层故障发生率为 15% 。所提出的调频策略将由 MATLAB 2024a 和 Gurobi 商业求解器实现。

为验证负荷侧资源调频模型对于降低调频成本、减少调频失败量和提升用户对室内温度满意度的有效性,本研究设计了如下对照试验。

方案一:仅依靠主网电源进行调频响应;

方案二:依靠主网电源和温控负荷进行调频响应;

方案三(所提出方法):同时依靠主网电源、温控负荷和电动汽车充电站进行调频响应。

上述 3 种方案的发电成本、碳排成本、用户满意度下降成本、调频失败惩罚和总成本如表 2 所示。

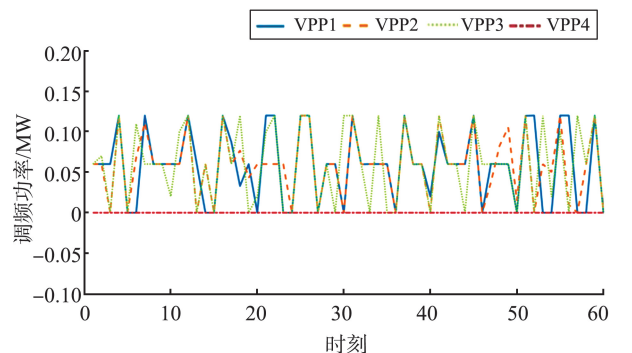
表 2 不同方案的调频成本

Table 2 Frequency regulation costs in different cases

方案	发电成本	碳排成本	用户满意度		总成本
			下降惩罚	调频失败惩罚	
方案一	103.6	55.9	0	62.8	222.3
方案二	107.8	58.1	10.0	31.0	206.9
方案三	102.8	55.5	0.6	0	158.9

在方案一中,总成本为 $222.3\text{ } \$$,调频失败惩罚为 $62.8\text{ } \$$,在 3 种方案中总成本最高。这是因为常规发电机由于存在爬坡率限制,难以满足快速频率调节需求,导致调频失败量增多,调频失败的惩罚加重。方案二的总成本减小至 $206.9\text{ } \$$,调频失败惩罚减小至 $31.0\text{ } \$$,但是用户满意程度下降惩罚增加至 $10.0\text{ } \$$ 。这归因于温控负荷参加调频可以缓解一部分发电机调频压力,减少调频失败量,但室内温度的变化会导致偏离设定温度,进而引起用户满意度下降。方案三(本研究提出的调频策略)的总成本为 $158.9\text{ } \$$,相较于方案一成本降低 28.5% ,在 3 种方案中总成本最低。这是因为温控负荷和电动汽车负荷的共同参与使系统具备出色的频率调节能力,从而完全满足了调频指令,故调频失败惩罚为 0。此外多种负荷侧资源参与调频可以减少发电机的旋转备用容量,进而减少发电成本和碳排成本。

方案二和方案三中 4 个 VPP 控制单元的调频功率变化情况如图 5 所示。



(a) 方案二

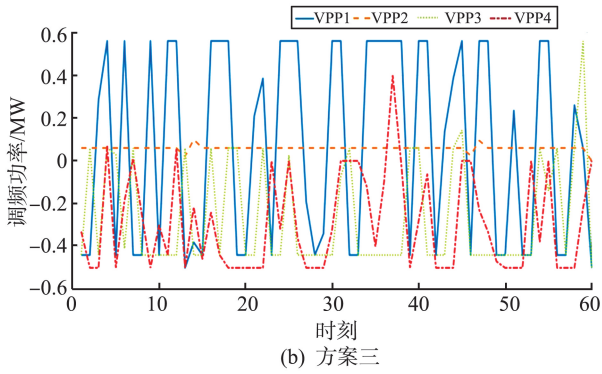


图5 4个VPP控制单元的调频功率

Fig.5 Power for frequency regulation of four VPPs

对于方案二,如图5(a)所示,由于没有电动汽车负荷参与频率调节,负荷侧资源只能提供正功率调节,因此频率调节的灵活性较低。相比之下,由于温控负荷和电动汽车的共同参与,方案三中的频率调节更加灵活。得益于电动汽车的V2G特性,负荷侧资源不仅可以提供正功率,也可以提供负功率。试验结果表明,多种负荷侧资源参与调频可以增加频率响应的灵活性。

为了验证基于云边协同算法的负荷侧资源参与调频策略中出现通信故障时处理能力的有效性,本研究设计了如下对照试验。

方案四:传统调频通信架构,无通信故障处理能力;

方案五(本研究提出的方法):基于云边协同框架进行调频响应,当出现通信故障时,调频任务将转移至其他通信良好的线路。

上述对比方案与所提出方法的发电成本、碳排放成本、用户满意度下降成本、调频失败惩罚和总成本如表3所示。

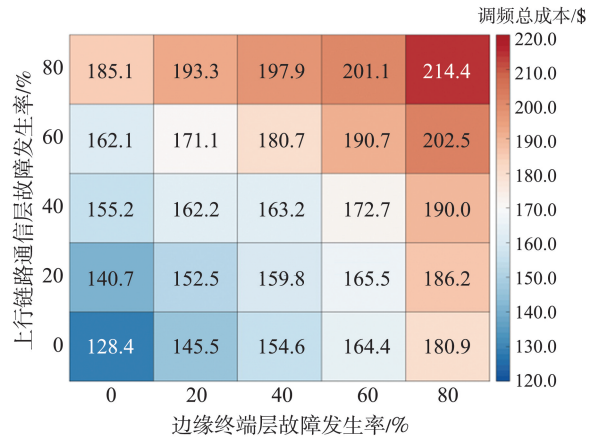
表3 两种调频架构的调频成本

Table 3 Frequency regulation costs of two frequency regulation architectures 单位: \$

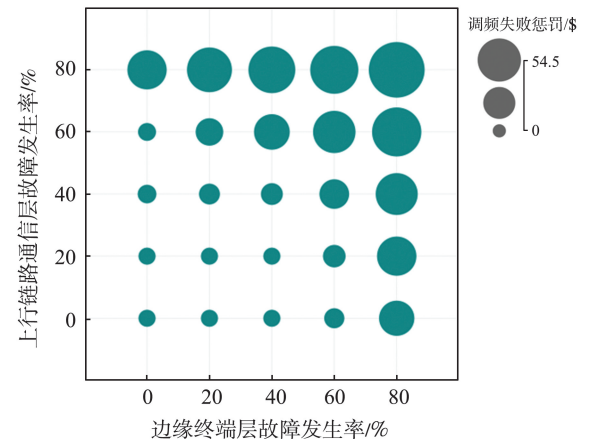
方案	发电成本	碳排放成本	用户满意度下降惩罚	调频失败惩罚	总成本
方案四	99.5	53.7	0	32.5	185.7
方案五	102.8	55.5	0.6	0	158.9

在方案四中,总成本为185.7 \$,调频失败惩罚为32.5 \$,显著高于方案五。这是因为传统调频方法不能处理通信故障风险,当通信系统发生故障时,将对调频指令的下发效率产生显著影响,进而造成调频失败量增加。

上行链路通信层和边缘终端层不同故障率下的调频总成本和调频失败成本如图6所示。



(a) 不同故障发生率下的调频总成本



(b) 不同故障发生率下的调频失败惩罚

图6 不同故障发生率下的调频成本

Fig.6 Frequency regulation cost under different fault incidences

在图6(a)中,随着2个通信层的故障发生率逐渐上升,调频总成本显著上升。当2个通信层无通信故障发生时(故障发生率为0),调频总成本最低,为128.4 \$;当2个通信层的故障率增加至80%时,调频总成本上升至214.4 \$,为所有故障率下的最高总成本。在图6(b)中,当上行链路通信层和边缘终端层故障均处于较小值时(0~20%),系统可以满足所有调频指令,故调频失败惩罚为0。随着故障率逐渐增大,系统调频失败量显著增加,进而引起调频失败惩罚显著增长。当2个通信层的故障率达到80%时,调频失败惩罚值最大,为57.05 \$。该试验表明通信层故障率可以显著影响系统调频成本,特别是调频失败惩罚成本。

6 结论

本研究提出一种基于云边协同架构的负荷侧资源调频优化模型,旨在通过协调温控负荷和电动汽车充电站等多种负荷侧资源,优化电力系统的调

频性能。

(1)该模型分布式地将调频任务分解至各虚拟电厂,降低了云端计算负担,增强了系统的可靠性和用户隐私保护。

(2)本研究引入用户满意度和调频碳排目标函数,并结合通信系统故障模型,对不同故障情况下系统调频成本进行了深入分析。通过在 IEEE 33 节点测试系统上的仿真试验,本研究验证了所提出方法的有效性。

(3)与传统方法相比,该模型在降低调频成本、减少调频失败量以及减少碳排放方面表现出显著优势,调频总成本降低了 28.5%。尤其是在温控负荷和电动汽车共同参与调频的情景下,降低了调频成本。试验结果表明,该模型在未来电力系统中的实际应用具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 于昌海, 庞腊成, 吴继平, 等. 计及多点电池储能系统的电网二次调频协同控制[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 68-76.
YU Changhai, PANG Lacheng, WU Jiping, et al. Coordination control for secondary frequency regulation with participation of multiple battery energy storage systems [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 68-76.
- [2] WANG S Y, WU W C. Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051.
- [3] International Energy Agency. Global energy review: CO₂ emissions in 2021 [EB/OL]. (2022-03-08) [2025-01-03]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>
- [4] 程杉, 李洋洋, 刘炜炜, 等. 电动汽车协助火电机组参与调频辅助服务优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 142-151.
CHENG Shan, LI Fengyang, LIU Weiwei, et al. Optimal control strategy of thermal power units with electric vehicles participating in frequency regulation auxiliary services[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 142-151.
- [5] GUO J Q, LI Y, SHEN Y W, et al. An incentive mechanism design using cchp-based microgrids for wind power accommodation considering contribution rate[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187: 106434.
- [6] CHEN J R, LIU M Y, MILANO F. Aggregated model of virtual power plants for transient frequency and voltage stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4366-4375.
- [7] 宁剑, 吴继平, 江长明, 等. 考虑资源运行特性的可调节负荷调峰调频优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 11-19.
NING Jian, WU Jiping, JIANG Changming, et al. Optimal control strategy of peak and frequency regulation for adjustable loads considering operation characteristics of resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 11-19.
- [8] 徐青山, 王栋, 戴蔚莺, 等. 变频空调负荷虚拟同步机改造及其参与微网互动调控[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 8-14.
XU Qingshan, WANG Dong, DAI Weiyong, et al. Virtual synchronous machine transformation of inverter air conditioning load and its participation in microgrid interactive control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 40(3): 8-14.
- [9] 荆江平, 杨梓俊, 陆晓, 等. 计及补偿效果的需求侧资源调频辅助服务市场机制研究[J]. 电力建设, 2020, 41(2): 30-39.
JING Jiangping, YANG Zijun, LU Xiao, et al. Research on market mechanism of frequency-regulation auxiliary service considering demand-side resources [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(2): 30-39.
- [10] SINGH V P, KISHOR N, SAMUEL P, et al. Impact of communication delay on frequency regulation in hybrid power system using optimized H-infinity controller[J]. IETE Journal of Research, 2016, 62(3): 356-367.
- [11] ZHU Z Q, SUN J, QI G Q, et al. Frequency regulation of power systems with self-triggered control under the consideration of communication costs [J]. Applied Sciences, 2017, 7(7): 688.
- [12] 陈文哲, 孙海顺, 徐瑞林, 等. 电动汽车参与调频服务的云边融合分层调控技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 914-927.
CHEN Wenzhe, SUN Haishun, XU Ruilin, et al. Cloud-edge collaboration based hierarchical dispatch technology for EV participating in frequency regulation service[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 914-927.
- [13] KONG X Y, SUN Y C, KHAN M A, et al. Cyber-physical system planning for VPPs supporting frequency regulation considering hierarchical control and multidimensional uncertainties [J]. Applied Energy, 2024, 353: 122104.
- [14] 刘辉, 吴晓鸣, 苏懿. 基于动态下垂控制的温控负荷一次调频控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 48-57.

- LIU Hui, WU Xiaoming, SU Yi. Thermostatically controlled loads control for primary frequency regulation based on dynamic droop control [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(2): 48-57.
- [15] 李梓瑄, 包宇庆, 宋梦, 等. 计及开关寿命损耗的温控负荷分布式控制策略[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(4): 75-82.
- LI Zixuan, BAO Yuqing, SONG Meng, et al. Distributed control strategy of temperature control loads considering switch life loss [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(4): 75-82.
- [16] PINTO P C, WIN M Z. Communication in a Poisson field of interferers: part I: interference distribution and error probability [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(7): 2176-2186.
- [17] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification: part I [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [18] 祁兵, 陈淑娇, 李彬, 等. 计及用户满意度的可调节负荷资源需求响应优化策略研究[J]. *内蒙古电力技术*, 2023, 41(3): 43-50.
- QI Bing, CHEN Shujiao, LI Bin, et al. Research on demand response optimization strategy of adjustable load resource considering user satisfaction [J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2023, 41(3): 43-50.
- [19] 杨恺, 姚宇, 孙可, 等. 考虑用户满意度的温控负荷能效综合指标模型和调峰策略[J]. *电力需求侧管理*, 2022, 24(5): 36-43.
- YANG Kai, YAO Yu, SUN Ke, et al. Energy efficiency assessment model and peak shaving strategy for TCLs considering consumer satisfaction [J]. *Power Demand Side Management*, 2022, 24(5): 36-43.
- [20] HAO J, ZHAO W M, ZHANG Z B, et al. Coordinated frequency regulation strategy for multiple demand-side resources considering carbon emissions [C]// 2024 6th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu, China: IEEE, 2024: 162-167.
- [21] 李兆伟, 张恒旭, 曹永吉, 等. 计及锅炉热动态影响的机组一次调频能力评估方法[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2022, 52(5): 35-43.
- LI Zhaowei, ZHANG Hengxu, CAO Yongji, et al. Assessment scheme for primary frequency regulation capability considering boiler thermal dynamic [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2022, 52(5): 35-43.
- (编辑:郭少华)

(上接第178页)

- [22] ZHANG H F, GAO M M, FAN H H, et al. A dynamic model for supercritical once-through circulating fluidized bed boiler-turbine units [J]. *Energy*, 2022, 241: 122914.
- [23] Gu A, Dao T. Mamba: Linear-time sequence modeling with selective state spaces [C]//First conference on language Modeling, 2024.
- [24] GU A, GOEL K, RÉ C. Efficiently modeling long sequences with structured state spaces [EB/OL]. (2022-08-05) [2023-12-15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.00396>
- [25] 闫姝. 超超临界机组非线性控制模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013: 43-44.
- YAN Shu. A non-linear control model of ultra-supercritical unit [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013: 43-44.
- [26] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, USA. IEEE, 2016: 770-778.
- [27] LOSHCHELOV I, HUTTER F. Decoupled weight decay regularization [EB/OL]. (2017-11-14) [2023-12-15]. <https://arxiv.org/abs/1711.05101>
- [28] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [29] CHO K, VAN MERRIENBOER B, GULCEHRE C, et al. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation [J]. *Computer Science*, 2014.
- (编辑:熊小原)