

寒潮天气下考虑电动汽车参与灵活调节的电网优化调度方法

焦治杰, 许寅, 刘墨, 王小君, 和敬涵, 司方远

(北京交通大学电气工程学院, 北京市 100044)

摘要: 寒潮来临引发天气温度突发性骤降, 此时负荷的用能增加、新能源的出力锐减以及系统备用和上级电网的供电能力不足, 导致电网内部短时间内出现较大的电力缺额问题。随着负荷侧电动汽车基数的增加及灵活性资源需求响应能力的提升, 调节负荷侧灵活性资源以弥补寒潮引起的电力缺额具备可行性。文中首先明确了资源的灵活性属性随场景的变化而变化, 挖掘并构建了寒潮来临时电动汽车等灵活性资源的模型; 其次, 考虑到灵活性资源中的电动汽车需要通过聚合来参与电网调度, 构建了考虑电动汽车联网时间不确定性的电动汽车聚合方法; 然后, 基于寒潮来临时的灵活性资源、非民生类负荷和民生类负荷, 提出了以社会损失最小为目标的寒潮天气电网滚动优化调度方法, 得出电网中各资源在寒潮天气下的用电调整量; 最后, 通过算例验证了所提方法能够有效应对寒潮来临时电网的电力缺额问题。

关键词: 灵活性资源; 电动汽车; 寒潮; 优化调度; 车网互动

0 引言

近年来, 全球气候变化导致极端自然灾害频发, 突发性的低温天气多次成为电力系统大停电的诱因^[1-2]。例如, 2008年中国南方雪灾、2021年美国得克萨斯州冻雨、2023年欧洲暴风雪和加拿大冰暴等。突发性的气温骤降会引发电力系统的供能短缺, 严重影响电力系统的安全运行, 一旦发展成为大停电, 会对社会造成巨大的经济损失, 甚至严重威胁着居民的生命安全^[3-4]。因此, 亟须研究寒潮来临时电力系统的优化调度方法, 以防止大停电事故的发生。

针对寒潮对电力系统的影响, 文献[5-6]以美国得克萨斯州2021年大停电事件为例, 分析了在低温天气下电力系统的运行表现。寒潮来临时, 系统内源、荷特征发生明显的变化。在荷侧, 居民的采暖需求急剧增加, 系统内负荷大幅上升^[7]。在源侧, 风机叶片由于覆冰难以发电, 光伏发电出力由于温度降低、光伏板被冰雪覆盖而减少, 上级电网能够提供的电力有限。源荷变化导致系统出现供电缺口。在上级电网的日内现货市场中, 购电价格高昂, 并且可能会出现联络线传输受限的问题。紧急增加系统的备用机组需要一定时间, 难以迅速缓解供需关系。因此, 需要挖掘系统负荷侧灵活性资源, 通过调节灵活

性资源的用能特性来保障电力系统安全、持续供电^[8-9]。

目前, 在挖掘负荷侧灵活性资源以参与电力系统优化调度方面已经开展了大量的研究^[10-14]。在灵活性资源利用方面, 文献[15]基于电动汽车、温控负荷等灵活性资源, 提出了日前能量和备用联合优化方法与实时优化调度策略。在灵活性资源聚合调控方面, 文献[16]提出了一种可扩展的灵活性资源聚合方法来定量描述系统灵活性及其价格, 能够支撑考虑经济公平性的日前市场出清。文献[17]提出了一种用于计算灵活性资源聚合体有功功率和无功功率成本的分析函数, 能够支撑系统灵活性资源的经济调控。目前, 在灵活性资源参与电力系统优化调度方面已有大量研究, 为应对寒潮来临时电力的调度问题提供了一个较好的解决途径。在应对极端天气方面, 文献[18]基于台风下受端电网的响应特性, 提出了多阶段协同弹性提升的应对策略。文献[19]总结归纳了新型电力系统在高温干旱天气下所面临的挑战, 并提出了相应的解决思路及措施。与其他极端天气不同, 寒潮来临时负荷特性、资源的灵活性属性会发生变化, 需要对寒潮来临时的电能供应问题进一步研究。

系统的灵活性资源会随着应用场景的变化而变化。在寒潮天气下, 由于居民对供暖的需求, 空调、热水器等热属性灵活资源转变为了刚性负荷。为了保障居民健康和生命安全, 重工业负荷和一般工商

收稿日期: 2024-05-19; 修回日期: 2024-09-28。

上网日期: 2024-12-02。

国家重点研发计划资助项目(2022YFB2403400)。

业负荷等非民生类负荷也相对成为可削减资源。近几年,电动汽车规模迅速发展,以中国寒冷地区吉林省为例,预测到2025年电动汽车保有量能够达到21.10万辆^[20],这为电动汽车参与寒潮来临时的系统调度提供了基数支撑。

本文针对寒潮来临时配电网的优化调度展开了研究。首先,构建了应对寒潮的电能优化调度框架;其次,分析了寒潮来临时灵活性资源类型和特性的变化,并进行了建模;然后,构建了小型私人电动汽车(small private electric vehicle, SPEV)和大型公用电动汽车(large public electric vehicle, LPEV)参与车网互动(vehicle-to-grid, V2G)的聚合模型,在构建SPEV聚合模型时,考虑了由车主意愿所导致的联网时间不确定性;最后,以社会损失最小为目标,提出了寒潮来临时灵活性资源、非民生类负荷和民生类负荷的供能调整滚动优化方法。

1 应对寒潮来临保供问题的优化调度框架

当寒潮来临导致气温骤降时,电力系统中源、

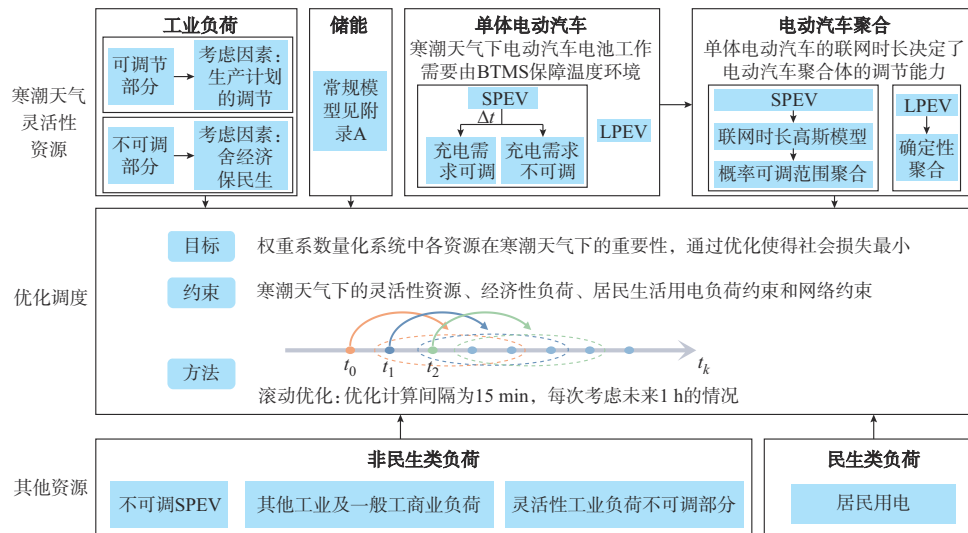


图1 应对寒潮引发短时供电缺额的资源优化调配框架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of resource optimization and allocation framework for addressing short-term power supply shortages caused by cold wave

首先,寒潮来临时灵活性资源的调节成本相对于非民生类负荷和民生类负荷较小,可以优先调节灵活性资源以减少社会损失。寒潮天气下的灵活性资源包括SPEV、LPEV、灵活性工业负荷和储能等。对于SPEV和LPEV,在寒潮天气下,电池的充电速率减缓、充电时长增长、放电效率降低,这主要是由于电动汽车电池在充放电时,电池热管理系统(battery thermal management system, BTMS)需要消耗一部分电能加热电池,以保持电池工作在合适的工作温度范围内^[21]。因此,在对SPEV和LPEV

荷、储侧资源特点发生了变化,如附录A图A1所示。荷侧由于居民对采暖的需求,电力负荷急剧增加;而源侧电力供应能力不足,难以支撑负荷的大幅增加。需要依据资源在寒潮来临时的灵活性和在社会中的重要性对负荷用电进行调整,以保障电力系统持续运行。

从常规天气到低温天气,随着场景的变化,负荷侧各资源特点发生了改变:1)部分资源的灵活性属性发生了变化,例如,居民空调、热水器负荷从原来的灵活性资源变为刚需负荷;2)不同负荷在社会中的重要性发生了改变。在常规场景中,居民用电属于第三类负荷。而在气温骤降时,为了优先保障居民的健康和生命安全,居民用电负荷的重要性也应随之提升。

本文根据各资源在寒潮来临时的可调节特性和对社会的重要性,将其划分为了灵活性资源、非民生类负荷和民生类负荷3类,提出了如图1所示的寒潮来临时电能的优化调度框架。

建模时,主要考虑了寒潮天气下电池充放电时BTMS的影响。对于可调工业负荷,可以通过重新编排生产计划来尽可能减少寒潮天气下的耗电。根据最小生产计划所需的电能,在建模时将可调工业负荷分为了两部分,分别是可调部分和不可调部分。可调部分以灵活性资源参与调节,不可调部分以非民生类负荷参与优化。

其次,考虑到电动汽车通过充电桩以集群的形式参与调度,需要构建SPEV和LPEV聚合模型。电动汽车的联网时长决定了聚合体的调节能力。

LPEV是公共设施,易于管理与调控,可以通过签订合约的方式规定联网时长与车辆规模。SPEV的联网时长取决于车主意愿,具有较大的随机性,故构建了考虑联网时长的SPEV聚合模型。

最后,以社会福利损失最小为目标,构建了考虑寒潮天气灵活性资源、非民生类负荷和民生类负荷的优化问题。通过每15 min一次的滚动优化来解决寒潮来临时的电能调度问题。

2 寒潮天气下的灵活性资源模型

寒潮天气下,灵活性资源模型主要包括SPEV、LPEV、灵活性工业负荷和储能(见附录B)等。本文分别对单体SPEV、单体LPEV和灵活性工业负荷进行建模。考虑到寒潮天气下,温度对电动汽车电池充放电的影响,首先分析了寒潮天气下电动汽车的充放电特征,基于此,对单体SPEV和单体LPEV进行了建模。当发生雪灾、冰冻等极端自然灾害时,能源供给的重心需要从经济建设转移到保障人民生命安全与正常生活需求上来。因此,对灵活性工业负荷也进行了建模,根据最小生产计划所需的电能,将其分为了可灵活调节和不可调部分。

2.1 寒潮天气下电动汽车充放电特征

寒潮天气下,SPEV和LPEV充电速度减慢、充电时间增长、放电效率降低,这主要是由于电池对工作温度的需求,BTMS需要通过消耗电能来对电池加热,以保障电池工作在合理温度范围内。电动汽车电池加热的方式主要有外部加热和自加热两种^[22]。外部加热方式结构复杂、加热效率低、加热不均匀,目前较少采用。电池自加热主要包括两种:充电自加热和放电自加热方式。充电自加热方式通过电池内部化学反应产生的热量来加热电池,这种方式存在析锂风险,需要对充电电流幅值严格把控。采用放电自加热方式的电池在放电过程中的负极电位较高,几乎不存在析锂风险,故该方式被广泛应用。根据放电自加热方式,将SPEV和LPEV联网时的电能传递路径抽象为图2所示示意图。

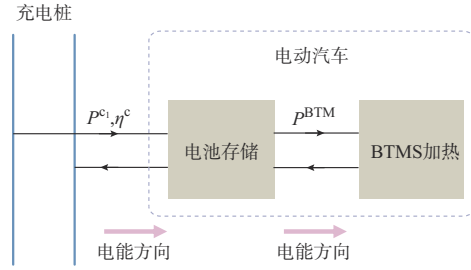
在充电时,充电桩以功率 P^{c_i} 向电动汽车充电;电动汽车电池以效率 η^c 往电池内部转化电能,并向BTMS提供加热功率 P^{BTM} 。充电时各变量之间的关系为:

$$P^{c_i} = P^c \quad (1)$$

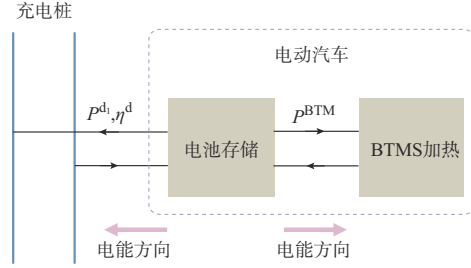
$$P^{ch} = \eta^c P^{c_i} - P^{BTM} \quad (2)$$

式中: P^c 为电池的额定充电功率; P^{ch} 为电池存储电能的功率。

在放电时,电池以额定放电功率 P^d 往充电桩和BTMS放电,流向充电桩的功率为 P^{d_i} ,流向BTMS的功率为 P^{BTM} 。放电时各变量之间的关系为:



(a) 电动汽车充电示意图



(b) 电动汽车放电示意图

图2 电动汽车联网时的电能传递路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy transfer path when electric vehicles are connected to grid

$$P^{d_i} = \eta^d \left(\frac{P^d}{\eta^d} - P^{BTM} \right) = P^d - \eta^d P^{BTM} \quad (3)$$

式中: η^d 为放电效率。

BTMS用来维持电动汽车电池工作在正常的工作温度范围内。在寒潮天气下,当电池工作温度 T_B 小于正常工作最低温度 T_B^{\min} 时,需要通过BTMS以功率大小 ϵ 加热至能够正常工作的最高温度 T_B^{\max} ,然后停止加热。BTMS的功率函数为:

$$P^{BTM} = \begin{cases} \epsilon & T_B \leq T_B^{\min} \\ 0 & T_B^{\min} < T_B \leq T_B^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

P^{BTM} 的加热时间 t_{on}^{BTM} 和停止加热时间 t_{off}^{BTM} 可以表示为:

$$t_{on}^{BTM} = \frac{(T_B^{\max} - T_B)mc + k(T_B - T_{out})}{\epsilon\eta^{BTM}} \quad (5)$$

$$t_{off}^{BTM} = \ln k + \ln(T_B - T_{out}) \quad (6)$$

式中: m 为电池的质量; c 为电池材料的比热容; η^{BTM} 为电池的电热转换效率; k 为温度耗散系数; T_{out} 为寒潮来临时的环境温度。

从式(4)可以看出,在电动汽车联网期间, P^{BTM} 是一个与电池温度相关的变量。在 P^{BTM} 变化的情况下,电动汽车电池的荷电状态与最快充满电所需要的时间难以评估。因此,采用BTMS在一个工作温度周期内的功率平均值 \bar{P}^{BTM} 来近似表述BTMS的耗电功率:

$$\bar{P}^{BTM} = \frac{\epsilon t_{on}^{BTM}}{t_{on}^{BTM} + t_{off}^{BTM}} \quad (7)$$

2.2 单体 SPEV 模型

寒潮来临时,居民为了保障生活需求,需要外出采买物资。SPEV 在方便居民出行的同时,也可提供温暖的出行环境。这类负荷在寒潮天气下的特点是可替代性小、基数较大、联网时间灵活,能够通过调整联网期间 SPEV 的充放电状态提高寒潮来临时电力系统的灵活性。

对于单体 SPEV 模型,本文参考并扩充了文献[23-24]中的模型。文献[23-24]通过刻画 SPEV 能量和功率的充电边界来描述其所有充电轨迹的可行集,用于表征 SPEV 参与能量调节的灵活性。在寒潮来临时,SPEV 电池的环境温度难以保证充放电的安全性,需要通过 BTMS 对电动汽车电池的充放电温度进行调整。本文在文献[23-24]模型的基础上,考虑了 BTMS 在 SPEV 联网过程中的作用。

单体 SPEV 的功率和能量边界取决于 4 个参数,分别是 $e_{spev,i}^+$ 、 $e_{spev,i}^-$ 、 $p_{spev,i}^+$ 和 $p_{spev,i}^-$ 。其中, $e_{spev,i}^+$ 表示电网向第 i 个 SPEV 充电的能量上边界,即从电网向 SPEV 存储电能最快的路径; $e_{spev,i}^-$ 表示电网向第 i 个 SPEV 充电的能量下边界,即从电网向 SPEV 存储电能最慢的路径; $p_{spev,i}^+$ 表示第 i 个 SPEV 与电网互动的功率上边界; $p_{spev,i}^-$ 表示第 i 个 SPEV 与电网互动的功率下边界。以上 4 个变量的集合构成了单体 SPEV 充放电行为的可行集边界。

在构建寒潮来临时单体 SPEV 充放电模型之前,需要明确其接入电网期间的首末状态与可行集边界参数之间的关系。假设第 i 个 SPEV 接入电网的起始荷电状态为 $S_{spev,i}^a$,离网时能够满足用户出行需求的荷电状态为 $S_{spev,i}^d$,第 i 个 SPEV 电池容量为 $C_{spev,i}$,此时,SPEV 电池从电网获取的最大电量 $e_{spev,i}^{\max}$ 、能够满足用户需求时获取的电量 $e_{spev,i}^d$ 和电池能够满足放电要求时从电网获取的最小电量 $e_{spev,i}^{\min}$ 分别为:

$$e_{spev,i}^{\max} = (1 - S_{spev,i}^d) C_{spev,i} \quad (8)$$

$$e_{spev,i}^d = (S_{spev,i}^d - S_{spev,i}^a) C_{spev,i} \quad (9)$$

$$e_{spev,i}^{\min} = (S_{spev,i}^{\min} - S_{spev,i}^a) C_{spev,i} \quad (10)$$

式中: $S_{spev,i}^{\min}$ 为第 i 个 SPEV 的最小荷电状态。

根据 $e_{spev,i}^d$ 可以计算出第 i 个 SPEV 达到荷电状态 $S_{spev,i}^d$ 所用的最短时间 $\Delta t_{spev,i}^{d,\min}$ 为:

$$\Delta t_{spev,i}^{d,\min} = \frac{e_{spev,i}^d}{\eta_{spev,i}^c P_{spev,i}^c - \bar{P}_{spev,i}^{BTM}} \quad (11)$$

式中: $P_{spev,i}^c$ 、 $\eta_{spev,i}^c$ 分别为第 i 个 SPEV 的充电功率和充电效率; $\bar{P}_{spev,i}^{BTM}$ 为第 i 个 SPEV 的 BTMS 在一个工作温度周期内的功率平均值。

记第 i 个 SPEV 的预期联网时间为 $\Delta t_{spev,i}^{ex}$,根据 $\Delta t_{spev,i}^{ex}$ 与 $\Delta t_{spev,i}^{d,\min}$ 的大小关系,将 SPEV 与电网的互动

分为充电需求不可调和充电需求可调两种情况,并分别对 SPEV 进行建模。

2.2.1 充电需求不可调

当 $\Delta t_{spev,i}^{ex} \leq \Delta t_{spev,i}^{d,\min}$ 时,SPEV 需要以最大充电功率在 $\Delta t_{spev,i}^{ex}$ 内持续充电,这种情况下的 SPEV 没有调节灵活性,只能作为用电负荷。在 $\Delta t_{spev,i}^{ex}$ 期间,SPEV 功率可调范围的上边界和下边界重合,为存储电能的最大功率。相应地,能量上边界和下边界也重合。此时,SPEV 的模型为:

$$p_{spev,i}(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq t_{spev,i}^a \cup \tau > t_{spev,i}^d \\ \eta_{spev,i}^c P_{spev,i}^c - \bar{P}_{spev,i}^{BTM} & t_{spev,i}^a < \tau \leq t_{spev,i}^d \end{cases} \quad (12)$$

$$e_{spev,i}(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq t_{spev,i}^a \\ e_{spev,i}(\tau - \Delta t) + p_{spev,i}(\tau) \Delta t & t_{spev,i}^a < \tau \leq t_{spev,i}^d \\ p_{spev,i}(\tau) t_{spev,i}^d & \tau > t_{spev,i}^d \end{cases} \quad (13)$$

式中: $p_{spev,i}(\tau)$ 为 τ 时刻第 i 个 SPEV 电池的能量存储功率; $e_{spev,i}(\tau)$ 为 τ 时刻第 i 个 SPEV 电池累积获取的电能; $t_{spev,i}^a$ 、 $t_{spev,i}^d$ 分别为第 i 个 SPEV 开始和停止充电时刻; Δt 为充电时长。

2.2.2 充电需求可调

当 $\Delta t_{spev,i}^{ex} > \Delta t_{spev,i}^{d,\min}$ 时,不仅能够保证在联网期间 SPEV 的荷电状态达到 $S_{spev,i}^d$,而且还具有一定的充放电调节灵活性。

在 SPEV 的充放电过程中,由于寒潮天气的影响,BTMS 一直处于对环境温度加热的状态,SPEV 充放电功率上、下边界模型分别见式(14)、式(15)。SPEV 电池与电网交互的能量状态上边界取决于能量存储速率和 $e_{spev,i}^{\max}$,下边界取决于放电速率、 $e_{spev,i}^{\min}$ 和 SPEV 离网时所要达到的能量 $e_{spev,i}^d$ 。能量上、下边界模型分别见式(16)、式(17)。

$$p_{spev,i}^+(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq t_{spev,i}^a \cup \tau > t_{spev,i}^d \\ \eta_{spev,i}^c P_{spev,i}^c - \bar{P}_{spev,i}^{BTM} & t_{spev,i}^a < \tau \leq t_{spev,i}^d \end{cases} \quad (14)$$

$$p_{spev,i}^-(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq t_{spev,i}^a \cup \tau > t_{spev,i}^d \\ P_{spev,i}^d - \eta_{spev,i}^d \bar{P}_{spev,i}^{BTM} & t_{spev,i}^a < \tau \leq t_{spev,i}^d \end{cases} \quad (15)$$

$$e_{spev,i}^+(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq t_{spev,i}^a \\ \min \{ e_{spev,i}(\tau - \Delta t) + (\eta_{spev,i}^c P_{spev,i}^c - \bar{P}_{spev,i}^{BTM}) \Delta t, e_{spev,i}^{\max} \} & t_{spev,i}^a < \tau \leq t_{spev,i}^d \\ e_{spev,i}^+(\tau - t_{spev,i}^d) & \tau > t_{spev,i}^d \end{cases} \quad (16)$$

$$e_{\text{spev},i}^-(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq t_{\text{spev},i}^a \\ \max \{ e_{\text{spev},i}(\tau - \Delta t) - (P_{\text{spev},i}^d - \eta_{\text{spev},i}^d \bar{P}_{\text{spev},i}^{\text{BTM}}) \Delta t, e_{\text{spev},i}^{\min} \} & t_{\text{spev},i}^a < \tau \leq t_{\text{spev},i}^d \\ e_{\text{spev},i}^d & \tau > t_{\text{spev},i}^d \end{cases} \quad (17)$$

式中： $P_{\text{spev},i}^d$ 、 $\eta_{\text{spev},i}^d$ 分别为第 i 个 SPEV 的放电功率和放电效率。

2.3 单体 LPEV 模型

在寒潮来临时, LPEV 运营商出于经济、安全等因素考虑, 部分 LPEV 会调整运行时间, 以躲过寒潮天气带来的影响。这类寒潮来临时停运的 LPEV 可以作为储能装置挂接在电网上, 用于电力电量的灵活性调整。与 SPEV 的区别在于, 寒潮来临时 LPEV 没有出行需求, 对最终电量状态没有要求, 在应对寒潮天气的整个时间段内都可以参与和电网的互动。与 SPEV 变量的表示方法类似, 其充放电功率的上、下边界可以表示为:

$$p_{\text{lpev},i}^+(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq t_{\text{lpev},i}^a \\ \eta_{\text{lpev},i}^c P_{\text{lpev},i}^c - \bar{P}_{\text{lpev},i}^{\text{BTM}} & \tau > t_{\text{lpev},i}^a \end{cases} \quad (18)$$

$$p_{\text{lpev},i}^-(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq t_{\text{lpev},i}^a \\ P_{\text{lpev},i}^d - \eta_{\text{lpev},i}^d \bar{P}_{\text{lpev},i}^{\text{BTM}} & \tau > t_{\text{lpev},i}^a \end{cases} \quad (19)$$

式中: 下标 lpev 表示 LPEV 对应的变量, 下同。

由于 LPEV 的能量状态受 BTMS 用电的影响, 并不能等效为储能装置模型。其能量上边界的决定因素与 SPEV 相同, 为能量存储速率和 $e_{\text{lpev},i}^{\max}$ 。LPEV 不需要考虑最终的能量状态, 其能量下边界仅取决于放电速率和 $e_{\text{lpev},i}^{\min}$ 。构建的 LPEV 能量上、下边界可以分别表示为:

$$e_{\text{lpev},i}^+(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq t_{\text{lpev},i}^a \\ \min \{ e_{\text{lpev},i}(\tau - \Delta t) + (\eta_{\text{lpev},i}^c P_{\text{lpev},i}^c - \bar{P}_{\text{lpev},i}^{\text{BTM}}) \Delta t, e_{\text{lpev},i}^{\max} \} & \tau > t_{\text{lpev},i}^a \end{cases} \quad (20)$$

$$e_{\text{lpev},i}^-(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq t_{\text{lpev},i}^a \\ \max \{ e_{\text{lpev},i}(\tau - \Delta t) - (P_{\text{lpev},i}^d - \eta_{\text{lpev},i}^d \bar{P}_{\text{lpev},i}^{\text{BTM}}) \Delta t, e_{\text{lpev},i}^{\min} \} & \tau > t_{\text{lpev},i}^a \end{cases} \quad (21)$$

2.4 工业负荷模型

在寒潮来临时, 为了保障居民的生命安全, 考虑通过舍弃一定的非民生类负荷以优先向民生类负荷供电。而电网中部分工业负荷具有调节能力, 为应

对寒潮天气引发的电力缺额提供了解决途径。

工业负荷在用电构成中的占比大, 负荷用电需求相对稳定。其中, 以化工、铁路、采矿等行业为例的部分工业负荷, 由于行业的特殊性以及对供电的稳定性和可靠性要求较高, 不具备调节能力。钢铁加工、碳化硅以及水泥生产等负荷的可调范围上下限相对明确, 具有良好的调节潜力, 可以通过优化安排生产计划, 将不紧急、可推迟的生产任务推迟至电力短时缺额时间之后。在建模时, 式(22)考虑了可调功率边界, 式(23)考虑了调整速率, 式(24)、式(25)考虑了调整后下网电力的边界, 式(26)考虑了生产计划, 所构建的模型如下:

$$P_{s,i}^{\text{adj}-} \leq P_{s,i}^{\text{adj}1} \leq P_{s,i}^{\text{adj}+} \quad (22)$$

$$r_{s,i}^- \leq P_{s,i}^{\text{adj}1}(t_k) - P_{s,i}^{\text{adj}1}(t_k - t_{k-1}) \leq r_{s,i}^+ \quad (23)$$

$$P_{s,i}^d = P_{s,i}^{\text{base}} - P_{s,i}^{\text{adj}1} \quad (24)$$

$$P_{s,i}^d \leq P_{s,i}^d \leq P_{s,i}^d + \quad (25)$$

$$E_{s,i}^- \leq \sum_k P_{s,i}^d t_k \leq E_{s,i}^+ \quad (26)$$

式中: $s \in \{\text{Steel}, \text{SiC}, \text{Cement}\}$, 其中, Steel、SiC、Cement 分别表示钢铁加工、碳化硅以及水泥生产类工业负荷; $P_{s,i}^{\text{adj}1}$ 为第 i 个工业负荷 s 在寒潮来临时通过调整生产计划带来的功率调节量; $P_{s,i}^{\text{adj}+}$ 和 $P_{s,i}^{\text{adj}-}$ 分别为第 i 个工业负荷 s 通过调整生产计划带来的功率调节量上、下边界; $r_{s,i}^+$ 和 $r_{s,i}^-$ 分别为第 i 个工业负荷 s 调节速率的上、下边界; $P_{s,i}^{\text{base}}$ 为第 i 个工业负荷 s 未参与调节时的功率需求; $P_{s,i}^d$ 为第 i 个工业负荷 s 参与调节后实际的需求功率; $P_{s,i}^d +$ 和 $P_{s,i}^d -$ 分别为第 i 个工业负荷 s 注入功率的上、下边界; t_k 为第 k 个时段; $E_{s,i}^+$ 和 $E_{s,i}^-$ 分别为寒潮引起电力短缺时持续时间段内负荷最大、最小生产计划需要的电能。

当系统内所有灵活性资源参与调节后, 还未能使得系统达到源-荷平衡状态, 此时需要进行切负荷操作。这类工业负荷在参与系统切负荷时, 其模型可以表示为:

$$0 \leq P_{s,i}^{\text{adj}2} \leq P_{s,i}^{\text{base}} - P_{s,i}^{\text{adj}+} \quad (27)$$

$$P_{s,i}^{\text{adj}2}(t_k) \geq P_{s,i}^{\text{adj}2}(t_{k+1}) \quad (28)$$

式中: $P_{s,i}^{\text{adj}2}$ 为通过切负荷带来的功率调节量。

3 考虑联网时长随机性的电动汽车聚合方法

3.1 电动汽车功率、能量聚合方法

充电需求不可调的单体 SPEV、充电需求可调的单体 SPEV 和单体 LPEV 在参与 V2G 的过程中, 通过 SPEV 充电站和 LPEV 充电站与电力系统进行能量交互。因此, 要计算 SPEV 和 LPEV 对电网的调节能力, 需要聚合计算 SPEV 充电站和 LPEV 充电站的功率, 建立能量调节外特性模型。充电需求不可调的 SPEV 功率 $P_{\text{SPEVUN}}(t)$ 、能量聚合

模型 $E_{\text{SPEVUN}}(t)$ 分别见式(29)和式(30)。充电需求可调的SPEV和LPEV功率、能量聚合模型分别见式(31)和式(32)。

$$P_{\text{SPEVUN}}(t) = \sum_i p_{\text{spev},i}(\tau) \quad (29)$$

$$E_{\text{SPEVUN}}(t) = \sum_i e_{\text{spev},i}(\tau) \quad (30)$$

$$\begin{cases} P_{\text{SPEV}}^+(t) = \sum_i p_{\text{spev},i}^+(\tau) \\ P_{\text{SPEV}}^-(t) = \sum_i p_{\text{spev},i}^-(\tau) \\ P_{\text{LPEV}}^+(t) = \sum_i p_{\text{lpev},i}^+(\tau) \\ P_{\text{LPEV}}^-(t) = \sum_i p_{\text{lpev},i}^-(\tau) \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} E_{\text{SPEV}}^+(t) = \sum_i e_{\text{spev},i}^+(\tau) \\ E_{\text{SPEV}}^-(t) = \sum_i e_{\text{spev},i}^-(\tau) \\ E_{\text{LPEV}}^+(t) = \sum_i e_{\text{lpev},i}^+(\tau) \\ E_{\text{LPEV}}^-(t) = \sum_i e_{\text{lpev},i}^-(\tau) \end{cases} \quad (32)$$

式中: $P_{\text{SPEV}}^+(t)$ 、 $P_{\text{SPEV}}^-(t)$ 和 $P_{\text{LPEV}}^+(t)$ 、 $P_{\text{LPEV}}^-(t)$ 分别为SPEV和LPEV聚合后的功率上、下边界; $E_{\text{SPEV}}^+(t)$ 、 $E_{\text{SPEV}}^-(t)$ 和 $E_{\text{LPEV}}^+(t)$ 、 $E_{\text{LPEV}}^-(t)$ 分别为SPEV和LPEV聚合后的能量上、下边界。

3.2 考虑联网时间随机性的电动汽车聚合可行域概率模型

LPEV属于公共资源,可以通过合约的方式与LPEV运营商达成在寒潮来临时参与V2G的车辆规模。因此,LPEV资源功率和能量的上/下边界 $P_{\text{LPEV}}^+/P_{\text{LPEV}}^-$ 和 $E_{\text{LPEV}}^+/E_{\text{LPEV}}^-$ 可根据式(31)、式(32)获得。而SPEV联网时长取决于车主,随机性较大,只有当联网时长大于 $\Delta t_{\text{spev},i}^{\text{d,min}}$ 时,SPEV才具有调节潜力。因此,需要结合SPEV联网时长的随机性,进一步构建SPEV在寒潮来临时与电网互动的概率模型。

3.2.1 单体SPEV联网时间概率模型

要构建SPEV群体在寒潮天气下功率、能量可调范围的概率模型,首先需要对单体SPEV联网时间模型进行建模。本文运用高斯分布来描述单体SPEV联网时间的概率密度函数 $f_{\text{spev}}(t)$ 为:

$$f_{\text{spev}}(\Delta t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta t - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \mu &\approx \gamma \Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,max}} = \gamma \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_{\text{spev},i}^{\text{d,max}} = \\ &\gamma \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{e_{\text{spev},i}^{\text{max}}}{\eta_{\text{spev},i}^c P_{\text{spev},i}^c - \bar{P}_{\text{spev},i}^{\text{BTM}}} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,min}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_{\text{spev},i}^{\text{d,min}} \quad (35)$$

$$\sigma = \rho_{T/T_0} (\Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,max}} - \Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,min}}) \quad (36)$$

式中: μ 、 σ 分别为SPEV联网时间的概率密度函数的均值与方差; $\Delta t_{\text{spev},i}^{\text{d,max}}$ 为第 i 个SPEV从联网开始到充满电的最短时间; N 为统计的SPEV数目,通过计算 N 个SPEV充电最短时间的均值,得到单体SPEV以最快速度充满电的平均时间 $\Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,max}}$; $\Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,min}}$ 为单体SPEV以最快速度充电至能够满足出行需求电量的平均时间; γ 为政策因子,是常系数,用于描述电网运营商出台V2G政策对SPEV联网时间的影响,每一个激励政策对应一个政策因子,激励越高,政策因子数值越大; ρ_{T/T_0} 为温度影响因子,用于描述气温变化对联网时间分布的影响,在参照温度 T_0 下, ρ_{T/T_0} 取值为1。

在式(34)中,考虑到SPEV车主联网的主要目的是给电动车充满电,可以用 $\Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,max}}$ 来估计单体SPEV联网时间概率密度的均值 μ ,当运营商发布V2G政策后,SPEV联网目的既有充电,又包括对V2G政策的响应,此时,均值 μ 也会受政策因子 γ 的影响。式(36)考虑了温度 T 对SPEV联网时间概率密度的影响。假设 $\gamma=1$ 且 $\rho_{T/T_0}=1$ 时,概率密度函数 f_{spev} 是一个确定性函数,以 $\Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,min}}$ 为分界线,充电需求可调和充电需求不可调的概率为确定概率。因此,当SPEV接入电网时,其充电需求可调的概率模型可记为:

$$\begin{cases} P\{\text{单体充电需求不可调}\} = P(\Delta t \leq \Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,min}}) = a \\ P\{\text{单体充电需求可调}\} = P(\Delta t > \Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,min}}) = 1 - a \end{cases} \quad (37)$$

式中: $P(A)$ 为事件 A 发生的概率; $a \in [0, 1]$, a 的大小主要取决于政策因子 γ 和气温影响因子 ρ_{T/T_0} 。

3.2.2 基于单体概率的SPEV群体聚合可行域边界

将单个SPEV充电站中的SPEV分为已联网和将要联网两类,分别计算其功率和能量的上、下边界。充电站运营商可以根据经验以及借助负荷预测方法得知SPEV充电站中每个时刻的联网车辆数。在 t_0 时刻,可以根据式(29)、式(30)计算出已联网的充电需求不可调的SPEV功率 $P_{\text{in,unct}}(t)$ 和能量 $E_{\text{in,unct}}(t)$,其中, $t \in \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$ 表示 m 个离散时间序列点中的任意一个;根据式(31)、式(32)计算出已联网的充电需求可调的SPEV功率上/下边界 ($P_{\text{in,ct}}^+(t)/P_{\text{in,ct}}^-(t)$) 和能量的上/下边界 ($E_{\text{in,ct}}^+(t)/E_{\text{in,ct}}^-(t)$),其中, $t \in \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$ 。在 t_1 时刻,新接入电网的SPEV数量有 N_{t_1} 个,将这些SPEV与电网交换的功率、能量与联网时间概率密度函数相乘并进

行积分,可以计算出新接入电网的充电需求不可调 SPEV 群体功率、能量需求,见式(38)、式(39),以及新接入电网的充电需求可调 SPEV 群体的功率和能量的上、下边界,见式(40)一式(42)。

$$P_{\text{out,unct}}(t_k) = \int_{t_k}^{\Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,max}}} N_{1,t_1} p_{\text{spev},i}(t_k) f_{\text{spev}}(t) dt \quad (38)$$

$$E_{\text{out,unct}}(t_k) = \int_{t_k}^{\Delta t_{\text{spev}}^{\text{d,max}}} N_{1,t_1} e_{\text{spev},i}(t_k) f_{\text{spev}}(t) dt \quad (39)$$

$$\begin{cases} P_{\text{out,ct}}^+(t_k) = \int_{t_k}^{+\infty} N_{2,t_1} p_{\text{spev},i}^+(t_k) f_{\text{spev}}(t) dt \\ P_{\text{out,ct}}^-(t_k) = \int_{t_k}^{+\infty} N_{2,t_1} p_{\text{spev},i}^-(t_k) f_{\text{spev}}(t) dt \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} E_{\text{outadd,ct}}^+(t_k) = \int_{t_k}^{+\infty} N_{2,t_1} e_{\text{spev},i}^+(t_k) f_{\text{spev}}(t) dt \\ E_{\text{outadd,ct}}^-(t_k) = \int_{t_k}^{+\infty} N_{2,t_1} e_{\text{spev},i}^-(t_k) f_{\text{spev}}(t) dt \end{cases} \quad (41)$$

$$\begin{cases} E_{\text{out,ct}}^+(t_k) = \min \{ E_{\text{outadd,ct}}^+(t_k), E_{\text{out,ct}}^+(t_{k-1}) + \\ P_{\text{out,ct}}^+(t_{k-1})(t_k - t_{k-1}) \} \\ E_{\text{out,ct}}^-(t_k) = \min \{ E_{\text{outadd,ct}}^-(t_k), E_{\text{out,ct}}^-(t_{k-1}) + \\ P_{\text{out,ct}}^-(t_{k-1})(t_k - t_{k-1}) \} \end{cases} \quad (42)$$

$$\frac{N_{1,t_1}}{N_{t_1}} = C_{N_{t_1}} \prod_{i=1}^{N_{1,t_1}} a \prod_{i=1}^{N_{2,t_1}} (1-a) \quad (43)$$

$$\frac{N_{2,t_1}}{N_{t_1}} = 1 - \frac{N_{1,t_1}}{N_{t_1}} \quad (44)$$

式中: $t_k \in \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$; N_{1,t_1} 为充电需求不可调 SPEV 数量; N_{2,t_1} 为充电需求可调 SPEV 数量; $P_{\text{out,unct}}(t_k)$ 和 $E_{\text{out,unct}}(t_k)$ 分别为新接入电网的充电需求不可调 SPEV 群体的功率和能量; $P_{\text{out,ct}}^+(t_k)$ 、 $P_{\text{out,ct}}^-(t_k)$ 和 $E_{\text{out}}^+(t_k)$ 、 $E_{\text{out}}^-(t_k)$ 分别为新接入电网的充电需求可调 SPEV 群体的功率和能量上、下边界; $E_{\text{outadd,ct}}^+(t_k)$ 和 $E_{\text{outadd,ct}}^-(t_k)$ 分别为通过对充电需求可调 SPEV 能量边界累加得到的能量上、下边界,需要与考虑功率爬坡限制的边界比较并取最小值,才能够计算得到最终的充电需求可调 SPEV 能量上、下边界,如式(42)所示。

因此,将 t_1 时刻已联网的两类 SPEV 的功率和能量边界分别与新接入电网的两类 SPEV 的功率和能量边界相加,即可得到 t_1 时刻单个 SPEV 充电站中两类 SPEV 总的功率和能量边界,即

$$P_{\text{TSPEVUN}}(t_1) = P_{\text{in,unct}}(t_1) + P_{\text{out,unct}}(t_1) \quad (45)$$

$$E_{\text{TSPEVUN}}(t_1) = E_{\text{in,unct}}(t_1) + E_{\text{out,unct}}(t_1) \quad (46)$$

$$\begin{cases} P_{\text{TSPEV}}^+(t_1) = P_{\text{in,ct}}^+(t_1) + P_{\text{out,ct}}^+(t_1) \\ P_{\text{TSPEV}}^-(t_1) = P_{\text{in,ct}}^-(t_1) + P_{\text{out,ct}}^-(t_1) \end{cases} \quad (47)$$

$$\begin{cases} E_{\text{TSPEV}}^+(t_1) = E_{\text{in,ct}}^+(t_1) + E_{\text{out,ct}}^+(t_1) \\ E_{\text{TSPEV}}^-(t_1) = E_{\text{in,ct}}^-(t_1) + E_{\text{out,ct}}^-(t_1) \end{cases} \quad (48)$$

式中: $P_{\text{TSPEVUN}}(t_1)$ 、 $E_{\text{TSPEVUN}}(t_1)$ 分别为 t_1 时刻充电功率不可调 SPEV 的需求功率和累计能量需求; $P_{\text{TSPEV}}^+(t_1)$ 、 $P_{\text{TSPEV}}^-(t_1)$ 和 $E_{\text{TSPEV}}^+(t_1)$ 、 $E_{\text{TSPEV}}^-(t_1)$ 分别为 t_1 时刻充电功率可调 SPEV 的功率调节上边界和下边界、能量调节上边界和下边界。

4 应对寒潮来临的灵活性资源优化调度方法

面对寒潮来临时电力的短时供-需缺额,本文构建了考虑寒潮天气中灵活性资源、非民生类负荷和民生类负荷的滚动优化模型。目标函数为 1 h 内系统各资源调减的电力需求使得系统整体的社会损失最小,如式(49)所示,其中,单时间段面上的社会损失函数如式(50)所示。

$$\min_{\Delta t} F = \sum_{q=1}^4 Q(t_q) \quad (49)$$

$$\begin{aligned} Q(t) = & C_{\text{SPEV}} \sum_{i=1}^{N_{\text{SPEV}}} P_{\text{SPEV},i}^{\text{adj}}(t) + C_{\text{LPEV}} \sum_{i=1}^{N_{\text{LPEV}}} P_{\text{LPEV},i}^{\text{adj}}(t) + \\ & C_{\text{st}} \sum_{i=1}^{N_{\text{st}}} P_{\text{st},i}^{\text{adj}}(t) + C_{\text{s1}} \sum_{i=1}^{N_{\text{s1}}} P_{\text{s1},i}^{\text{adj}}(t) + \\ & C_{\text{SPEVUN}} \sum_{i=1}^{N_{\text{SPEVUN}}} P_{\text{SPEVUN},i}^{\text{adj}}(t) + C_{\text{m}} \sum_{i=1}^{N_{\text{m}}} P_{\text{m},i}^{\text{adj}}(t) + \\ & C_{\text{s2}} \sum_{i=1}^{N_{\text{s2}}} P_{\text{s2},i}^{\text{adj}2}(t) + C_{\text{li}} \sum_{i=1}^{N_{\text{li}}} P_{\text{li},i}^{\text{adj}}(t) \end{aligned} \quad (50)$$

$$P_{\text{SPEV},i}^{\text{adj}}(t) = P_{\text{SPEV},i}^{\text{adj,ch}}(t) + P_{\text{SPEV},i}^{\text{adj,dis}}(t) \quad (51)$$

$$P_{\text{LPEV},i}^{\text{adj}}(t) = P_{\text{LPEV},i}^{\text{adj,ch}}(t) + P_{\text{LPEV},i}^{\text{adj,dis}}(t) \quad (52)$$

$$P_{\text{st},i}^{\text{adj}}(t) = P_{\text{st},i}^{\text{adj,ch}}(t) + P_{\text{st},i}^{\text{adj,dis}}(t) \quad (53)$$

式中: $P_{\text{SPEV},i}^{\text{adj}}$ 、 $P_{\text{LPEV},i}^{\text{adj}}$ 、 $P_{\text{st},i}^{\text{adj}}$ 和 $P_{\text{s1},i}^{\text{adj}1}$ 分别为第 i 个可调 SPEV 充电站、LPEV 充电站、储能和可调工业负荷等灵活性资源的调整功率; $P_{\text{R},i}^{\text{adj,ch}}(t)$ 和 $P_{\text{R},i}^{\text{adj,dis}}(t)$ ($R \in \{\text{SPEV}, \text{LPEV}, \text{st}\}$) 分别为第 i 个对应资源的充电功率与放电功率; $P_{\text{SPEVUN},i}^{\text{adj}}$ 、 $P_{\text{m},i}^{\text{adj}}$ 和 $P_{\text{s2},i}^{\text{adj}2}$ 分别为第 i 个 SPEV 充电站中不可调 SPEV、其他工业及一般工商业负荷、可调工业负荷削减部分等非民生类负荷的调整功率; $P_{\text{li},i}^{\text{adj}}$ 为第 i 个居民生活用电的调整功率; N_{SPEV} 、 N_{LPEV} 、 N_{st} 、 N_{s1} 、 N_{m} 和 N_{li} 分别为系统中各资源对应的数目; C_{SPEV} 、 C_{LPEV} 、 C_{st} 、 C_{s1} 、 C_{SPEVUN} 、 C_{m} 、 C_{s2} 和 C_{li} 分别为各资源在寒潮天气中所对应的调节优先级权重,权重越大,表示社会影响越大;权重越小,表示越优先调节。通过调整各权重系数权衡考虑在寒潮来临场景下的保民生与保经济问题。

调度模型的约束条件包括各资源权重约束、系统电力平衡约束、网络潮流约束以及各资源的功率、能量约束。各资源权重约束如式(54)所示,电力平衡约束如式(55)所示,网络潮流约束如式(56)一式(61)所示,各资源的功率、能量约束如式(22)、式(26)一式(32)、式(45)一式(48)、式(62)一式(71)

所示。

$$C_{\text{SPEV}} + C_{\text{LPEV}} + C_{\text{st}} + C_{\text{s1}} + C_{\text{SPEVUN}} + C_{\text{s2}} + C_{\text{m}} + C_{\text{li}} = 1 \quad (54)$$

$$P_{\text{need}}(t) + P_{\text{loss}}(t) - P_{\text{sou}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{SPEV}}} (P_{\text{SPEV},i}^{\text{adj,dis}}(t) - P_{\text{SPEV},i}^{\text{adj,ch}}(t)) + \sum_{i=1}^{N_{\text{LPEV}}} (P_{\text{LPEV},i}^{\text{adj,dis}}(t) - P_{\text{LPEV},i}^{\text{adj,ch}}(t)) + \sum_{i=1}^{N_{\text{st}}} (P_{\text{st},i}^{\text{adj,dis}}(t) - P_{\text{st},i}^{\text{adj,ch}}(t)) + \sum_{i=1}^{N_{\text{s1}}} P_{\text{s1},i}^{\text{adj1}}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{SPEV}}} P_{\text{SPEVUN},i}^{\text{adj}}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{m}}} P_{\text{m},i}^{\text{adj}}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{s2}}} P_{\text{s2},i}^{\text{adj2}}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{li}}} P_{\text{li},i}^{\text{adj}}(t) \quad (55)$$

$$p_j = \sum_{i \in \varphi_{j1}} (P_{ij} - r_{ij} l_{ij}) - \sum_{k \in \varphi_{j2}} P_{jk} \quad (56)$$

$$q_j = \sum_{i \in \varphi_{j1}} (Q_{ij} - x_{ij} l_{ij}) - \sum_{k \in \varphi_{j2}} Q_{jk} \quad (57)$$

$$V_j^2 = V_j^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 \quad (58)$$

$$\| [2P_{ij}, 2Q_{ij}, I_{ij}^2 - V_i^2]^T \|_2 \leq I_{ij}^2 + V_i^2 \quad (59)$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (60)$$

$$-I_{\max} \leq I_{ij} \leq I_{\max} \quad (61)$$

$$0 \leq P_{\text{SPEV},i}^{\text{adj}} \leq P_{\text{TSPEV},i}^+ - P_{\text{TSPEV},i}^- \quad (62)$$

$$0 \leq E_{\text{SPEV},i}^{\text{adj}}(t_{k-1}) + (P_{\text{TSPEV},i}^+(t_{k-1}) - P_{\text{SPEV},i}^{\text{adj}}(t_{k-1})) \cdot (t_k - t_{k-1}) \leq E_{\text{TSPEV},i}^+(t_k) - E_{\text{TSPEV},i}^-(t_k) \quad (63)$$

$$0 \leq P_{\text{LPEV},i}^{\text{adj}} \leq P_{\text{LPEV},i}^+ - P_{\text{LPEV},i}^- \quad (64)$$

$$0 \leq E_{\text{LPEV},i}^{\text{adj}}(t_{k-1}) + (P_{\text{LPEV},i}^+(t_{k-1}) - P_{\text{LPEV},i}^{\text{adj}}(t_{k-1})) \cdot (t_k - t_{k-1}) \leq E_{\text{LPEV},i}^+(t_k) - E_{\text{LPEV},i}^-(t_k) \quad (65)$$

$$0 \leq P_{\text{st},i}^{\text{adj}} \leq P_{\text{st},i}^{\max} - P_{\text{st},i}^{\min} \quad (66)$$

$$0 \leq E_{\text{st},i}^{\text{adj}}(t_{k-1}) + (P_{\text{st},i}^{\max}(t_{k-1}) - P_{\text{st},i}^{\text{adj}}(t_{k-1})) \cdot (t_k - t_{k-1}) \leq E_{\text{st},i}(t_k) \quad (67)$$

$$0 \leq P_{\text{SPEVUN},i}^{\text{adj}} \leq P_{\text{TSPEVUN},i} \quad (68)$$

$$0 \leq E_{\text{SPEVUN},i}^{\text{adj}}(t_{k-1}) + (P_{\text{TSPEVUN},i}(t_{k-1}) - P_{\text{SPEVUN},i}^{\text{adj}}(t_{k-1})) \cdot (t_k - t_{k-1}) \leq E_{\text{TSPEVUN},i}(t_k) \quad (69)$$

$$0 \leq P_{\text{m},i}^{\text{adj}} \leq P_{\text{m},i}^{\text{need}} \quad (70)$$

$$0 \leq P_{\text{li},i}^{\text{adj}} \leq P_{\text{li},i} \quad (71)$$

式中： P_{need} 为系统总负荷； P_{loss} 为系统中线路损失总功率； P_{sou} 为系统电源供电总功率，包括系统内部电源及上级电网的供电功率； p_j 和 q_j 分别为注入第 j 个节点的有功、无功功率； φ_{j1} 和 φ_{j2} 分别为第 j 个节点的上游节点集合和下游节点集合； P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为线路 ij 上传输的有功、无功功率； r_{ij} 和 x_{ij} 分别为线路 ij 的单位电阻和单位电抗； l_{ij} 为线路 ij 的长度； I_{ij} 和 I_{\max} 分别为线路 ij 上传输的电流、线路允许流过的最大电流； V_i 、 V_{\max} 和 V_{\min} 分别为第 i 个节点的节点电压、节点电压上限和下限；式(62)一式(71)中，下标 i 表示第 i 个资源对应的变量； $E_{\text{SPEV},i}^{\text{adj}}$ 、 $E_{\text{LPEV},i}^{\text{adj}}$ 、 $E_{\text{st},i}^{\text{adj}}$ 、

$E_{\text{SPEVUN},i}^{\text{adj}}$ 分别为SPEV、LPEV、储能和充电需求不可调SPEV的能量调节大小； $E_{\text{st},i}$ 为储能的最大可调能量； $P_{\text{st},i}^{\max}$ 、 $P_{\text{st},i}^{\min}$ 分别为储能功率可调范围的上、下边界； $P_{\text{m},i}^{\text{need}}$ 为其他工业及一般工商业负荷的需求功率； $P_{\text{li},i}$ 为居民生活用电需求功率。

5 算例分析

为验证本文所提方法的可行性，选取IEEE 33节点系统作为配电网拓扑。算例程序开发基于MATLAB-R2022b平台及商用求解器Cplex-12.10.0。

5.1 单体SPEV联网模型

选取单体SPEV的电池容量为 $80 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ，联网时刻初始容量为 $20 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ，满足出行需求的电池容量为 $50 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ，额定充、放电功率为 120 kW ，充、放电效率为 0.8 。外界温度为 -25°C 时，SPEV的BTMS加热功率为 10 kW 。此时，充电至能够满足出行需求的最短时间为：

$$\Delta t_{\text{spev},i}^{\text{d,min}} = \frac{50 \text{ kW}\cdot\text{h} - 20 \text{ kW}\cdot\text{h}}{0.8 \times 120 \text{ kW} - 10 \text{ kW}} = 0.349 \text{ h} \quad (72)$$

因此，分别设置联网时间大于 $\Delta t_{\text{spev},i}^{\text{d,min}}$ 和联网时间小于 $\Delta t_{\text{spev},i}^{\text{d,min}}$ ，模拟充电需求可调SPEV和充电需求不可调SPEV的联网表现。对于充电需求可调的单体SPEV，设置在 0.05 h 时联网， 0.95 h 时离网，其功率和能量联网运行边界如附录C图C1所示。对于充电需求不可调的单体SPEV，设置在 0.05 h 时联网， 0.398 h 时离网，其功率和能量联网运行边界如附录C图C2所示。

由附录C图C1可以看出，当单体SPEV联网时间大于 $\Delta t_{\text{spev},i}^{\text{d,min}}$ 时，功率和能量上下边界分离，中间区域为可以参与电网调节的运行域。由附录C图C2可知，当单体SPEV联网时间小于 $\Delta t_{\text{spev},i}^{\text{d,min}}$ 时，只能从电网中吸收电能。

5.2 SPEV群体聚合运行域

5.2.1 SPEV群体聚合可行域

随机生成一组SPEV群体车辆数，根据式(37)得到充电需求可调SPEV数目和充电需求不可调SPEV数目，如附录D表D1所示。

根据式(34)，当政策因子 $\gamma=1$ 时，可以计算出 μ 为：

$$\mu = \frac{60 \text{ kW}\cdot\text{h}}{0.8 \times 120 \text{ kW} - 10 \text{ kW}} = 0.678 \text{ h} \quad (73)$$

因此，根据高斯分布的对称性，认为SPEV联网时间在区间 $[0, 2\mu]$ 的概率为 1 。根据附录D表D1中最后一个车辆联网时刻与SPEV最大联网时间，确定仿真结束的大致时间为 3 h 。在单体SPEV模

型上,运用所提聚合方法,在时间维度上对联网充电需求可调的SPEV和充电需求不可调的SPEV分别进行聚合,结果分别如图3和附录C图C3所示。

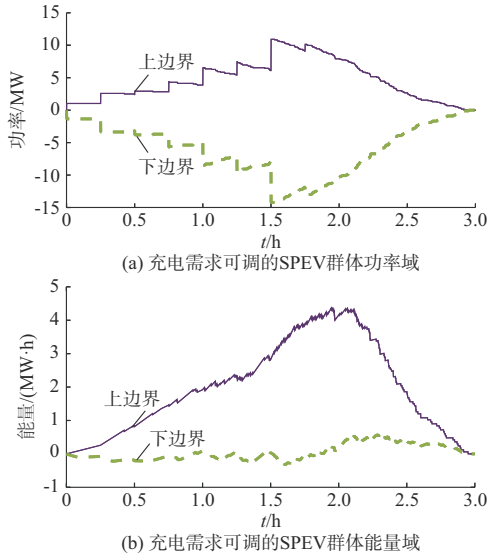


图3 充电需求可调的SPEV群体聚合运行域

Fig. 3 Aggregated operation range of SPEV group with adjustable charging demand

从图3可以看出,SPEV群体聚合后,可调功率和能量域明显增大,但图3(b)中,能量域调节范围基本大于0,即依旧是可调负荷的性质,这是由SPEV联网的初始电量与联网时间共同决定的。

5.2.2 不同环境温度下的SPEV群体聚合可行域

寒潮来临时,环境温度会影响SPEV的 $\bar{P}_{\text{spev},i}^{\text{BTM}}$ 和联网时长概率密度分布,进而影响SPEV群体功率、能量聚合可调范围。本文以北京2021年和2024年1月上旬寒潮为例(气温骤降至 $-20\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$),在不同环境温度下,对SPEV群体功率、能量聚合可行域进行了计算,结果如图4所示。

环境温度对SPEV群体功率、能量聚合可调范围影响较大。图4(a)中,以大约1.9h为分界线,可以将功率聚合可调范围分为两个区域。在区域1,随着环境温度的降低,功率聚合可调范围减小。这是由于在 $0\sim 1.75\text{ h}$ 之间,SPEV在不断联网,随着联网的SPEV数目的增加,功率可调范围受 $\bar{P}_{\text{spev},i}^{\text{BTM}}$ 的影响增大。随着温度的降低, $\bar{P}_{\text{spev},i}^{\text{BTM}}$ 不断增加,由式(14)、式(15)可知,SPEV单体的功率可调范围减小,进而导致SPEV群体功率聚合可调范围减小。在区域2,随着温度的降低,功率聚合可调范围增大,这是由于在这个时间段内,没有新的SPEV联网,功率可调范围受SPEV联网时长的影响较大。随着温度的降低,联网时长概率分布中的温度影响因子 ρ_{T/T_0} 增大,SPEV平均联网时长升高,导致单时

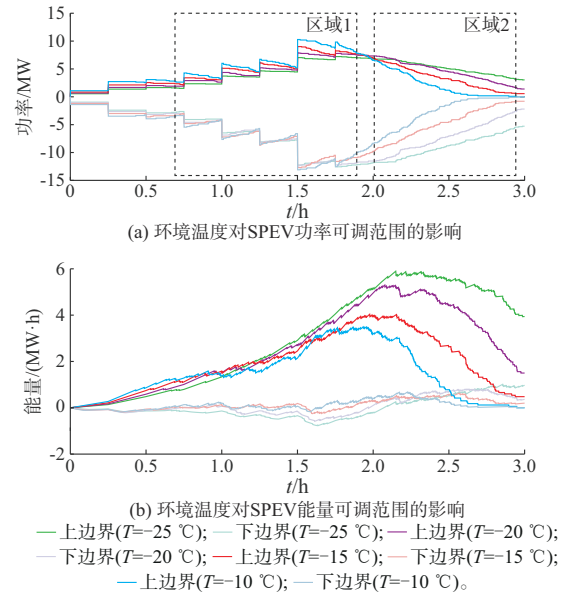


图4 环境温度对SPEV可调范围的影响

Fig. 4 Impact of ambient temperature on adjustable range of SPEV

间段面上离网的SPEV数目减少,功率可调范围增大。

图4(b)中,能量聚合可调范围主要受单时间段面上联网的SPEV数目的影响,联网车辆数越多,能量聚合可调范围越大。而温度影响因子 ρ_{T/T_0} 通过影响SPEV的联网时长分布,进而影响单时间段面上的在网车辆数。因此,当环境温度降低时, ρ_{T/T_0} 增大,SPEV平均联网时长增大,能量聚合可调范围增大。

5.2.3 政策因子对SPEV群体聚合可行域的影响

当寒潮来临时,期望SPEV不仅扮演可调负荷的角色,更期望在需要时能够扮演一定的电源角色向电网送电,帮助电网调峰。当电网运营商发布V2G政策时,对应一个政策因子 γ ,用于鼓励SPEV增加联网时长,以扩大SPEV聚合能量域和功率域的可调范围。图5(a)、(b)分别展示了政策因子 γ 对SPEV聚合功率域和能量域的影响,取 γ 为1.0、1.5、2.0、2.5时分别进行仿真计算。从图5可以看出,随着 γ 的增大,功率和能量可行域上、下边界一直向外扩张。因此,政策因子变化能够促进SPEV联网时长的增加,进一步扩大了聚合功率域和能量域的可调范围。

5.3 寒潮天气下的优化调度方法

为验证所提优化调度方法的有效性,本文构建了如附录E图E1所示的寒潮天气优化调度网络拓扑,参数设置见附录E。综合考虑各负荷的重要性,根据式(54),对式(50)中的调节资源设置权重系数,

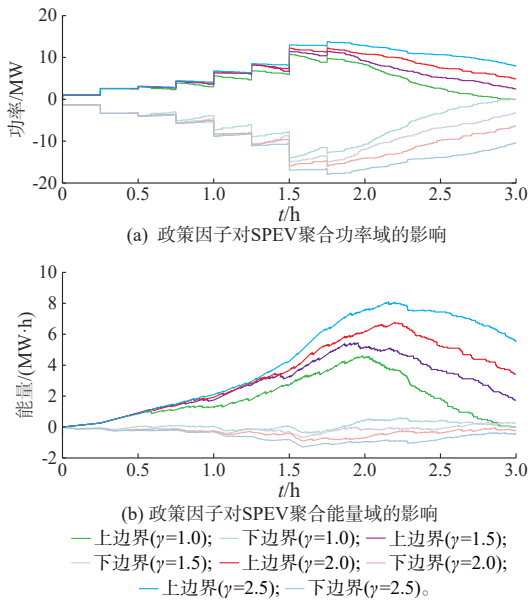


图5 政策因子对SPEV可调范围的影响
Fig. 5 Impact of policy factors on regulable range of SPEV

本算例所设置的资源权重系数见附录F表F1。

根据天气预报可知,未来短时间内寒潮会来临。在 $t=0$ 时,根据天气预报及历史新能源、负荷数据和上级最大可供电能力预测并计算系统中会出现的电力缺额情况,启动应对寒潮天气短时电力短缺的预案,将寒潮天气下的灵活性资源纳入电力系统的优化调度中。从9 h开始,由于负荷增加以及配电网供电能力不足,系统出现了电力短缺,并且电力缺额在一直增加。滚动优化每15 min计算一次,每次的优化目标考虑未来1 h内的资源出力,最终输出下一时刻资源调度结果。本文计算了一天各资源的调整结果,如图6所示。

图6中,第1幅图为配电网由于寒潮来临导致出现的电力短时缺额情况;第2~7幅图分别为电力缺额分配到各资源(除灵活性工业负荷不可调部分和居民用电外)的调整量,灵活性工业负荷不可调部分和居民用电两种资源的调整量为0;第8幅图为式(49)所对应的优化目标结果。考虑到SPEV、LPEV和储能对外都表现为储能特性,为了能够计量各时刻这3种资源对电网的调节能力,第2~4幅图中,展示的是这3种类型资源充电调节量和放电调节量的数值叠加。从图6可以看出,寒潮天气下各资源调整情况大致可以分为4个阶段。在第1阶段,由于系统中各资源的调整,配电网未发生电力缺额,此时SPEV、LPEV和储能已经参与系统调节,其调整量的计算如式(51)一式(53)所示。在第2阶段,系统出现较小的电力缺额,SPEV、LPEV和储能通过协调充放电时间,依旧能够补足系统的缺额。在第3

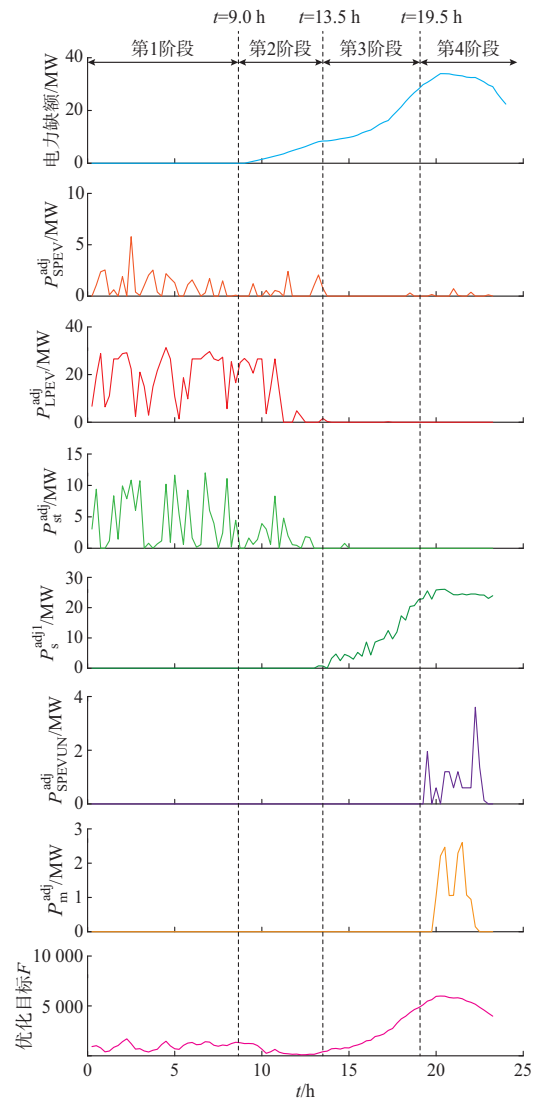


图6 寒潮天气下电力缺额调整优化结果
Fig. 6 Optimal results of adjusting power supply shortages during cold wave weather

阶段,SPEV、LPEV和储能所有电量已经耗尽,此时开始调减具有灵活性的工业负荷。在第4阶段,当灵活性工业负荷调节的电力难以满足一直增大的电力缺额时,系统开始对充电需求不可调的SPEV和一般工商业负荷进行限电。

图6中,系统未对不具有调节能力的工业负荷及居民用电进行调整,是因为系统的电力缺额能够通过调整其他资源来补足,以保障社会福利损失最小。社会福利损失优化结果与系统电力缺额呈现正相关趋势。当寒潮来临导致供电缺额持续时间较短(几小时内)时,通过调整SPEV、LPEV和储能就能够保障电力系统的安全稳定运行。当寒潮来临导致供电缺额持续时间较长时,需要通过调整灵活性工业负荷、对充电需求不可调的SPEV和一般工商业负荷进行限电等方式,来补足系统的电力缺额。

6 结语

本文围绕寒潮来临时配电网短时电力缺额问题,对寒潮天气灵活性资源建模及各资源用电优化决策展开研究。主要创新点如下:

1)提出了资源的灵活性属性随场景的变化而变化的理念。

2)构建了寒潮天气下的单体 SPEV、单体 LPEV 和可调工业负荷等灵活性资源的模型。

3)提出了寒潮天气下考虑联网时长不确定性的 SPEV、LPEV 聚合方法。

4)构建了应对寒潮天气下电力缺额的配电网资源用能调整滚动优化调度模型。

基于所提方法,通过算例分析,得到以下结论:

1)寒潮来临时,用户侧居民负荷调节能力受限,传统温控负荷等灵活性资源成为刚性负荷,更多的调节潜力集中在规模化电动汽车、储能和包括工业负荷在内的非民生类负荷。

2)在“碳达峰·碳中和”背景下,规模化发展的电动汽车在居民负荷中的占比将会大幅提升,具有一定的电能调节能力。但在寒潮来临时,电动汽车可在寒潮发生的初始阶段为电网提供一定的调节能力,持续性、长周期的低温条件下,电网的调节还需工业负荷等其他资源来支撑。

本文运用高斯分布来描述电动汽车联网时长的随机性,后续研究可以根据不同场景和不同地区用能特点等因素进一步完善和修正联网时长的概率模型。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] STANKOVIĆ A M, TOMSOVIC K L, DE CARO F, et al. Methods for analysis and quantification of power system resilience [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(5): 4774-4787.
- [2] WANG Y Z, CHEN C, WANG J H, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—a review [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2): 1604-1613.
- [3] 武学亮. 极寒天气下电网输变电设备的状态检修 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
WU Xueliang. Condition-based maintenance of power transmission and transformation equipment in extreme cold weather [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [4] 陈韵含, 许寅, 王颖, 等. 考虑潜在恢复需求的城市配电网移动应急资源灾前布点 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(14): 105-113.
CHEN Yunhan, XU Yin, WANG Ying, et al. Pre-disaster positioning of mobile emergency resources for urban distribution network considering potential restoration demand [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(14): 105-113.
- [5] 钟海旺, 张广伦, 程通, 等. 美国德州 2021 年极寒天气停电事故分析及启示 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(6): 1-9.
ZHONG Haiwang, ZHANG Guanglun, CHENG Tong, et al. Analysis and enlightenment of extremely cold weather power outage in Texas, U.S. in 2021 [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(6): 1-9.
- [6] 安学民, 孙华东, 张晓涵, 等. 美国德州“2.15”停电事件分析及启示 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(10): 3407-3415.
AN Xuemin, SUN Huadong, ZHANG Xiaohan, et al. Analysis and lessons of Texas power outage event on February 15, 2021 [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(10): 3407-3415.
- [7] ZHANG G L, ZHONG H W, TAN Z F, et al. Texas electric power crisis of 2021 warns of a new blackout mechanism [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, 8(1): 1-9.
- [8] WANG Y, XU Y, HE J H, et al. Coordinating multiple sources for service restoration to enhance resilience of distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 5781-5793.
- [9] WANG Y, XU Y, LI J X, et al. Dynamic load restoration considering the interdependencies between power distribution systems and urban transportation systems [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 6(4): 772-781.
- [10] POURGHADERI N, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M, et al. Exploiting DERs' flexibility provision in distribution and transmission systems interface [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(2): 1963-1977.
- [11] JIANG T, WU C H, ZHANG R F, et al. Flexibility clearing in joint energy and flexibility markets considering TSO-DSO coordination [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(2): 1376-1387.
- [12] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(16): 3-16.
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(16): 3-16.
- [13] 焦治杰, 王小君, 刘翌, 等. 考虑分布式新能源出力不确定性的虚拟电厂概率可行域构建方法 [J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(18): 129-138.
JIAO Zhijie, WANG Xiaojun, LIU Zhao, et al. Construction method for probability-based feasible region of virtual power plant considering uncertainty of distributed renewable energy output [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(18): 129-138.
- [14] RIAZ S, MANCARELLA P. Modelling and characterisation of flexibility from distributed energy resources [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(1): 38-50.
- [15] 吴洲洋, 艾欣, 胡俊杰. 需求侧灵活性资源参与调频辅助服务的备用优化与实时调度 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(6): 148-157.
WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie. Reserve optimization and real-time scheduling of frequency regulation ancillary service with participation of flexible resource on demand side [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 148-157.

- [16] MÜLLER F L, SZABÓ J, SUNDSTRÖM O, et al. Aggregation and disaggregation of energetic flexibility from distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1205-1214.
- [17] CAPITANESCU F. Computing cost curves of active distribution grids aggregated flexibility for TSO-DSO coordination [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 2381-2384.
- [18] 焦嘉凝,柳璐,张天宇,等.台风灾害下多阶段协同的受端电网弹性提升策略[J].电力系统自动化,2023,47(12):9-18.
JIAO Jianing, LIU Lu, ZHANG Tianyu, et al. Resilience enhancement strategy with multi-stage collaboration for receiving-end grid under typhoon disaster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 9-18.
- [19] 高红均,郭明浩,刘俊勇,等.从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望[J].中国电机工程学报,2023, 43(12):4517-4538.
GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Junyong, et al. Power supply challenges and prospects in new power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4517-4538.
- [20] 吉林省能源局.吉林省电动汽车充电桩基础设施发展规划[EB/OL]. [2024-04-04]. <http://nyj.jl.gov.cn/zwgk/tzgg/202211/P020230522428282039543.pdf>.
Jilin Provincial Energy Bureau. Jilin Province development plan for electric vehicle charging and swapping infrastructure [EB/OL]. [2024-04-04]. <http://nyj.jl.gov.cn/zwgk/tzgg/202211/P020230522428282039543.pdf>.
- [21] LINDGREN J, LUND P D. Effect of extreme temperatures on battery charging and performance of electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2016, 328: 37-45.
- [22] 裴国亮.车载锂离子电池自加热保温方法研究和装置开发[D].北京:北京交通大学,2022.
PEI Guoliang. Research on self-heating and heat preservation method and device development of vehicle-mounted lithium-ion battery[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [23] ZHANG H C, HU Z C, XU Z W, et al. Evaluation of achievable vehicle-to-grid capacity using aggregate PEV model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 784-794.
- [24] WANG L, KWON J, SCHULZ N, et al. Evaluation of aggregated EV flexibility with TSO-DSO coordination [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 2304-2315.

焦治杰(1996—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统优化运行、灵活性资源聚合技术等。E-mail: 22110449@bjtu.edu.cn

许寅(1986—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:韧性电网、电力交通融合、电力系统高性能计算等。E-mail: xuyin@bjtu.edu.cn

刘翌(1991—),男,通信作者,副教授,硕士生导师,主要研究方向:电力系统优化运行、电力系统暂态稳定分析与控制等。E-mail: liuzhao1@bjtu.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

Optimal Scheduling Method for Power Grid Considering Participation of Electric Vehicles in Flexible Regulation During Cold Wave Weather

JIAO Zhijie, XU Yin, LIU Zhao, WANG Xiaojun, HE Jinghan, SI Fangyuan
(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: When the arrival of a cold wave triggers a sudden drop in weather temperature, the energy consumption of the load increases, the output of renewable energy sharply decreases and the system backup and the power supply capacity of the higher-level power grid are insufficient, resulting in a significant power supply shortage problem within the power grid in a short time. With the increasing number of electric vehicles on the load side and the improvement in the responsiveness of flexible resources, the load-side flexibility resources are adjusted to compensate for the power shortage caused by the cold wave. This paper first clarifies that the flexibility resources varies with changing scenarios, explores and constructs models of flexible resources such as electric vehicles during cold wave. Secondly, considering that electric vehicles as flexibility resources need to participate in power grid scheduling through aggregation, a method for aggregating electric vehicles with uncertain connection times is developed. Subsequently, based on the flexibility resources during cold wave weather, non-residential loads and residential loads, a rolling optimal scheduling method for the power grid during cold wave weather is proposed with the objective of minimizing social losses. The electricity adjustment of various resources in the grid during cold wave weather is determined. Finally, through case studies, the proposed method is shown to effectively address power supply shortages in the power grid during cold wave weather.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2022YFB2403400).

Key words: flexibility resource; electric vehicle; cold wave; optimal scheduling; vehicle-to-grid (V2G)

