

第 1 章 绪 论

1.1 背景和意义

1.1.1 问题背景

近年来,我国灵活性资源数量与日俱增,技术快速发展。2022 年,国家发展和改革委员会、国家能源局等陆续发布多条重要指导意见,提出通过健全适应新型电力系统的市场机制和完善电力需求响应机制,推动能源领域碳减排,做好碳达峰、碳中和工作,《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》明确鼓励支持虚拟电厂运营商参与电力市场交易和系统运行调节。放眼国际,全球已有超过 100 个国家和地区提出碳中和目标,灵活性资源具有配置灵活、规模庞大、分布广泛、清洁无污染等优点,迅速得到国际社会的广泛关注,预计 2020 年至 2027 年将以 11.5% 的年增长率持续快速增长。因此,发展驱动灵活性资源的运营调控技术是促进能源转型和国民经济高质量发展的有效途径,也是实现“双碳”战略目标的重要支撑^[1-2]。

1.1.2 实际需求

随着我国工业化进程加快,越来越多的工业园区、运动场馆、智慧社区等园区配置了诸如光伏电站、电动汽车充电桩、储能设备、可调节负荷等多类型灵活可调的分布式资源设备,具备了提高电力系统柔性、参与电力系统调度和实现从“源随荷动”到“源荷互动”的客观条件^[3]。考虑到我国工业体量巨大、园区分布广泛,挖掘工业园区中多元化海量分布式资源的灵活性,一方面能促进工业园区降本增效和节能减排,另一方面为提升电力系统的运行灵活性和经济性提供了巨大潜力^[4]。因此,发展驱动光储充荷等分布式资源灵活调控的技术是促进能源转型和国民经济高质量发展的有效途

径,也是实现“双碳”战略目标的重要支撑。

1.1.3 现状难点

灵活性资源虽然蕴含巨大的灵活性调控潜力,但是难以直接参与电力系统调控和电力市场交易,具体有以下原因。首先,如果数量巨大、种类繁杂的灵活性资源直接参与上级电力系统调控和电力市场交易,电力系统将面临高维复杂的计算难题、故障频发的通信问题和纷乱烦琐的管理负担,这是当前电力系统运营管理者无法承受的^[5-6]。其次,灵活性资源的价格激励和补偿机制不成熟,单个灵活性资源设备对电力市场运营情况的影响较小,造成灵活性资源所属者对参与电力市场交易的积极性不高^[7]。最后,国内外主流电力市场运营商均对市场参与者设置了市场准入条件和设备容量门槛值,灵活性资源的容量普遍较小,无法达到参与电力市场交易的条件^[8]。

1.1.4 破题之策

为降低电力系统调控中心的管理负担,促进多元化海量灵活性资源参与电网调度和市场交易,虚拟电厂(virtual power plant, VPP)技术成为实现规模化灵活性资源高效管理的有效手段^[9-10]。相比于传统发电机组,虚拟电厂同时连接灵活性资源与电力系统,通过对内部光伏、储能、充电桩、可调负荷等灵活性资源的协调管理,实现资源整合与分配,挖掘和利用不同种类设备的各自优势,整体对外提供诸如能量平衡、电压支撑、调频备用、阻塞管理等多类服务,已经展现出巨大的经济价值和发展潜力^[11-12]。然而,目前虚拟电厂技术方法和建设试点对多元化海量灵活性资源随机性的考虑不足,缺乏兼顾不同类别市场耦合关系的系统化运营管理方法,未实现不同时间尺度运营管理策略之间的交互配合和统筹协调。

1.1.5 目标意义

鉴于此,针对以上未充分解决的问题,研究者亟须利用虚拟电厂技术深度挖掘规模化灵活性资源调控潜力,一方面提高电力系统的柔性和经济效益,助力电力市场发展,另一方面实现灵活性资源的智能管理,促进虚拟电厂降本增效。本书所介绍内容的背景-目标线归纳如图 1-1 所示。

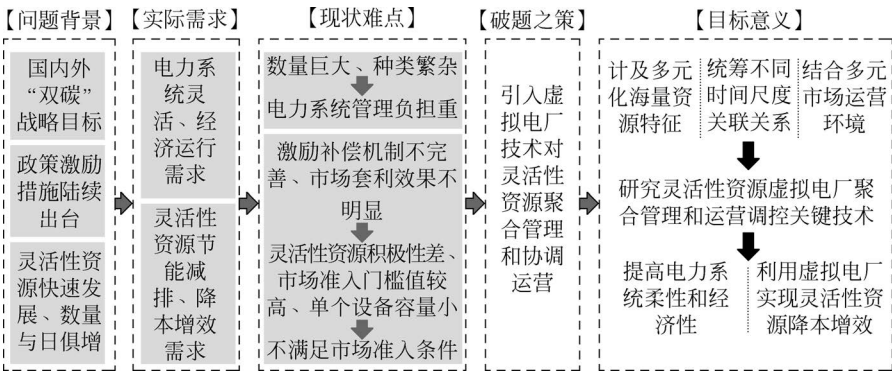


图 1-1 本书所介绍内容的背景-目标线

1.2 主要技术挑战和拟解决的关键技术问题

当前虚拟电厂技术方法所面临的主要技术挑战和拟解决的关键技术问题如下。

- (1) 现有虚拟电厂聚合建模方法未对灵活性资源的参数异质性和随机性进行统一建模和统筹考虑,多元化海量灵活性资源带来的“维度灾”难题未被充分解决,亟须提出计及参数异质性和不确定性的多元化海量灵活性资源集群聚合建模方法,在保障精度的前提下提高聚合模型的计算效率,助力虚拟电厂运营管理中各类优化问题的高效快速决策。
- (2) 考虑到虚拟电厂的随机因素众多、模型参数不确定性强、灵活性资源难以精准建模,现有虚拟电厂的能量管理和调控方法未对灵活性资源的多重随机因素进行综合考虑。此外,虚拟电厂存在大量需求侧资源,其实际出力和调度指令之间往往存在不可避免的偏差,因此,亟须进一步提出模型数据交互驱动的虚拟电厂多时间尺度调控方法,结合虚拟电厂生产运营规律和实测数据对灵活性资源的实时响应进行及时校正。
- (3) 随着我国电力市场全面开放和辅助服务市场类别的日益增加,有必要对计及能量-辅助服务市场耦合关系和灵活性资源利益诉求的虚拟电厂调度-定价协同优化方法进一步进行系统化梳理,促进虚拟电厂运营模式实现多元化发展,引导各利益方积极主动地参与到虚拟电厂的运营中。

1.3 主要框架

灵活性资源数量与日俱增,技术快速发展,使电力系统灵活性和经济性的提升获得了巨大潜力。为降低电力系统调控中心的管理负担,虚拟电厂成为实现规模化灵活性资源高效管理的有效手段。本书从灵活性资源聚合模型出发,分别从经济调度和市场出清两个层面对虚拟电厂短期调度展开介绍,继而对虚拟电厂实时调控进行探索,旨在深度挖掘规模化灵活性资源调控潜力,促进虚拟电厂经济运行。与本书直接相关的学术论著见文献[13]~文献[18]。本书的主要内容和框架见图 1-2,各部分内容之间的逻辑关系和实施架构见图 1-3。

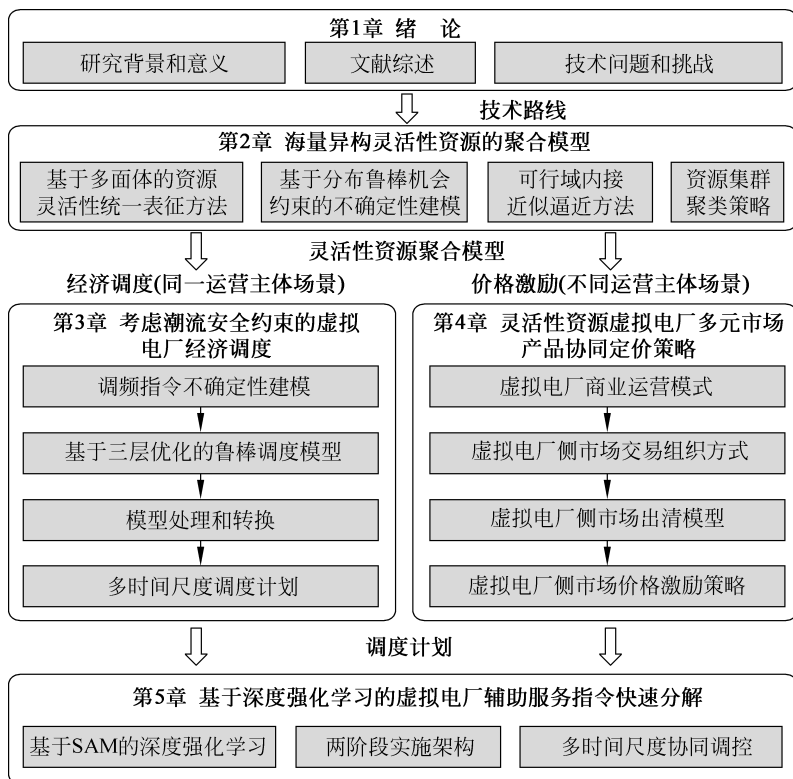


图 1-2 本书的主要内容和框架

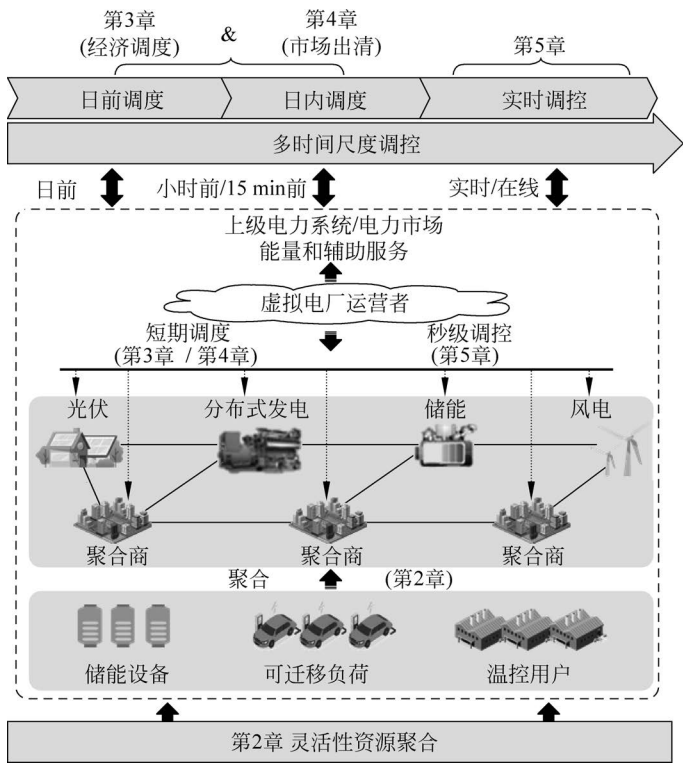


图 1-3 各部分内容之间的逻辑关系和实施架构

参 考 文 献

[1] GRAND VIEW RESEARCH. Distributed energy generation market size report, 2020-2027 [EB/OL]. (2020-08) [2021-10-09]. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/distributed-energy-generation-industry>.

[2] OBI M,SLAY T, BASS R. Distributed energy resource aggregation using customer-owned equipment: A review of literature and standards [J]. Energy Reports,2020,6: 2358-2369.

[3] HE G,CHEN Q,KANG C,et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(5): 2359-2367.

[4] PONOČKO J,MILANOVIĆ J V. Forecasting demand flexibility of aggregated residential load using smart meter data[J]. IEEE Transactions on Power Systems,

- 2018,33(5): 5446-5455.
- [5] ŠIKŠNYS L, VALSOMATZIS E, HOSE K, et al. Aggregating and disaggregating flexibility objects[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2015,27(11): 2893-2906.
- [6] YI Z, XU Z, XUE W, et al. An improved two-stage deep reinforcement learning approach for regulation service disaggregation in a virtual power plant[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022,13(4): 2844-2858.
- [7] NGUYEN D T, LE L B. Joint optimization of electric vehicle and home energy scheduling considering user comfort preference[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(1): 188-199.
- [8] VRETTOS E, ANDERSSON G. Scheduling and provision of secondary frequency reserves by aggregations of commercial buildings [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016,7(2): 850-864.
- [9] 陈会来, 张海波, 王兆霖. 不同类型虚拟电厂市场及调度特性参数聚合算法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023,43(1): 15-28.
- [10] CAMAL S, MICHIORRI A, KARINIOTAKIS G. Optimal offer of automatic frequency restoration reserve from a combined PV/wind virtual power plant[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018,33(6): 6155-6170.
- [11] 王宣元, 刘蓁. 虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践[J]. 电力系统自动化, 2022,46(18): 158-168.
- [12] 殷爽睿, 艾芊, 宋平, 等. 虚拟电厂分层互动模式与可信交易框架研究与展望[J]. 电力系统自动化, 2022,46(18): 118-128.
- [13] YI Z K, XU Y L, YANG L, et al. Aggregate operation model for numerous small capacity distributed energy resources considering uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021,12(5): 4208-4224.
- [14] YI Z K, XU Y L, GU W, et al. A multi-time-scale economic scheduling strategy for virtual power plant based on deferrable loads aggregation and disaggregation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020,11(3): 1332-1346.
- [15] 仪忠凯, 许银亮, 吴文传. 考虑虚拟电厂多类电力产品的配电侧市场出清策略[J]. 电力系统自动化, 2020,44(22): 143-151.
- [16] YI Z K, XU Y L, WANG H Z, et al. Coordinated operation strategy for a virtual power plant with multiple DER aggregators [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021,12(4): 2445-2458.
- [17] YI Z K, XU Y L, ZHOU J G, et al. Bi-level programming for optimal operation of an active distribution network with multiple virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020,11(4): 2855-2869.
- [18] YI Z K, XU Y L, WANG X, et al. An improved two-stage deep reinforcement learning approach for regulation service disaggregation in a virtual power plant [J]. IEEE Transactions on Smart grid, 2022,13(4): 2844-2858.

第2章 海量异构灵活性资源的聚合模型

2.1 本章引言

海量小容量灵活性资源使电力系统调控管理者和电力市场运营商获得了巨大的调控潜力,同时也带来了一系列技术挑战和运营管理负担。鉴于此,本章提出了一种面向海量异构灵活性资源的聚合模型,所提聚合模型包含内接近似可行域和等效运行成本函数,可实现海量、小容量、参数异质的灵活性资源高效经济管控。首先,考虑到灵活性资源功率、能量和辅助服务之间的耦合关系,本章提出了基于多面体模型的资源灵活性统一表征方法;其次,通过对一个基本同构多面体的放缩和转换,本章提出了可行域最大内接近似方法,采用分布式鲁棒机会约束规划(distributionally robust chance-constrained program, DRCCP)对灵活性资源的不确定性进行建模,在保证调控指令可达性的基础上增大聚合模型可行域,推导了灵活性资源聚合模型的等效成本函数;最后,本章从理论上阐述了灵活性资源聚类 and 聚合之间的关联关系,并在此基础上提出了一种基于多尺度相似性度量的谱聚类算法,提高了聚合效果。算例仿真结果表明,所提方法在提高系统运行灵活性和计算效率方面具有显著优势。

本章的内容组织安排如下:2.2节介绍了灵活性资源运行模型;2.3节给出了灵活性资源聚合模型;2.4节介绍了灵活性资源集群聚合方法;2.5节和2.6节分别给出了算例分析结果和小结。

2.2 灵活性资源运行模型

本节将介绍不同类别的灵活性资源(包括储能设备、温控负荷、可迁移负荷)的运行模型,以及基于多面体的灵活性资源统一表征方法。

2.2.1 多种类型灵活性资源的运行模型

电力系统中存在各种灵活性资源,可为上级电力系统运营商提供能量和辅助服务,本节将以储能设备、温控负荷、可迁移负荷 3 种典型灵活性资源作为示例介绍其运行模型。

1. 储能设备

电池等储能设备可以存储/释放能量,实现能量在时间上的转移^[1]。考虑到储能的充放电计划和能量状态,储能设备的模型如下^[2]:

$$0 \leq p_{i,t}^{\text{ES},\text{in}} \leq \bar{p}_i^{\text{ES},\text{in}}, \quad 0 \leq p_{i,t}^{\text{ES},\text{out}} \leq \bar{p}_i^{\text{ES},\text{out}} \quad (2-1)$$

$$e_{i,t}^{\text{ES}} = \theta_i^{\text{ES}} e_{i,t-1}^{\text{ES}} + \Delta T \left(\kappa_i^{\text{ES},\text{in}} p_{i,t}^{\text{ES},\text{in}} - \frac{1}{\kappa_i^{\text{ES},\text{out}}} p_{i,t}^{\text{ES},\text{out}} \right) \quad (2-2)$$

$$\underline{e}_i^{\text{ES}} \leq e_{i,t}^{\text{ES}} \leq \bar{e}_i^{\text{ES}} \quad (2-3)$$

其中, $p_{i,t}^{\text{ES},\text{in}}$, $p_{i,t}^{\text{ES},\text{out}}$, $e_{i,t}^{\text{ES}}$ 和 $e_{i,t-1}^{\text{ES}}$ 分别表示储能设备 i 的充电功率、放电功率、当前能量状态和前一时刻的能量状态; θ_i^{ES} 表示能量的耗散速率; $\bar{p}_{i,t}^{\text{ES},\text{in}}$ 和 $\bar{p}_{i,t}^{\text{ES},\text{out}}$ 分别表示充电功率最大值和放电功率最大值; $\underline{e}_i^{\text{ES}}$ 和 $\bar{e}_i^{\text{ES}}$ 分别表示储能设备的最小蓄能量和最大蓄能量; $\kappa_i^{\text{ES},\text{in}}$ 和 $\kappa_i^{\text{ES},\text{out}}$ 分别表示充电效率和放电效率; ΔT 表示调度时间间隔。

2. 温控负荷

考虑电采暖等温控负荷的热惯性和蓄热特性,温控负荷的供热动态特征可以采用如下模型进行表征^[3-4]:

$$\underline{p}_i^{\text{TCR},\text{in}} \leq p_{i,t}^{\text{TCR},\text{in}} \leq \bar{p}_i^{\text{TCR},\text{in}} \quad (2-4)$$

$$\underline{e}_i^{\text{TCR}} \leq e_i^{\text{TCR}} \leq \bar{e}_i^{\text{TCR}} \quad (2-5)$$

$$e_{i,t}^{\text{TCR}} = \theta_i^{\text{TCR}} e_{i,t-1}^{\text{TCR}} + \Delta T \eta_i^{\text{TCR}} p_{i,t}^{\text{TCR},\text{in}} + \omega_i^{\text{TCR}} \omega_i^{\text{AM}} \quad (2-6)$$

其中, $p_{i,t}^{\text{TCR},\text{in}}$ 和 e_i^{TCR} 分别表示功率消耗和温控负荷的室内温度; $\bar{p}_i^{\text{TCR},\text{in}}$ 和 $\underline{p}_i^{\text{TCR},\text{in}}$ 分别表示最大功率消耗和最小功率消耗; $\bar{e}_i^{\text{TCR}}$ 和 $\underline{e}_i^{\text{TCR}}$ 分别表示温控负荷的温度最大值和最小值; ω_i^{AM} 表示外界环境温度; θ_i^{TCR} 表示温控负荷的耗散率,由热损失系数、热质量和建筑比热容决定; η_i^{TCR} 是电能转化为热能的效率系数; $\omega_i^{\text{TCR}} = 1 - \theta_i^{\text{TCR}}$ 是外界环境温度对室内温度的影响因子。

3. 可迁移负荷

电力系统中有各种可迁移负荷,如电动汽车、可中断设备、洗衣机等^[5-6]。这类灵活性资源只需要在预定的时间内满足用户需求,其数学模型如下:

$$\underline{p}_i^{\text{DL},\text{out}} \leq p_{i,t}^{\text{DL},\text{in}} \leq \bar{p}_i^{\text{DL},\text{in}}, \quad T_{\text{start}}^{\text{DL}} \leq t \leq T_{\text{end}}^{\text{DL}} \quad (2-7)$$

$$0 \leq e_{i,t}^{\text{DL}} \leq \bar{e}_i^{\text{DL}}, \quad T_{\text{start}}^{\text{DL}} \leq t \leq T_{\text{end}}^{\text{DL}} \quad (2-8)$$

$$e_{i,t}^{\text{DL}} \geq \bar{e}_i^{\text{DL}}, \quad t \geq T_{\text{end}}^{\text{DL}} \quad (2-9)$$

$$e_{i,t}^{\text{DL}} = \theta_i^{\text{DL}} e_{i,t-1}^{\text{DL}} + \Delta T \eta_i^{\text{DL},\text{in}} p_{i,t}^{\text{DL},\text{in}} \quad (2-10)$$

其中, $p_{i,t}^{\text{DL},\text{in}}$ 、 $p_{i,t}^{\text{DL},\text{in}}$ 、 $e_{i,t}^{\text{DL}}$ 和 $e_{i,t-1}^{\text{DL}}$ 分别表示可迁移负荷当前时刻的充电功率、荷电状态和前一时刻的荷电状态; θ_i^{DL} 和 $\eta_i^{\text{DL},\text{in}}$ 分别表示耗散功率和转换系数; $\bar{p}_i^{\text{DL},\text{in}}$ 和 $\underline{p}_i^{\text{DL},\text{out}}$ 分别表示最大充电功率和最小充电功率; $\bar{e}_i^{\text{DL}}$ 表示额定能量容量; $\bar{e}_i^{\text{DL}}$ 表示能量需求; $T_{\text{start}}^{\text{DL}}$ 和 $T_{\text{end}}^{\text{DL}}$ 分别表示可迁移负荷用电的起始时间和终止时间。

2.2.2 灵活性资源通用运行模型

除功率与能量之间存在耦合外,灵活性资源可以进一步为上级电力系统提供调节服务。灵活性资源的调节服务可以表示在有功功率基础上向上和向下的可调节性。因此,考虑到功率、能量和调节服务的耦合关系,单个灵活性资源的通用运行模型如下:

$$\underline{p}_{i,t}^{\text{in}} \leq p_{i,t}^{\text{in}} \leq \bar{p}_{i,t}^{\text{in}}, \quad \underline{p}_{i,t}^{\text{out}} \leq p_{i,t}^{\text{out}} \leq \bar{p}_{i,t}^{\text{out}} \quad (2-11)$$

$$0 \leq r_{i,t} \leq \bar{r}_{i,t} \quad (2-12)$$

$$\underline{e}_{i,t} \leq e_{i,t} \leq \bar{e}_{i,t} \quad (2-13)$$

$$e_{i,t} = \theta_i e_{i,t-1} + \Delta T \eta_i \left(\kappa_i^{\text{in}} p_{i,t}^{\text{in}} - \frac{1}{\kappa_i^{\text{out}}} p_{i,t}^{\text{out}} \right) + \omega_i \omega_t^{\text{AM}} \quad (2-14)$$

其中, $p_{i,t}^{\text{in}}$ 表示灵活性资源 i 在 t 时刻的有功输入功率; $p_{i,t}^{\text{out}}$ 表示灵活性资源 i 在 t 时刻的有功输出功率; $e_{i,t}$ 表示灵活性资源 i 在 t 时刻的剩余能量; $r_{i,t}$ 表示灵活性资源 i 在 t 时刻的调节容量; $\bar{e}_{i,t}$ 和 $\underline{e}_{i,t}$ 分别表示剩余能量的最大边界和最小边界; $\bar{p}_{i,t}^{\text{in}}$ 和 $\underline{p}_{i,t}^{\text{in}}$ 分别表示灵活性资源 i 在 t 时刻的最大有功输入功率和最小有功输入功率; $\bar{p}_{i,t}^{\text{out}}$ 和 $\underline{p}_{i,t}^{\text{out}}$ 分别表示灵活性资源 i 在 t 时刻的最大有功输出功率和最小有功输出功率; $\bar{r}_{i,t}$ 表示灵活性资源

源 i 的最大功率调节容量; w_t^{AM} 表示灵活性资源 i 在 t 时刻的外界环境温度; θ_i 、 ω_i 和 $e_{i,0}$ 分别为灵活性资源的耗散率、外界环境的影响因子、初始能量; η_i 为灵活性资源的有功功率与能量(或温度)之间的转换系数; κ_i^{in} 和 κ_i^{out} 分别为灵活性资源的有功输入功率和输出功率与能量之间的转换系数。

式(2-11)~式(2-13)表示灵活性资源有功功率、调节服务和剩余能量的运行区间; 式(2-14)表示剩余能量状态和有功输入和输出之间的关系。

由于调节服务是在有功功率的基础上叠加的, 因此, 调节服务提供的范围应根据灵活性资源所有者设定的最大调节范围、有功功率范围和能量范围综合确定, 具体计算式如下:

$$\bar{r}'_{i,t} = \bar{r}_i^{\text{fix}} \quad (2-15)$$

$$\bar{r}''_{i,t} = \min\{(p_{i,t}^{\text{out}} - p_{i,t}^{\text{in}}) + \bar{p}_{i,t}^{\text{in}} - \underline{p}_{i,t}^{\text{out}}, (p_{i,t}^{\text{in}} - p_{i,t}^{\text{out}}) - \underline{p}_{i,t}^{\text{in}} + \bar{p}_{i,t}^{\text{out}}\} \quad (2-16)$$

$$\bar{r}'''_{i,t} = \min\left\{\frac{1}{h^{\text{R}} \Delta T}(\bar{e}_{i,t} - e_{i,t}), \frac{1}{h^{\text{R}} \Delta T}(e_{i,t} - \underline{e}_{i,t})\right\} \quad (2-17)$$

$$\bar{r}_{i,t} = \min\{\bar{r}'_{i,t}, \bar{r}''_{i,t}, \bar{r}'''_{i,t}\} \quad (2-18)$$

其中, $\bar{r}_i^{\text{fix}}$ 是设备的最大功率调节范围; h^{R} 表示能量预留储备系数。在实际实施中, 调节服务可以代表不同种类的辅助服务, 包括调频服务或旋转备用服务。

式(2-15)表示设备功率实际调节范围应小于设备运营商上报的最大调节范围。式(2-16)表示有功功率和调节服务的累加量不超过有功功率运行范围的上限和下限。为了抵消因提供调节服务而产生的能量偏差, 灵活性资源应保持足够的剩余能量裕度, 以便至少在 $h^{\text{R}} h$ 内连续提供辅助服务。一般来讲, 对于旋转备用服务, h^{R} 通常被设置为 1 h; 对于频率调节服务, h^{R} 通常被设置为 15 min^[7-8]。

灵活性资源的功率输入和输出、调节范围和能量状态相互耦合, 因为它们受到式(2-14)、式(2-16)和式(2-17)的约束, 且它们各自的可行域也不可避免地相互影响。此外, 其他具有更简单数学模型的小容量灵活性资源, 如燃气轮机、屋顶光伏和风电, 也可以通过上述方式进行建模, 只需忽略式(2-13)、式(2-14)和式(2-17)中的时间耦合约束。

由于不同灵活性资源的参数是异质的, 因此灵活性资源的可行域也不同。考虑到有功功率输入、有功功率输出和调节范围作为决策变量, 式(2-11)~式(2-18)可以重新写为如下紧凑形式: