

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.11.006

考虑调峰需求及负荷弹性的主动配电系统调度优化

曹永伦^{1,2}, 唐昊¹, 吕凯¹, 王正风²

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230061)

摘要:针对电网调峰压力日益增大及弹性资源不断增加的情况,文章研究弹性环境下主动配电系统响应电网动态调峰需求的调度优化问题。首先根据可转移负荷特性,提出弹性裕度的概念以量化当前调整量对未来调度决策的影响,并考虑激励对可削减负荷和储能装置的可调范围的影响,建立两者的弹性模型;其次基于系统内部柔性负荷、储能装置和光伏设备的出力约束,针对调峰需求及负荷弹性的主动配电系统日内调度优化问题,建立马尔可夫决策过程模型;最后通过算例仿真验证所提模型的有效性。研究结果表明,所得调度策略可进一步挖掘电力弹性资源可调度潜力,在满足电网调峰需求的基础上保证系统平稳经济运行。

关键词:调峰;负荷弹性;主动配电系统;学习优化

中图分类号:TM734

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)11-1472-09

Dispatching optimization of active distribution system considering peak regulation demand and load elasticity

CAO Yonglun¹, TANG Hao¹, LYU Kai¹, WANG Zhengfeng²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: In view of the increasing peak regulation pressure and elastic resources of power grid, the dispatching optimization problem of active distribution system responding to the dynamic peak regulation demand of power grid in elastic environment is studied. Firstly, according to the characteristics of transferable loads, the concept of elastic margin is proposed to quantify the impact of current adjustment on future dispatching decisions. Considering the influence of excitation on the adjustable range of reducible loads and energy storage device, the elastic models of them are established. Secondly, based on the output constraints of flexible load, energy storage device and photovoltaic equipment in the system, a Markov decision process model for the intraday dispatching optimization problem of active distribution system considering peak regulation demand and load elasticity is established. Finally, the effectiveness of the proposed model is verified by an example simulation. The results show that the dispatching strategy can further excavate the dispatching potential of power elastic resources and ensure the stable and economic operation of the system on the basis of meeting the peak regulation demand of power grid.

Key words: peak regulation; load elasticity; active distribution system; learning optimization

随着分布式电源的大规模并网以及负荷侧需求弹性和可调度能力的不断彰显,能够主动管理

分布式电源及需求响应资源的主动配电系统得到快速发展^[1-2]。同时,由于用户用电需求的快速增

收稿日期:2022-11-10;修回日期:2023-01-06

基金项目:国家电网有限公司总部科技资助项目(SGTYHT/19-JS-215)

作者简介:曹永伦(1995—),男,天津市人,合肥工业大学硕士生;

唐昊(1972—),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:htang@hfut.edu.cn.

长,电力系统负荷峰谷差持续增大,通过发电侧机组启停及出力调节进行调峰的传统调峰手段越来越难以满足电网调峰需求^[3-4]。因此,研究如何挖掘弹性环境下主动配电系统参与电网调峰带来的潜在效益具有重要意义。

当前针对主动配电系统的研究重点包括规划设计、分层控制和运行管理等。对主动配电系统规划的研究主要涉及可再生能源等分布式电源的优化配置和配电系统网架规划。文献[5-6]分别以网损最小化和配电网运行利润最大化为目标,提出分布式电源优化配置及出力模型;文献[7]以增加分布式能源消纳、提升系统供电可靠性等为目标,对多分布式能源接入的主动配电网进行研究;文献[8-9]以主动配电系统分层协调控制为系统进行研究,对各类资源进行调度和管理提供技术支持。在运行管理方面,国内外学者已在无功补偿和优化调度等方面开展了研究。文献[10]提出一种考虑安全、经济、环境的最佳能源组合电力供应模型,并针对考虑电力供应能力和可靠性的电力供应平衡提出一个随机优化模型;文献[11]建立包含风能与储能系统的主动配电网调度模型。关于考虑调峰需求的主动配电网调度优化的研究较少。

随着主动配电系统的发展、全网弹性资源的不断增加,电网弹性研究定义为电网在一定经济、技术条件的约束下,快速有效地优化调度现有资源,应对客观不确定性因素(如电价、气候等)变化的响应能力和可控性^[12]。对于弹性定量多维度刻画方面,已有较多学者进行研究。文献[13-14]分别提出基于聚类分析和蒙特卡罗统计等技术的主动配电网聚类负荷或分布式资源的预测及调度应用方法;文献[15]基于非顺序概率生产模拟方法,建立系统弹性资源的概率密度函数,考虑在电力调度过程中,弹性调度资源并非完全独立,而是有明显的时间关联性;文献[16]提出基于“点-线-面-体”多级协调的负荷预测评估方法。但是目前关于弹性资源的分析评估,多数仅考虑单一弹性负荷或电源,对多类弹性资源参与调度情况下的弹性分析较少,针对大规模电网弹性资源的评估亦有欠缺。

在上述文献研究的基础上,本文研究弹性环境下主动配电系统响应电网调峰需求的日内调度优化问题。首先建立基于系统内部柔性负荷、储能装置和光伏设备出力约束的主动配电系统模型,并从弹性裕度、激励等方面对负荷弹性进行了

分析;然后将考虑电网调峰及负荷弹性的系统动态调度优化问题建立为相应的学习优化模型;最后采用学习优化方法对弹性环境下的调度优化问题进行策略求解,并对比分析有无考虑负荷弹性对调度优化的影响。

1 主动配电系统模型

1.1 系统构成

本文考虑的主动配电系统由多类型负荷、光伏和全钒液流电池(vanadium redox battery, VRB)等组成^[17],系统结构如图 1 所示。在调度过程中,上级调度控制中心以变量的形式分配调峰任务至主动配电系统;主动配电系统在接收到调峰任务后,考虑用电需求弹性和出力约束等情况,对内部可调度电力资源进行统筹调配,以达到系统平稳经济运行和尽可能满足电网调峰需求的目的。

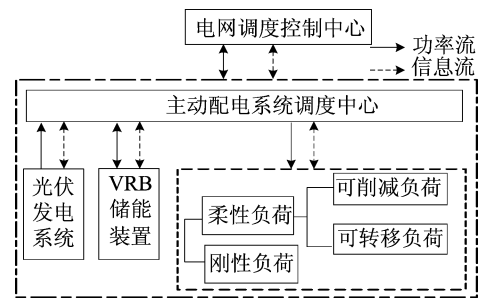


图 1 主动配电系统结构

为保证主动配电系统在调度过程中的安全运行,对于任意时刻 t ,系统应满足功率平衡约束,即

$$P_{\text{grid}}^t + P_{\text{pv}}^t = P_{\text{vrb}}^t + P_{\text{rl}}^t + \sum_{l=1}^{N_1} P_{\text{fl}}^t \quad (1)$$

其中: P_{grid}^t 为 t 时刻系统购电功率; P_{pv}^t 为 t 时刻光伏实际发电功率; P_{vrb}^t 为 t 时刻电池实际充放电功率; P_{rl}^t 为 t 时刻刚性负荷实际功率; P_{fl}^t 为第 l 类柔性负荷实际需求功率; N_1 为柔性负荷种类。

1.2 柔性负荷模型

本文考虑的柔性负荷包括可削减负荷和可转移负荷两类。

1.2.1 可削减负荷弹性模型

可削减负荷是指用电功率可以部分或者全部削减的负荷,其可削减量受激励价格的影响。在激励影响下,可削减负荷的调节量上限会在原始申报的基础上产生一定程度上偏。本文假设主动配电系统内部的用户用电素质较高,能够积极响

应调度中心激励。因此,可削减负荷模型可以表示为:

$$0 < P_{re}^t < P_{re}^t + R_{re}^t(e_{re}^t) \quad (2)$$

$$R_{re}^t(e_{re}^t) = \begin{cases} 0, & e_{re}^t < e_{ar}^t; \\ \alpha_{e_{re}} \ln(e_{re}^t - e_{ar}^t + c_{re}), & e_{ar}^t \leq e_{re}^t \leq e_{up}^t; \\ R_{max}^t, & e_{up}^t < e_{re}^t \leq e_{max}^t \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{re}^t + R_{re}^t(e_{re}^t) \leq P_{re,max}^t \quad (4)$$

其中: P_{re}^t 为 t 时刻可削减负荷实际功率; P_{re}^t 为可削减负荷主体在 t 时刻申报的原始可削减负荷量; $R_{re}^t(\cdot)$ 为可削减负荷在 t 时刻激励的影响下所提升的可调节量; e_{re}^t 为 t 时刻的激励; e_{ar}^t 、 e_{up}^t 、 e_{max}^t 分别为可被电力用户接受并使其有意愿改变自身用电方式的激励、电力用户响应能力内可选的上限激励和最大激励; $\alpha_{e_{re}}$ 为可削减负荷激励系数; c_{re} 为大于1的常数; R_{max}^t 为 t 时刻可削减负荷最大弹性可调节量; $P_{re,max}^t$ 为用户最大可削减负荷量。

t 时刻可削减负荷调度成本 c_{re}^t 为:

$$c_{re}^t = f_{re}(e_{re}^t, \rho_{grid}^t, P_{re}^t) \quad (5)$$

其中: $f_{re}(\cdot)$ 为可削减负荷调度成本函数; ρ_{grid}^t 为 t 时刻电价。

1.2.2 可转移负荷弹性模型

可转移负荷的特点为用户用电功率和用电时间可以在一定范围内灵活调节,但在周期内的转移前后用电总量不变,且用电周期内的各个时刻存在增减负荷上下限约束^[18]。因此,可转移负荷调度模型可以表示为:

$$P_{tr,d}^t \leq P_{tr}^t \leq P_{tr,u}^t \quad (6)$$

$$\sum_{t=0}^{T-1} P_{tr}^t = 0 \quad (7)$$

其中: P_{tr}^t 为 t 时刻可转移负荷实际功率; $P_{tr,u}^t$ 、 $P_{tr,d}^t$ 分别为 t 时刻可转移负荷最大允许增负荷量和最大允许减负荷量; T 为整个调度周期。

t 时刻可削减负荷调度成本 c_{tr}^t 为:

$$c_{tr}^t = \alpha_{tr} \rho_{grid}^t \int_t^{t+\Delta} P_{tr}^t dt \quad (8)$$

其中, α_{tr} 为可转移负荷调整代价系数。

由于可转移负荷需要满足调整前后总量不变的约束,其当前时刻的调整量会对未来时刻的决策产生影响。因此,本文将“弹性”与“裕度”结合,从而提出“弹性裕度”的概念来刻画各时刻可转移负荷的调度弹性,以保证可转移负荷调度过程的可持续性。从初始时刻到当前 t 时刻过程中,各时刻采取转移动作后的累计转移负荷量为剩余时

段 $T-t$ 的弹性裕度,记为 $S_{tr}^t = -\int_0^t P_{tr}^t dt$ 。弹性裕度表征了剩余时段内可转移负荷调整量的变化范围,进而量化剩余时段可转移负荷调度决策受之前时段决策的影响。

通过设定转移补贴 c_{dir}^t 来引导负荷转移,即

$$c_{dir}^t = \begin{cases} \alpha_{dir} \rho_{grid}^t |P_{tr}^t|, & P_{tr}^t S_{tr}^{t-1} > 0; \\ 0, & P_{tr}^t S_{tr}^{t-1} \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中: α_{dir} 为转移补贴系数; ρ_{grid}^t 为 t 时刻分时电价; S_{tr}^{t-1} 为截止到上一时刻的弹性裕度。

在转移补贴的影响下,可转移负荷剩余时刻的动作选取方向与弹性裕度之间的期望引导关系可近似描述为:

$$\text{dir}_{tr}^t \rightarrow \begin{cases} +, & S_{tr}^{t-1} > 0; \\ \text{rand}, & S_{tr}^{t-1} = 0; \\ -, & S_{tr}^{t-1} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中: dir_{tr}^t 表示在考虑可转移负荷弹性裕度的前提下,当前时刻动作选取方向; \rightarrow 表示动作方向的选取并非完全确定,只是“更倾向于”; $+$ 表示增加负荷; $-$ 表示减小负荷; rand 表示动作选取方向随机。

1.3 VRB 储能装置模型

VRB 电气模型有多种,为充分反映充放电过程中储能荷电状态(state of charge, SOC)的动态变化特性,采用文献[19]中所建立的等效模型。假设 VRB 储能装置的额定容量为 E_N ,其荷电状态 S_{vrb}^t 能够反映 t 时刻储能剩余电量状态,即

$$S_{vrb}^t = \frac{E_{vrb}^t}{E_N}, \quad S_{vrb}^t \in (0, 1] \quad (11)$$

充放电过程中 SOC 变化的计算公式为:

$$S_{vrb}^{t+\Delta} = S_{vrb}^t + \frac{1}{E_N} \int_t^{t+\Delta} P_{vrb}^t dt \quad (12)$$

在储能充放电过程中,通常将其荷电状态控制在 $0.2 \sim 0.8$,不仅能够避免过充过放情况,而且利于电池高效率充放电^[20]。与可削减负荷类似,储能装置的调节量也受到激励的影响,其实际调节量会在激励的刺激下,在原始申报功率的基础上产生一定的上偏。

2 考虑调峰需求的调度优化模型

在主动配电系统中,调峰需求和区域环境信息都具有很大的随机性,调度控制中心在每一个决策周期的开始时刻需要根据调峰需求和区域环境的预测信息,下发储能充放电动作、柔性负荷调整动作和激励的选定动作等调度任务给系统。可以将其看成不确定条件下的序贯决策过程,并且

当前时刻所采取的调度方案会对系统后续时刻的运行产生影响。本文将主动配电系统的调度优化问题建模为马尔可夫决策过程,将调度中心作为智能体,定义系统状态、动作、状态转移方程和运行代价。

2.1 系统状态空间

本文将一个调度日均分为 $0 \sim (K-1)$ 共 K 个决策周期, $[t_k, t_{k+1})$ 为第 k 个决策周期对应时段, t_k 为该周期的决策时刻。定义系统的状态 s^k 由决策时刻 t_k 、调峰需求以及区域环境信息组成,即

$$s^k = (t_k, n_{\text{peak}}^k, X^k) \in S^k \quad (13)$$

$$X^k = (n_{\text{pv}}^k, n_{\text{vrb}}^k, n_{\text{rl}}^k, n_{\text{fl}}^k, n_{\text{arctr}}^k) \quad (14)$$

其中: n_{peak}^k 为 t_k 决策时刻的电网实时调峰需求等级; X^k 为 t_k 决策时刻的区域环境信息,由光伏发电功率 P_{pv}^k 、储能装置荷电状态 S_{vrb}^k 、刚性负荷需求功率 P_{rl}^k 、柔性负荷需求功率 P_{fl}^k 和可转移负荷弹性裕度 S_{tr}^k 组成; S^k 为系统 agent 的状态空间,状态总数 N_s 可表示为:

$$N_s = K(2N_{\text{peak}} + 1)(2N_{\text{pv}} + 1)(2N_{\text{vrb}} + 1) \times (2N_{\text{arctr}} + 1)(2N_{\text{rl}} + 1) \prod_{j=1}^{N_{\text{fl}}} (2N_{\text{fl}}^j + 1) \quad (15)$$

其中, N_{fl} 由可削减负荷和可转移负荷组成, $N_{\text{fl}} = (N_{\text{re}}, N_{\text{tr}})$ 。

2.2 系统动作空间

定义系统的行动由储能充放电动作、柔性负荷调整动作以及激励选定动作构成,即

$$a^k = (a_{\text{vrb}}^k, a_{\text{fl}}^k, a_{\text{en}}^k) \in A_{\text{sum}} \quad (16)$$

其中: $a_{\text{vrb}}^k \in A_{\text{vrb}} = \{-1, 0, 1\}$, $-1, 0, 1$ 这 3 种动作分别表示 VRB 储能放电、闲置和充电,即储能装置的动作数 $N_{a_{\text{vrb}}} = 3$; $a_{\text{en}}^k \in A_{\text{en}} = \{0, 1, \dots, N_{a_{\text{en}}} - 1\}$, 不同动作分别表示不同的激励; $a_{\text{fl}}^k = (a_{\text{re}}^k, a_{\text{tr}}^k)$, 分别表示削减负荷动作 $a_{\text{re}}^k \in A_{\text{re}} = \{0, 1, \dots, N_{a_{\text{re}}} - 1\}$ 和转移负荷动作 $a_{\text{tr}}^k \in A_{\text{tr}} = \{-N_{a_{\text{tr}}}, \dots, 0, \dots, N_{a_{\text{tr}}}\}$; A_{sum} 为区域动作集, 对应动作总数 N_a 为:

$$N_a = N_{a_{\text{vrb}}} N_{a_{\text{re}}} N_{a_{\text{en}}} (2N_{a_{\text{tr}}} + 1) \quad (17)$$

2.3 系统状态转移

系统在当前状态 s^k 下通过策略网络选取系统的动作 a^k , 动作执行后从当前状态转移到下一状态 $s^{k+1} = (t_{k+1}, n_{\text{peak}}^{k+1}, X^{k+1}) \in S$, 即

$$s^{k+1} = f(s^k, a^k) \quad (18)$$

日内调度序贯决策过程如图 2 所示。

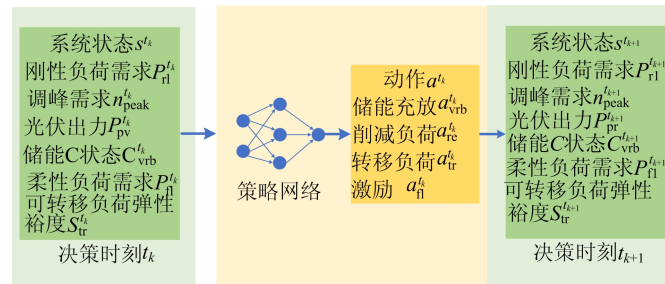


图 2 日内调度序贯决策过程

在 X^{k+1} 中, VRB 储能装置的荷电状态转移方程为:

$$S_{\text{vrb}}^{k+1} = S_{\text{vrb}}^k + \frac{1}{E_N} \int_{t_k}^{t_{k+1}} P_{\text{vrb}}^t dt \quad (19)$$

可转移负荷弹性裕度状态转移方程为:

$$S_{\text{tr}}^{k+1} = S_{\text{tr}}^k - \int_{t_k}^{t_{k+1}} P_{\text{tr}}^t dt \quad (20)$$

此外, 电网调峰需求、光伏出力、刚性负荷及柔性负荷需求等状态的转移属于自然转移过程, 由外部环境决定, 此处不再赘述。

2.4 系统运行代价及优化目标

本文调度中心采取集中控制模式, 具体表现为调度中心对区域内部的各种可调度资源进行直接控制。调度中心以系统整体日运行代价最小为

目标, 具体代价如下。假定系统当前处于第 k 个决策周期, 状态为 s^k , 通过选取行动 a^k 转移到下一状态 s^{k+1} , 同时产生转移代价 $c(s^k, a^k)$, 得到一个状态转移过程为 $\langle s^k, a^k, s^{k+1}, c(s^k, a^k) \rangle$ 。在响应调峰需求的过程中产生的代价有调峰未完成代价 c_{peak}^k 、储能装置充放电调整代价 c_{vrb}^k 、光伏发电补偿代价 c_{pv}^k 、从电网购电的购电代价 c_{grid}^k 、负荷调整补偿代价 c_{re}^k 和 c_{tr}^k 以及弹性环境下可转移负荷转移补贴 c_{dir}^k 。各类代价计算公式为:

$$c_{\text{peak}}^k = \beta_{\text{peak}} \rho_{\text{grid}}^k \int_{t_k}^{t_{k+1}} P_{\text{dif}}^t dt \quad (21)$$

$$c_{\text{vrb}}^k = \alpha_{\text{vrb}} \rho_{\text{grid}}^k \int_{t_k}^{t_{k+1}} [(1 - \eta_{\text{charge}}) P_{\text{vrb}}^t +$$

$$(1 - \eta_{\text{discharge}}) P_{\text{vrb}}^{t_k}] dt \quad (22)$$

$$c_{\text{pv}}^{t_k} = \alpha_{\text{pv}} \rho_{\text{grid}}^{t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} P_{\text{pv}}^{t_k'} dt \quad (23)$$

$$c_{\text{grid}}^{t_k} = \rho_{\text{grid}}^{t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} P_{\text{grid}}^{t_k} dt \quad (24)$$

$$c_{\text{fl}}^{t_k} = c_{\text{re}}^{t_k} + c_{\text{tr}}^{t_k} + c_{\text{dir}}^{t_k} \quad (25)$$

$$c(s^{t_k}, a^{t_k}) = c_{\text{peak}}^{t_k} + c_{\text{pv}}^{t_k} + c_{\text{vrb}}^{t_k} + c_{\text{grid}}^{t_k} + c_{\text{fl}}^{t_k} \quad (26)$$

其中: β_{peak} 为调峰完成度系数; $P_{\text{dif}}^{t_k}$ 为在 t_k 时刻实际调峰与调峰基线任务差; $\alpha_{\text{vrb}} = f(\beta_{\text{vrb}}, e_{\text{vrb}}^k)$ 为储能调整补贴系数, β_{vrb} 为补贴常量; η_{charge} 、 $\eta_{\text{discharge}}$ 分别为电池充电和放电效率; α_{pv} 为光伏补贴系数; $c_{\text{fl}}^{t_k}$ 为柔性负荷调整代价。

考虑系统调度的周期性, 同时为保证储能装置始末荷电状态维持在较低水平, 设储能末状态代价为 $V_{\text{vrb}}^{t_K}$, 即

$$V_{\text{vrb}}^{t_K} = \alpha_{\text{vrb}}^{t_K} |n_{\text{vrb}}^{t_K} - n_{\text{vrb}}^{\text{con}}| \quad (27)$$

其中: $\alpha_{\text{vrb}}^{t_K}$ 为储能电池末代价系数; $n_{\text{vrb}}^{t_K}$ 为调度日末时刻储能剩余容量等级; $n_{\text{vrb}}^{\text{con}}$ 为初始设定的容量等级。

为保证可转移负荷调度可持续性, 设转移末代价为 $V_{\text{tr}}^{t_K}$, 即

$$V_{\text{tr}}^{t_K} = \alpha_{\text{trpu}} |S_{\text{tr}}^{t_{K-1}}| \quad (28)$$

其中, α_{trpu} 为转移末代价系数。

系统日运行代价 V 可表示为有限时段内的运行代价 $\sum_{k=0}^{K-1} c(s^{t_k}, a^{t_k})$ 与末代价 $V_{\text{vrb}}^{t_K}$ 、 $V_{\text{tr}}^{t_K}$ 之和, 即

$$V = \sum_{k=0}^{K-1} c(s^{t_k}, a^{t_k}) + V_{\text{vrb}}^{t_K} + V_{\text{tr}}^{t_K} \quad (29)$$

定义系统策略 π 为状态空间到动作空间的映射, 即 $\pi: S \rightarrow A_{\text{sum}}$ 。对于任意状态 s^{t_k} , 均可依据该策略 π 选择行动 $a^{t_k} = \pi(s^{t_k}) \in A_{\text{sum}}$ 控制系统运行。系统的优化性能准则为 V^π , 即

$$V^\pi = E_{\pi, s^0} \left[\sum_{k=0}^{K-1} c(s^{t_k}, \pi(s^{t_k})) + V_{\text{vrb}}^{t_K} + V_{\text{tr}}^{t_K} \right] \quad (30)$$

其中, $E_{\pi, s^0}[\cdot]$ 为系统日运行代价在 π 、 s^0 下的期望。

系统优化目标如下: 在策略集 Ω 中找到最优策略 π^* , 保证在 π^* 下日均运行代价最低, 即 $\pi^* = \arg \min_{\pi \in \Omega} V^\pi$ 。

本文采用集中控制的 Q 学习方法对调度优化问题进行求解, 马尔可夫决策过程如图 3 所示, 智能体根据 k 时刻状态 S^{t_k} 和代价 $c(s^{t_k}, a^{t_k})$ 更新

Q 值, 并选取动作 a^{t_k} , 环境根据式 (18) 发生状态转移得到 $k+1$ 时刻的状态 $S^{t_{k+1}}$, 并反馈代价 $c(s^{t_{k+1}}, a^{t_{k+1}})$ 。其中时段 $[0, K-2]$ 以及末时段 $K-1$ 的 Q 值更新公式为:

$$Q(s^{t_k}, a^{t_k}) = Q(s^{t_k}, a^{t_k}) + \alpha [c(s^{t_k}, a^{t_k}) + \min_{a^{t_{k+1}} \in A_{\text{sum}}} Q(s^{t_{k+1}}, a^{t_{k+1}}) - Q(s^{t_k}, a^{t_k})] \quad (31)$$

$$Q(s^{t_{K-1}}, a^{t_{K-1}}) = Q(s^{t_{K-1}}, a^{t_{K-1}}) + \alpha [c(s^{t_{K-1}}, a^{t_{K-1}}) + V_{\text{vrb}}^{t_K} + V_{\text{tr}}^{t_K} - Q(s^{t_{K-1}}, a^{t_{K-1}})] \quad (32)$$

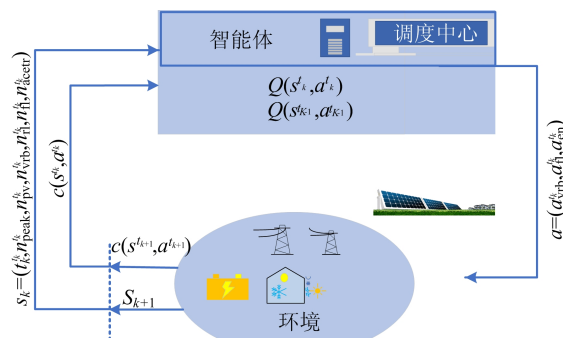
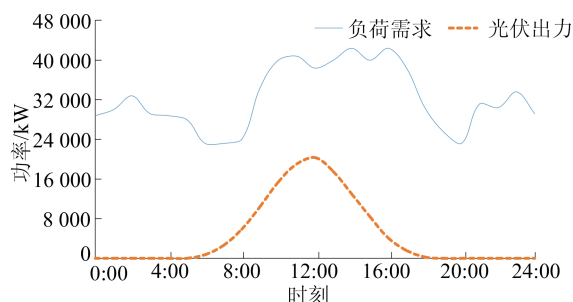


图 3 马尔可夫决策过程

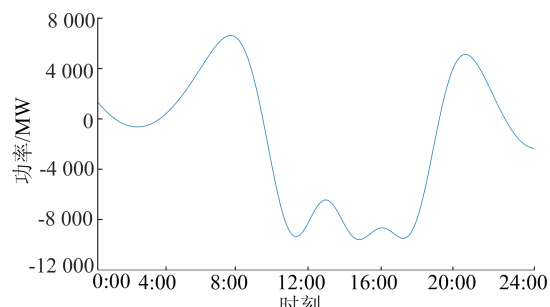
3 算例仿真

3.1 算例描述

本文将单个调度日分为 24 个时段, 各时段时长 1 h。根据安徽某区 110 kV 主变压器所供配电网各类电力资源的相关数据特征^[21], 得到系统总负荷需求、调峰需求基线、柔性负荷出力特性基线如图 4 所示。



(a) 总负荷需求



(b) 调峰需求基线

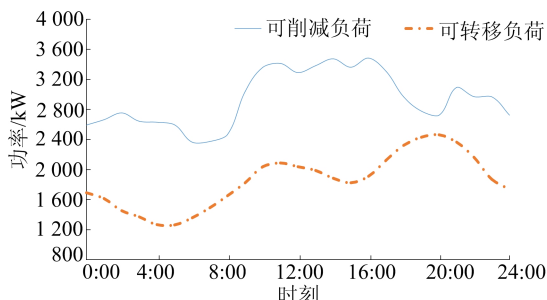


图 4 系统总负荷需求基线、调峰需求基线、柔性负荷出力特性基线

调峰需求是根据日内负荷情况给出调峰需求基线,并在其基础上叠加高斯随机量,以模拟日内实时调峰需求。调峰需求为正表示期望增加用电量,为负表示期望降低用电量。本文将激励分为 3 个等级,等级 1 为无激励情况,等级 2 为每千瓦时补贴 7 倍当前电价,等级 3 为每千瓦时补贴 10 倍当前电价。刚性负荷在负荷群中占比 85.3%,柔性负荷占比 14.7%(可削减负荷 9.0%、可转移负荷 5.7%)。系统内部配备容量为 48 MW·h 的 VRB 储能装置,算例中各参数设置如下: $\alpha_{dir} = 1.0, \alpha_{trpu} = 0.1, \eta_{discharge} = 0.9, \eta_{charge} = 0.9$ 。分时电价见表 1 所列。

表 1 分时电价

峰谷划分	时段	分时电价/[元/(kW·h)]
峰	9:00—12:00、17:00—22:00	1.330 4
平	8:00—9:00、12:00—17:00、 22:00—23:00	0.878 8
谷	23:00—次日 8:00	0.542 2

3.2 仿真结果分析

每条样本轨道的意义为系统参与电网调峰的 1 个调度日。在整个学习优化的过程中,每经过 800 个调度日(1 个学习步)的学习优化,对策略进行 1 次离线评估,每次评估系统运行 80 d。通过对评估结果取均值以估算系统日运行代价,考虑负荷弹性的系统日平均代价学习优化曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,学习初始动作的不合理选取导致代价很大,但是随着学习进程的不断推进,系统日运行代价均逐渐下降,最终趋于收敛,整体体现了一定的优化效果。

在随机初始储能荷电状态的情况下,系统末代价的变化曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着学习进程的不断推进,系统整体的末代价逐渐下降,最后收敛于 0 附近。说明在末时刻,可转移负

荷基本满足调度前后总量不变的约束,储能装置末储能荷电状态也可达到设定的期望值,能够保证接近于 0。

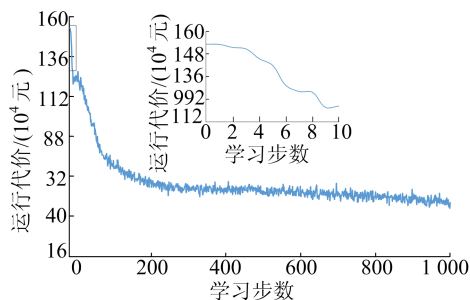
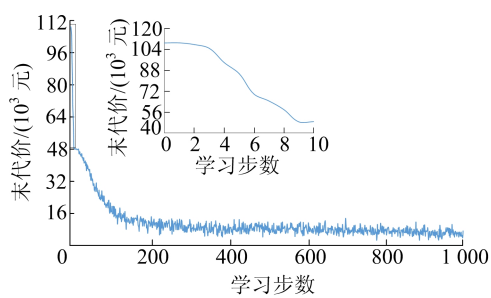
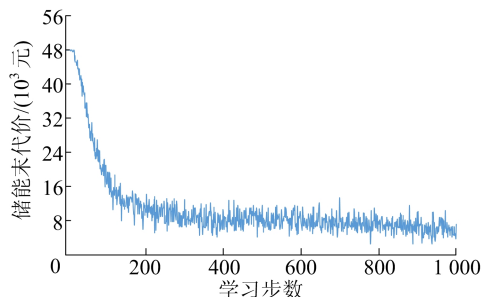


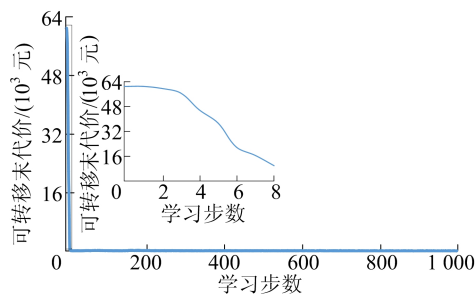
图 5 日均运行代价曲线



(a) 末代价



(b) 储能末代价



(c) 转移控制末代价

图 6 系统末代价变化曲线

调度前、后负荷用电特征见表 2 所列,设定不考虑负荷弹性和考虑负荷弹性的 2 种情况分别为方案 1 和方案 2,2 种方案可调度的资源相同,但方案 2 额外对弹性进行了刻画,并将其作为影响系统决策的因素。初始负荷用电曲线的峰谷差为 21 768 kW,通过对负荷弹性进行刻画,以及对系统

内储能装置充放电、柔性负荷调整进行控制,使峰谷差减少为 13 944 kW。

表 2 调度前、后系统负荷特征 单位:kW

类型	峰值	谷值	峰谷差
初始负荷	41 848	20 080	21 768
方案 1	40 472	25 600	14 872
方案 2	38 312	24 368	13 944

弹性调度前、后系统总负荷曲线如图 7 所示。相比于原始负荷曲线,系统整体体现出“削峰填谷”的效果,同时系统整体用电曲线更加平稳。上述结果说明,负荷弹性刻画以及学习优化可以促进负荷响应调峰需求以减小系统峰谷差,同时进一步保证了系统的平稳经济运行。

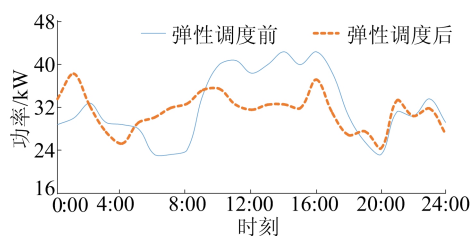


图 7 弹性调度前、后负荷用电曲线

学习优化完成之后,再设定 1 条样本轨道在当前的优化策略下运行,以获得单个调度日各时段各调整动作采取情况。可削减负荷响应调峰需求申报量与实际弹性调度量如图 8 所示。从图 8 可以看出,在实际参与调度的部分用电高峰或者用电平时段,如 3:00、10:00、14:00 等,可削减负荷主体的整体负荷削减量有一定程度的增大,整体上更利于削峰填谷,降低调峰压力。这是由于通过设定激励,并在响应调峰过程中选定不同等级激励,改变了可削减负荷主体自身用电方式,促进了调峰任务的完成。

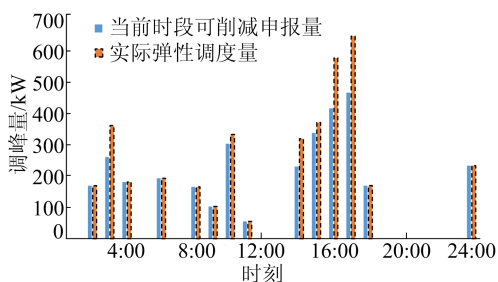
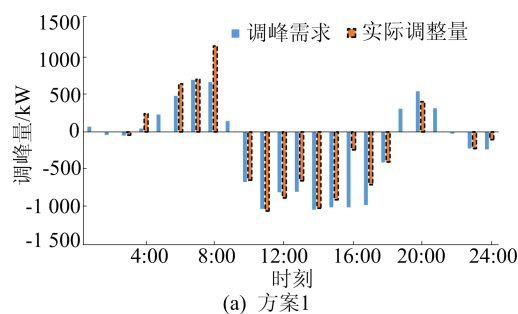


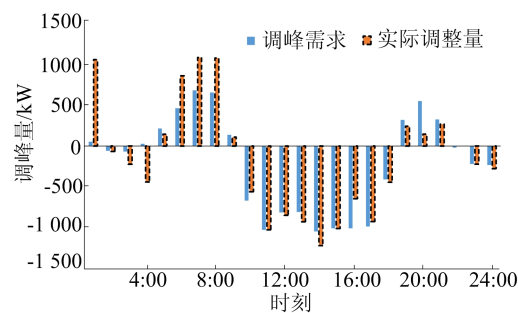
图 8 可削减负荷申报量与实际调度量

不同方案调峰指令完成情况如图 9 所示。从

图 9 可以看出,方案 1 存在较多时段未参与调峰的情况(1:00、2:00、5:00、9:00、19:00、21:00、22:00),而方案 2 仅在调峰任务很低的 22:00 未参与调峰;方案 2 在用电高峰(11:00—16:00)和用电低谷(5:00—9:00)时段的实际调峰量与电网调峰需求量偏差更小,且整体响应调峰的积极性更高;但方案 2 在时段 10:00—1:00 的实际调峰与需求相差较大,同时在 4:00 出现了反向调峰的情况,这是由于在 1:00 内,可转移负荷采取增负荷动作,且储能装置在初始储能荷电状态较低的情况下,为之后用电高峰时段做准备而采取了充电动作;1:00、4:00 属于用电平时段,而调度优化更加关注用电高峰和用电低谷相关时段的调峰响应,存在为了整体调峰完成度从而出现部分时段响应调峰需求不理想的情况。



(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 9 方案 1、2 调峰完成情况

不同方案下的储能荷电状态变化情况如图 10 所示。

由 10 可知:2 个方案都倾向于在用电低谷、电价低的时段充电,在用电高峰、电价高的时段放电;但是方案 2 相较于方案 1,在低电价时段的充电过程中保持了更高的 SOC 状态,且未超过 0.8,在避免电池过充过放和保证高效率充放电的前提下,更利于在之后的用电高峰时段放电以缓解调峰压力;同时,方案 2 在全天末时段处于更低的 SOC 状态,更有利于之后在电价较低的用电低谷或者平时段进行充电操作以备用用电高峰,提高系

统运行经济性。

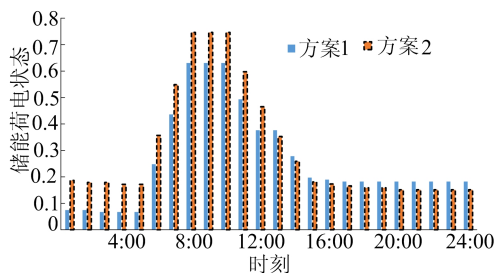


图 10 储能荷电状态变化对比

2 种方案动作选择情况分别如图 11 所示。图 11 中:re 表示可削减负荷,正代表采取削减负荷动作,行动编号越大代表削减等级越大,0 代表不进行削减;tr 表示可转移负荷,正代表增负荷动作(转进),负代表减负荷动作(转出),0 代表不动作;vrb 表示储能装置,正代表电池充电,负代表电池放电,0 代表电池闲置;en 表示激励选定等级。

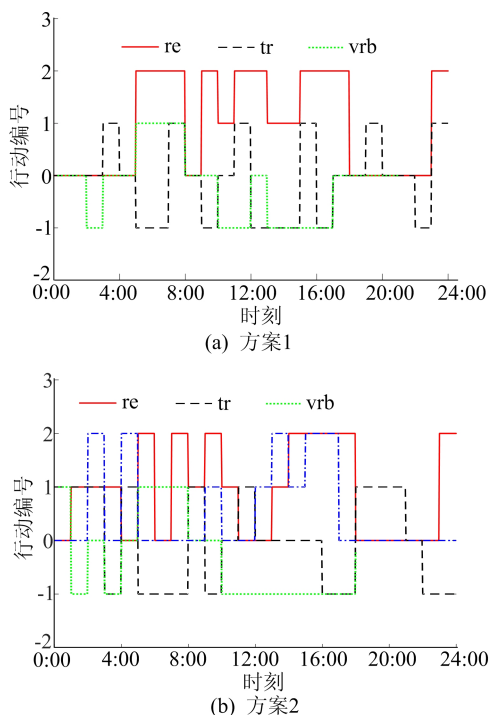


图 11 方案 1、方案 2 下的优化策略动作选取情况

从图 11 可以看出:2 种方案的可削减负荷大都倾向于在用电高峰时段(13:00—18:00)进行负荷削减,在用电低谷时段(20:00—22:00)不进行削减或者以较小等级削减;对于可转移负荷,2 种方案都倾向于在用电高峰期间采取减负荷动作(转出),在用电低谷相关时段采取增负荷动作(转

进)。但方案 2 中的可转移负荷在整个调度过程中的参与度(6 个时刻未参与调峰)要高于方案 1 (10 个时刻未参与调峰)。虽然 2 种方案中转移未代价最终都能够收敛趋于 0,满足调度前、后用电总量不变的约束,但方案 1 可转移负荷选取增、减负荷动作的时刻分别为 6:00 和 8:00,而方案 2 中选取 2 种动作的时刻均为 8:00,后者的可转移负荷在整个调度日中的增减负荷变化波动更加平缓。产生这种现象的原因如下:在方案 2 中将弹性裕度作为环境状态以实时表征剩余时段可转移负荷量波动范围变化,对各个时刻可转移负荷调度决策产生影响。这为调度控制中心和电力用户主体提供了潜在的调度信息,利于电力用户在参与调度时即时规划,量力而行。

对于储能装置,2 种方案都倾向于在较低电价时段(5:00—8:00)时采取充电动作储存电量以备负荷用电高峰,在较高电价时段(10:00—18:00)时放电或者闲置,总体实现降低用电高峰期间的购电代价及用电需求,这种方式可以在凭借电价差获取利润的同时一定程度上缓解电网的调峰压力。

对于方案 2 激励动作的选择,从图 11b 可以看出,虽然其设定了激励补贴,但存在部分时段未选定激励以提高用户调峰参与度,如 0:00—2:00、5:00—9:00、17:00—23:00 等。这是由于存在当前时段的激励处于较低水平,不足以引起用户改变自身用电行为,或者电力用户在上述时段并不愿意接受激励以改变自身用电行为的情况。其对于系统调峰的指导意义如下:参考当前激励选定情况,调度控制中心可以根据调峰需求进一步调整激励的设定。在用电高峰或者用电低谷等时段希望选定激励以改变用户自身用电行为的时段,可以将这些时段及其临近时段的激励水平适当提高;在非用电高峰、调峰压力不大的时段,可以适当降低相关时段的激励水平或者取消激励。

4 结 论

本文首先根据电网调峰以及主动配电系统内各电力资源需求的不确定特性,建立考虑负荷弹性的系统日内调度优化模型;然后采用集中控制的 Q 学习方法对电力弹性环境下的调度优化问题进行求解;最后通过算例仿真实验,验证负荷弹性的刻画可进一步获取电力调度信息,一定程度上有助于提高用户调峰参与度和系统的调峰能

力,同时验证采用学习优化方法解决该类动态调度优化问题的合理性以及有效性。

本文仅考虑负荷弹性的系统日内调度优化,并未考虑日前调度以及日前日内协同调度的问题,因此基于强化学习的日前日内协同调度优化是值得研究的方向。在问题处理过程中,本文对连续型变量进行了离散化处理,使得调度控制的精准度受到影响,而高精度的离散又会提高算法的时空复杂度甚至导致“维数灾”问题。因此随着问题规模的逐渐扩大,考虑状态聚类等方法对系统状态进行处理是值得研究的方向;同时,本文涉及到的电力弹性资源为负荷侧资源,进一步考虑源荷双侧的电力弹性资源,通过引入系统弹性指标约束,建立弹性环境下电网鲁棒调度优化模型,在复杂电力市场交易环境下考虑多主体之间博弈问题也是值得研究的方向。

[参 考 文 献]

- [1] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
- [2] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
- [3] 徐熙林,宋依群,姚良忠,等. 高比例可再生能源受端区域电网调峰的出力网际分配[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):43-51.
- [4] 孙云涛,宋依群. 基于调峰能力评估的省间调峰互济交易模式[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(4):86-91.
- [5] 赵良德,邢新超. 基于网损灵敏度的 DG 优化配置快速计算方法[J]. 电测与仪表,2018,55(7):31-35.
- [6] EBRAHIMI R,EHSAN M,NOURI H. A profit-centric strategy for distributed generation planning considering time varying voltage dependent load demand[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2013,44(1):168-178.
- [7] 李凯. 适应多元源荷接入的配电网规划研究[D]. 济南:山东大学,2019.
- [8] TANG H,WANG C,MATSUI M,et al. Hierarchical coordinated control of a multi-procedure CSPS system by learning optimisation methods[J]. International Journal of Production Research,2015,53(7/8):2055-2072.
- [9] 孙显卓. 含多微网的主动配电网分层协调电压控制[D]. 济南:山东大学,2019.
- [10] SUN J,MORI Y,NAKADE K. A study of total optimisation model for supply balance in electric power market network[J]. Asian Journal of Management Science and Applications,2018,3(4):340-352.
- [11] 石季英,薛飞,李雅静,等. 基于免疫二进制萤火虫算法的主动配电网低碳目标网架规划[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(5):507-513.
- [12] 王简,王承民,朱彬若. 电力系统中的弹性、灵活性及广义柔性问题研究综述[J]. 智慧电力,2018,46(11):1-6.
- [13] 刘思. 配电网空间负荷聚类及预测方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [14] FAVUZZA S,IPPOLITO M G,MASSARO F,et al. A bottom-up approach for the evaluation of the flexible quota of aggregated loads[C]//IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering. [S. l.]:IEEE,2015:542-547.
- [15] LI H B,LU Z X,QIAO Y. Flexibility resource and demand balance mechanism in power system planning considering high penetration of renewable energy[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. [S. l.]:IEEE,2017:1-5.
- [16] FU Y M,SUN D L,WANG Y Q,et al. Multi-level load forecasting system based on power grid planning platform with integrated information [C]//Chinese Automation Congress. [S. l.]:IEEE,2017:933-938.
- [17] 唐昊,刘畅,杨明,等. 考虑电网调峰需求的工业园区主动配电系统调度学习优化[J]. 自动化学报,2021,47(10):2449-2463.
- [18] 于娜,李伟蒙,黄大为,等. 计及可转移负荷的含风电场日前调度模型[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(17):61-67.
- [19] 邱亚,李鑫,魏达,等. 全钒液流电池的柔性充放电控制[J]. 储能科学与技术,2017,6(1):78-84.
- [20] BAROTE L,WEISSBACH R,TEODORESCU R. VRB modeling for storage in stand-alone wind energy systems [C]//IEEE Bucharest Power Tech Conference. [S. l.]:IEEE,2009:1-6.
- [21] 田兵,喻磊,雷金勇,等. 工业园区用户侧微电网储能运行方式与微电网的运营模式[J]. 南方电网技术,2016,10(8):48-55.

(责任编辑 张 镛)