

计及动态响应可靠性的电力负荷调度优化

钱伟强^{1,2},赵文会¹

(1. 上海电力大学 经济与管理学院,上海 200090;2. 国网上海市电力公司 浦东供电公司,上海 200122)

Power load dispatch optimization considering dynamic response reliability

QIAN Weiqiang^{1,2}, ZHAO Wenhui¹

(1. School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Pudong Power Supply Company, State Grid Shanghai Electric Power Co.,Ltd., Shanghai 200122, China)

摘要:当前,以卖方市场主导的需求响应方式具有较高的可靠性和可实施性。首先,以电网侧的利益最优为目标进行电力负荷的调度优化,为降低用户行为随机性对调度可靠性的影响,分析了不同类型电力负荷的响应可靠性模型;其次,为提升用户的响应积极性,分析了不同用户的动态响应可靠性评估模型;最后构建了调度容量可靠性最高和电网侧调度运行成本最低的调度模型,以用户的最低出清利益为约束,在提升用户响应积极性的基础上,得到电网利益最优的需求侧资源调度运行方式。算例分析验证了调度优化模型的有效性。

关键词:电力负荷;响应可靠性;调度优化;混合粒子群算法

Abstract: At present, the demand response mode dominated by the seller's market still has high reliability and enforceability. The response reliability models of different types of demand side loads are analyzed in order to reduce the impact of user behavior randomness on dispatching reliability. Dynamic response reliability evaluation models of different users are analyzed in order to improve the response enthusiasm of users. Finally, a dispatching model with the lowest operation cost and the highest reliability of dispatching capacity on the power grid side is constructed, which is constrained by the minimum clearing interests of users. The model can not only improve users' response enthusiasm, but also obtain the optimal dispatching operation mode of power grid interests. The effectiveness of the scheduling optimization model is verified by an example.

Key words: power load; response reliability; scheduling optimization; hybrid particle swarm optimization

0 引言

经济技术的高速发展引发国内用电需求的不断增长,同时,极端气候的频繁出现导致部分地区短期尖峰负荷屡创新高,因此电力系统呈现“双峰”特征^[1-2],亟需充分挖掘与发挥需求侧资源在削峰填谷、缓解电力供需矛盾、推进清洁能源消纳方面的作用^[3-4]。与此同时,“碳中和、碳达峰”目标的提出为能源行业的绿色发展指明了方向,同时也提出了新的挑战^[5-6]。在传统电力业务系统中,用户侧作为电能使用的末端环节,具备较大的用能结构优化潜力。而信息技术和智能设备的发展也为用户侧能源的监控、调度及优化提供了技术可能^[7-8]。新形势下,电力需求侧管理的作用愈加凸显,同时为更好地助力“双碳”目标的实现,需求侧用能优化

的市场策略、技术策略也有待深入研究。

针对需求侧的负荷调度优化,有较多文献针对不同的优化目标展开了研究^[9-18]。文献[9-14]的优化目标主要集中在利益博弈、优化能效、缩减成本等方面,缺少对实际调度中用户响应效果这一因素的考量;文献[15-17]针对用户侧的响应行为建立了评估模型,但仅停留在评估阶段,没有将评估结果应用于调度策略的优化;文献[17-18]研究了响应稳定度这一因素,但仅考虑了对用户侧的收益影响,没有兼顾电网侧的调度成效。

综上所述,当前研究在对电力负荷进行调度优化的过程中,未兼顾电力负荷的响应稳定性和用户参与的可靠性。本文将在降低电力负荷调度成本的策略下,分析不同响应性质负荷的响应可靠性和不同用户的动态响应可靠性,建立兼顾调度成本和电力负荷响应可靠性的负荷调度模型;采用PSO-DE优化算法对模型进行求解;最后通过算例仿真验证了该调度模型能有效降低调度成本,提升响应可靠性。

收稿日期:2023-04-21;修回日期:2023-06-16

基金项目:国家社科基金面上项目(20BJL036);教育部人文社会科学基金项目(18YJAZH138)

1 电力负荷调度策略研究

1.1 不同主体目标下的电力负荷调度策略

电力负荷不同的调度模式涉及目标、对象、方式等要素。根据主体利益的不同,负荷侧的优化目标可分为3类:社会效益、售电侧效益和用电侧利益。

(1) 以社会效益最优为目标

将用电用户、发电企业以及电网公司看作一个系统整体,将系统中用电负荷的损耗费用、系统向大电网买电的购电成本、系统中发电单元的运行维护成本、发电单元的燃料成本、发电的单元的排污成本之和的总费用最优作为优化目标^[19]。

(2) 以售电侧利益最大化为目标

以电网运营损耗与电力公司购电费用最优为优化目标,通过合理调节各单元的出力与综合考虑电力公司向电网以及用户需求侧资源的购电费用,使电力公司以最小的成本满足用户的用电负荷需求^[20]。

(3) 以用户侧利益最大化为目标

电力用户是电网中需求侧资源的直接提供者,在需求响应实施的过程中,电力用户的经济利益直接影响需求侧资源的可调度容量大小以及可调度容量的可靠性。以电力用户利益最大化为目标的负荷控制方式的目标函数主要由用户用电费用组成。通过合理调节响应时段的负荷开断,并综合考虑响应时段内的用户缺电成本,使得电力用户能够以最小的成本满足自身的用电需求,从而降低其对电网的负荷需求。

当前,社会效益最优是需求响应的理想发展方向,但由于该模式无法体现不同利益相关者之间的利益分配关系,在现行供电关系中较难实现。而售电侧与用户侧的利益在实际需求响应中应用较多,考虑到用户主体的分散性和不确定性,目前以卖方主导的电力市场模式更易于实施。

1.2 不同时间尺度下的电力负荷调度策略

根据时间尺度的不同,负荷侧的调度方式需可分为日前调度和实时调度两种。

(1) 日前调度方式

此方式即电力市场概念中的中长期合约。通过建立较长的调度优化周期,基于负荷预测的负荷分解,确定每个调度时段的约定响应容量和响应结算方式^[21-22],用户按照事先约定的响应条件安排电能出让,较为可靠地实现电网负荷的供需平衡。

(2) 实时调度方式

实时调度方式即电力市场概念中的现货市场。基于发电侧准确的发电机组出力预测和用户侧对金融信号的高度响应,完成用户侧的电能实时

出让,从而实现电力供需的实时平衡^[23]。

当前,考虑到售电侧行为的随机性,从电网运行可靠性的要求来看,日前调度的稳定性较高,更易于实施。

1.3 电网侧效益主导的负荷调度模式

本文提出的需求响应的优化策略主要针对我国电力需求响应的邀约型削峰填谷响应方式,基于约定时间、约定容量,在政策引导和补贴激励的措施下实行单用户的自主调控。在该模式下,本文构建政策层、技术层、实施层的3层级参与模式,并针对政策层的调度优化模式展开了具体研究,运行模式如图1所示。

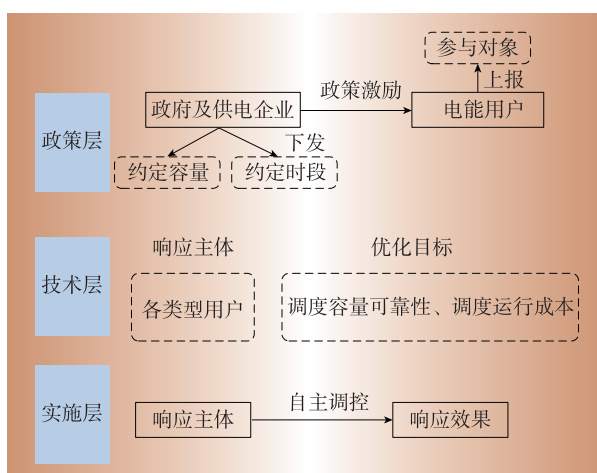


图1 多层级的电力负荷优化模式

Fig. 1 Multi-level demand side load optimization model

政策层的过程主要是电网通过预测分析将需求响应容量及响应时段下发,然后以单位用户整体为对象进行负荷响应,结合约定式或激励式的政策手段引导用户在响应时段内削减用能,实现负荷优化。本文主要针对技术层的调度优化模型展开研究,以电网侧的利益最优为目标进行电力负荷的分配调度,兼顾电网侧调度运行成本和调度容量可靠性,以用户的最低出清利益为约束,在提升用户响应积极性的基础上,得到电网利益最优的需求侧资源调度运行方式。

政策层以电网公司为主导,主要是根据电网负荷水平制定响应的政策框架;技术层需电力公司和用户共同参与,在政策层的框架下根据各自的利益目标,确定响应的具体策略;实施层以用户为主导,用户依据策略根据实际情况实施响应。同时实施层的实施情况又将反馈给政策层与技术层,3个流程之间形成动态反馈,使整个响应过程得到优化。

2 电力负荷响应可靠性分析

2.1 面向响应性质

根据用电方式和响应行为的不同,用电侧的需

求响应负荷分为可中断负荷、可转移负荷、可削减负荷。不同响应类型的负荷因其响应特征的不同具备不同的响应可靠性。

(1) 可中断负荷

可中断负荷主要指关断式响应负荷,该类负荷仅存在开启/关闭两种状态,用户通过关闭该类负荷来实行需求响应。对于部分大功耗负荷,可中断负荷的响应容量较高,但由于直接关断对用户的用电习惯变化较大,自主响应性不强。用户侧的可中断负荷主要包括照明、动力系统等。

(2) 可转移负荷

可转移负荷主要指储热/储能式响应负荷,在理想状态下,可将电网高峰时段的负荷转移至低谷时段,是较为理想的电力负荷。受用户用电行为的惯性和改变行为的遗忘性影响,该类负荷的响应随机性较强。用户侧的可转移负荷主要包括电动汽车、储热式热水器等负荷。

(3) 可削减负荷

可削减负荷主要指范围调控式负荷,用户可根据喜好在一定范围内对该类负荷的功耗进行调控。由于用户的舒适度存在一定区间约束,此类负荷响应容量较小,但由于其舒适性的保证,负荷自主响应性较强。用户侧的可转移负荷主要包括空调、即热式热水器等。

根据以上特性,引入响应比重、削峰贡献度、遗忘因子的概念,建立各类负荷的响应可靠性系数模型。不同用户的用电习惯、响应习惯不同,根据用户用电特征和历史响应行为分析,引入遗忘因子,指征不同用户在响应过程中延迟响应或无响应的水平系数。

$$\begin{cases} \lambda_{Xi} = \frac{\theta_{Xi}\beta_{Xi}}{\alpha_{Xi}}, & X \in \{A, B, C\} \\ \theta_{Xi} = P_{Xi}/P_i \\ \beta_{Xi} = P_{Ei}/P_{fi} \end{cases} \quad (1)$$

式中:A、B、C分别为可中断负荷、可转移负荷、可削减负荷; λ_{Xi} 为用户*i*的*X*类负荷的可靠性系数; θ_{Xi} 为用户*i*的*X*类负荷的响应比重; β_{Xi} 为用户*i*的*X*类负荷的削峰贡献度; α_{Xi} 为用户*i*的*X*类负荷的遗忘因子; P_i 、 P_{fi} 分别为用户*i*的响应日总响应负荷和高峰时段响应负荷; P_{Xi} 、 P_{Ei} 分别为用户*i*的*X*类负荷响应日总响应负荷和高峰时段响应负荷。

2.2 面向响应用户

用户的响应可靠性指征的是用户在同期签约用户中的响应行为排名,主要指征指标为响应负荷占比、高峰时段响应负荷占比和实际响应容量完成率。

(1) 响应负荷占比

响应负荷占比表征该用户上次响应日内的响

应负荷在同期用户中的响应容量占比,表示如下

$$x_{1i} = P_i / \sum P_i \quad (2)$$

式中: P_i 为该次响应中用户*i*的响应容量。

(2) 峰时段响应负荷占比

峰时段响应负荷占比表征该用户上次响应日内的峰时段峰时段响应负荷在同期用户中的峰时段响应容量占比,表示如下

$$x_{2i} = P_{fi} / \sum P_{fi} \quad (3)$$

式中: P_{fi} 为该次响应中用户*i*的峰时段响应容量。

(3) 实际响应容量完成率

实际响应容量完成率表征该用户上次响应日内响应容量与上报响应容量的比值,表示如下

$$x_{3i} = P_i / P_{Si} \quad (4)$$

式中: P_{Si} 为该次响应中用户*i*的*X*类负荷的签约容量。

根据以上评估指标,结合3类负荷的可靠性系数,建立用户的动态响应可靠性计算模型,表示如下

$$\lambda_i = \frac{\lambda_{Ai}P_{Ai} + \lambda_{Bi}P_{Bi} + \lambda_{Ci}P_{Ci}}{(P_{Ai} + P_{Bi} + P_{Ci})/100} x_{1i}x_{2i}x_{3i} \quad (5)$$

3 计及响应可靠性的负荷调度模型

3.1 优化目标

根据用户的动态响应可靠性模型,以需求响应实施后响应可靠度最优和调度成本最低为负荷优化的目标函数。响应可靠度最优的优化目标函数为

$$F = \max \sum_{i=1}^N \lambda_i P_i \quad (6)$$

式中: i 为响应用户编号, $i=1,2,\dots,N$; λ_i 为用户*i*响应日内的响应可靠性。

为进一步提升用户提升响应可靠性的自主性,除了技术层面的实际调度负荷量以可靠性最优为目标外,在经济层面也可设置联动的交易价格政策,对高于约定响应容量的部分进一步提升补贴额度的方式,提升自主响应积极性。同时,基于电网侧的利益,建立兼顾调度成本的优化模型。调度成本最低的优化目标函数为

$$S = \min \sum_{i=1}^N C_i \quad (7)$$

$$C_i = \begin{cases} \omega_1 P_i & P_i < P_{Yi} \\ \omega_1 P_{Yi} + \omega_2 (P_i - P_{Yi}) & P_i \geq P_{Yi} \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_i 为用户*i*响应日内的调度费用; P_i 为用户*i*响应日内的实际调度负荷量; P_{Yi} 为用户*i*响应日约定的响应容量; ω_1 为低于约定响应容量部分的调度交易价格; ω_2 为高于约定响应容量部分的调度交易价格。

3.2 约束条件

(1) 总削减容量约束

在单位响应日内, N 个用户的总调度负荷量之和为

$$P_{DR} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (9)$$

式中: P_{DR} 为单位响应日内要求的负荷总削减量。

(2) 用户自主响应能力约束

不同用户的用电行为不一样,其负荷优化潜力以及对用电舒适度的标准也不一致,因此在进行调度负荷优化中,充分考虑用户自身的用电需求,根据用户主动上报的各类负荷削减范围,对用户的各类负荷响应量进行约束,表示如下

$$0 \leq P_i \leq (P_{Ai, \max} + P_{Bi, \max} + P_{Ci, \max}) \quad (10)$$

式中: P_{Ai} 、 P_{Bi} 、 P_{Ci} 分别为单位响应日内用户 i 的可中断负荷、可削减负荷、可转移负荷的实际调度负荷量。

3.3 求解算法

上述模型是个多目标模型,模型各目标之间通过决策变量相互联系、相互制约,单目标下的目标优化是以其他目标的劣化为代价的,考虑到算法的收敛性问题,本文将两个目标按权重系数进行归并,转化为单目标模型,采用 PSO-DE 混合算法对优化模型进行求解,种群中的粒子为各用户单位响应时段内的调度负荷 P_i 。

在模型参数初始化中,设置种群规模 $S=200$;最大迭代次数 $G_{\max}=300$;学习因子 $c_1=c_2=2.05$;惯性因子 $W_{\max}=1.2$ 、 $W_{\min}=0.8$;控制因子 $L=3$;缩放因子 $F_{\max}=0.9$ 、 $F_{\min}=0.2$;变异概率 $C_{R\max}=0.9$ 、 $C_{R\min}=0.2$ 。完成输入及初始参数设置后,根据优化模型中的目标函数以及约束条件,进行 PSO-DE 算法的优化迭代,直至完成迭代过程得到最优解流程图如图 2 所示。

4 实施案例

4.1 算例数据

以某区域电网的 6 个需求响应参与用户作为算例数据,验证上述优化模型的有效性。根据负荷预测和需求响应用户的上报信息,该区域响应日的总调度容量定为 $Q_{DR}=1\ 000$ kWh;需求响应时段设置为 08:00—22:00,电网峰时段设置为 10:00—15:00;需求响应签约价格分别为 $\omega_1=0.463$ 、 $\omega_2=0.555$;用户自主上报的各类型负荷响应能力数据如表 1 所示。

根据用户历史响应情况的统计和调研数据,由式(1)计算各类响应负荷的响应可靠性系数,如表 2 所示。

根据式(4)计算各用户的响应可靠性系数,如表 3 所示。

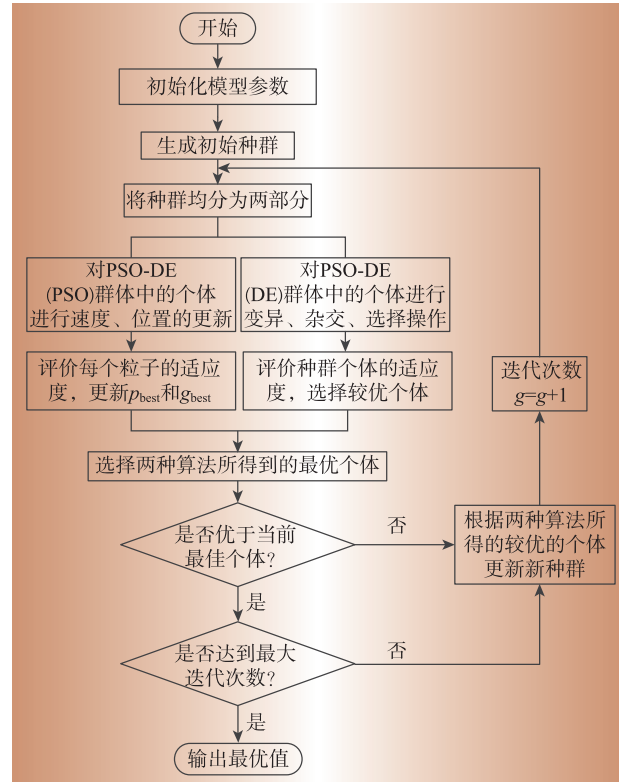


图 2 基于 PSO-DE 优化算法的求解过程

Fig. 2 Solution process based on PSO-DE optimization algorithm

表 1 用户各类型负荷响应能力

Table 1 Load response capacity of different users

kW			
序号	P_A	P_B	P_C
用户 1	[60,80]	[80,120]	[50,60]
用户 2	[80,100]	[80,120]	[25,40]
用户 3	[60,120]	[80,100]	[40,60]
用户 4	[50,100]	[90,120]	[60,80]
用户 5	[40,80]	[80,120]	[50,60]
用户 6	[80,100]	[80,120]	[45,50]

表 2 各类响应负荷的响应可靠性系数

Table 2 Response reliability coefficient of all types of response loads

可靠性	λ_{A1}	λ_{A2}	λ_{A3}	λ_{A4}	λ_{A5}	λ_{A6}
取值	0.150	0.100	0.075	0.281	0.300	0.094
可靠性	λ_{B1}	λ_{B2}	λ_{B3}	λ_{B4}	λ_{B5}	λ_{B6}
取值	0.500	0.360	0.400	0.200	0.240	0.315
可靠性	λ_{C1}	λ_{C2}	λ_{C3}	λ_{C4}	λ_{C5}	λ_{C6}
取值	0.600	1.400	1.200	1.050	0.400	1.500

表 3 各用户的响应可靠性系数

Table 3 Response reliability coefficient for each user

可靠性	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
取值	2.097 6	1.327 9	1.819 1	2.278 4	0.123 9	2.098 4

故该算例中的优化模型可表示如下

$$g = \max(2.0976P_1 + 1.3279P_2 + 1.8191P_3 + 2.2784P_4 + 0.1239P_5 + 2.0984P_6) \quad (11)$$

$$h = \min \begin{cases} 0.463P_i & P_i < P_{Si} \\ 0.463P_{Si} + 0.555(P_i - P_{Si}) & P_i \geq P_{Si} \end{cases} \quad (12)$$

s.t. $\sum_{i=1}^6 P_i = 1000$

$$190 \leq P_1 \leq 260, 185 \leq P_2 \leq 260, 180 \leq P_3 \leq 280, 200 \leq P_4 \leq 300, 170 \leq P_5 \leq 260, 205 \leq P_6 \leq 270 \quad (13)$$

4.2 优化结果分析式

根据式(11)一式(13)的优化模型,通过PSO-DE算法求解,得到实际的负荷调度方案,如表4所示。

表4 电力负荷调度优化结果

Table 4 Optimization results of demand side load dispatching

序号	调度负荷量/kW	该次响应可靠性系数	该次调度成本/元
用户1	190	398.544 0	87.97
用户2	190	252.295 7	87.97
用户3	180	327.442 5	83.34
用户4	200	455.675 0	92.60
用户5	40	4.95488 0	18.52
用户6	200	419.670 0	92.60
总计	1000	398.544 0	463.00

由表4可知,按照优化模型的计算结果进行负荷定量削减后,尽管存在某些单个建筑响应可靠性降低的情况,但区域内整体用户的响应可靠性得到了提升。

以本次数据为初始,计算连续5个响应日的优化模型数据,用户的各响应日的响应可靠性系数如图3所示,响应负荷如图4所示。

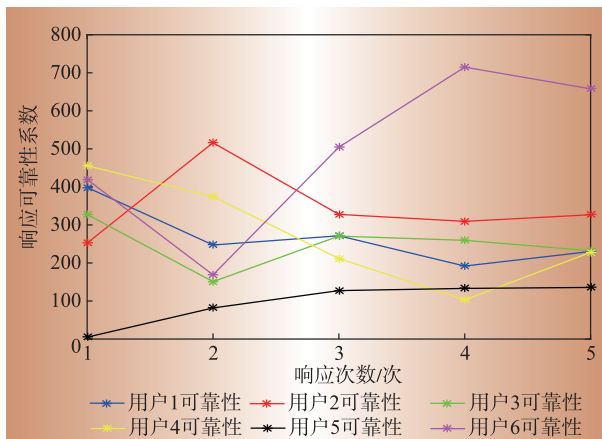


图3 各响应日的用户响应可靠性

Fig. 3 Users' response reliability on each response day

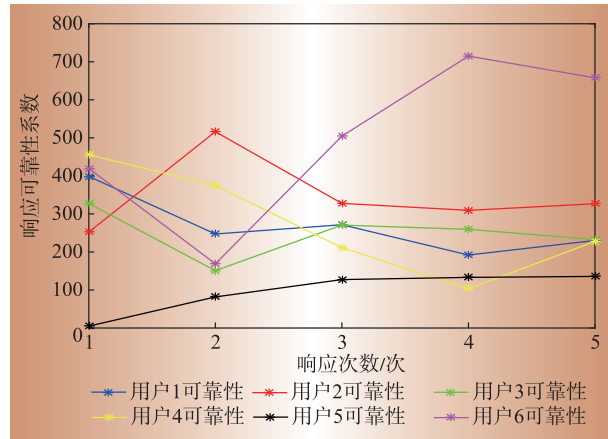


图4 各响应日的用户响应负荷

Fig. 4 Users' response load on each response day

由图3、图4可知,该优化模型不仅能在可靠性较高的情况下达到总削减容量要求,提升电网侧的综合效益,还能进一步提升区域内响应积极性不高的用户的响应可靠性,通过利益博弈优化响应行为,验证了电力负荷调度优化模型的有效性。

某个响应日未采用本文的优化计算结果,从停复役操作的角度选择响应用户,在该实例中,各用户的调度成本如表5所示。

表5 某响应日随机确定用户响应容量时的调度成本

Table 5 Scheduling costs when users' response capacity is randomly determined on a response day

序号	调度负荷量/kW	该次调度成本/元
用户1	300	142.58
用户2	350	170.33
用户3	350	168.49
用户4	0	0
用户5	0	0
用户6	0	0
总计	1000	481.40

经表4、表5对比显示,该优化模型可有效优化电网侧的需求响应调度成本。

目前,在优化模型的求解过程中,粒子群算法应用最为广泛,为验证改进后的PSO-DE混合算法相比原本PSO算法的优越性,根据同一组试验数据对两种算法进行收敛性对比,如图5所示。

对于同一初始种群的PSO-DE算法和PSO算法进行计算相比,虽然PSO算法的收敛速度大于PSO-DE混合算法,但PSO容易得陷入局部最优,而PSO-DE混合算法更易得到全局最优解。

5 结束语

需求侧资源参与调度,对平衡电网尖峰负荷,

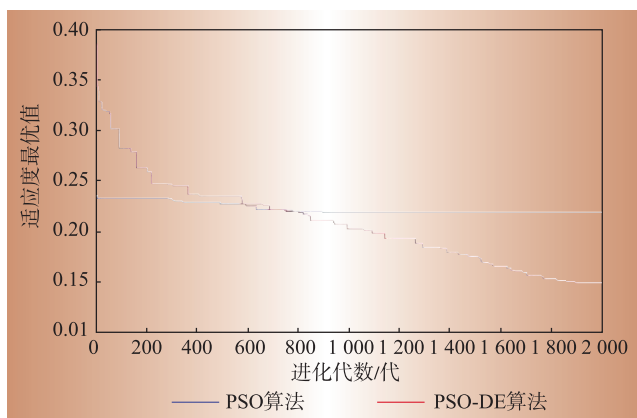


图5 PSO-DE算法与PSO算法的收敛对比

Fig. 5 Comparison of convergence between PSO-DE algorithm and PSO algorithm

助力“双碳”目标的实现具有重要意义。以售电侧效益为主导的市场化调度模型在实际的需求响应模式中更为可靠,本文基于用户侧不同性质的需求侧资源,建立各类型负荷的响应可靠性系数模型;考虑不同用户的用电行为差异,建立兼顾动态响应效果的响应可靠性模型;基于需求侧资源的响应可靠性,建立以响应可靠性和调度成本最优为优化目标,以满足总负荷响应容量和符合用户响应能力为约束的调度优化模型;同时,采用PSO-DE混合算法进行优化模型求解,并通过算例仿真计算验证了本章所建立的调度优化模型的对于提升响应可靠性、优化调度成本的有效性。该模型不仅可以使高峰时段的削减容量以较高的可信度完成响应,也为电网的需求侧调度模式提供了更优决策。D

参考文献:

- [1] 唐杰,吕林,叶勇,等.多时间尺度下主动配电网源-储-荷协调经济调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):53-64.
TANG Jie, LYU Lin, YE Yong, et al. Source-storage-load coordinated economic dispatch of an active distribution network under multiple time scales [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20):53-64.
- [2] 李鹏,王世谦,谢安邦,等.碳中和目标下基于需求响应的用户特性优化研究[J].电测与仪表,2021,58(11):23-31.
LI Peng, WANG Shiqian, XIE Anbang, et al. Research on optimization of user characteristics based on demand response under carbon neutral goal [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11):23-31.
- [3] 王宣元,高洪超,张浩,等.面向新型电力系统的灵活

资源聚合技术应用场景分析及建设启示[J].电力需求侧管理,2022,24(1):73-80.

WANG Xuanyuan, GAO Hongchao, ZHANG Hao, et al. Analysis and enlightenment of aggregation technology application scenarios of flexible distributed energy resources oriented to new power system [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(1):73-80.

- [4] 王清,李琮琮,刘松,等.基于电力市场交易规则的最优用能策略研究[J].电网与清洁能源,2021,37(10):1-7.

WANG Qing, LI Congcong, LIU Song, et al. Research on optimal energy consumption strategy based on transaction rules of electricity market [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(10):1-7.

- [5] 甘海庆,任禹丞,齐路,等.考虑电力市场机制下的客户侧储能参与需求响应控制策略[J].电力需求侧管理,2022,24(1):81-86.

GAN Haiqing, REN Yucheng, QI Lu, et al. Customer side energy storage participating in demand response control strategy under power market mechanism [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(1):81-86.

- [6] 高赐威,曹家诚,吕冉,等.基于主从博弈的虚拟电厂内部购售电价格制定方法[J].电力需求侧管理,2021,23(6):8-14.

GAO Ciwei, CAO Jiacheng, LYU Ran, et al. Method for determining the internal price of virtual power plant based on stackelberg game theory [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(6):8-14.

- [7] 李鹏,吴迪凡,李雨薇,等.基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J].中国电机工程学报,2021,41(4):1307-1321,1538.

LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and stackelberg game [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4):1307-1321, 1538.

- [8] 张涛,郭玥彤,李逸鸿,等.计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):52-61.

ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1):52-61.

- [9] 高雪倩,刘文霞.计及可靠性价值的综合能源系统设备优化配置[J].电力自动化设备,2022,42(3):9-17,52.

GAO Xueqian, LIU Wenxia. Optimal configuration of integrated energy system equipment considering reliability value [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3):9-17, 52.

- [10] 李政洁,撤奥洋,周生奇,等.计及综合需求响应的综合能源系统优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(21):36-42.

- LI Zhengjie, HAN Aoyang, ZHOU Shengqi, et al. Optimization of an integrated energy system considering integrated demand response [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(21):36-42.
- [11] 胡洁,李培强,林仕满,等.考虑分时电价差异性和基于主从博弈的智能楼宇集群能量共享方法[J].*电网技术*,2021,45(12):4 738-4 750.
- HU Jie, LI Peiqiang, LIN Shiman, et al. Energy-sharing method for smart building clusters considering differences of time-of-use prices and based on master-slave game[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12):4 738-4 750.
- [12] 张浩,王宣元,宁卜,等.考虑响应稳定度的峰谷型售电套餐决策方法[J].*电气传动*,2022,52(19):68-74.
- ZHANG Hao, WANG Xuanyuan, NING Bo, et al. A decision-making method for peak-valley power electricity package considering response stability [J]. *Electric Drive*, 2022, 52(19):68-74.
- [13] 程杉,尚冬冬,代江,等.考虑需求侧响应的电气设备调度混合分散式优化[J].*工程科学与技术*,2021,53(6):235-243.
- CHENG Shan, SHANG Dongdong, DAI Jiang, et al. Hybrid decentralized optimization of dispatching electrical units with consideration of demand-side response [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(6):235-243.
- [14] 张晓东,艾欣,潘玺安.考虑用户可调度潜力的负荷聚合商优化调度策略[J].*华北电力大学学报(自然科学版)*,2023,50(1):28-37,47,127-130.
- ZHANG Xiaodong, AI Xin, PAN Xi'an. Optimal scheduling strategy of load aggregators considering user's scheduling potential[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2023, 50(1):28-37, 47, 127-130.
- [15] 代怡重,王晓晶,葛宽宽,等.考虑用户满意度的热电储系统日前优化调度[J].*水力发电*,2021,47(12):92-97,105.
- DAI Yizhong, WANG Xiaojing, GE Kuankuan, et al. Day-ahead optimization scheduling of thermoelectric storage system considering user satisfaction [J]. *Water Power*, 2021, 47(12):92-97, 105.
- [16] 蔡浩,黄博,高赐威,等.考虑用户用电效用的售电公司交易联合优化策略[J].*电力需求侧管理*,2021,23(6):31-36.
- CAI Hao, HUANG Bo, GAO Ciwei, et al. Joint optimization strategy for electricity retailers' transaction considering the utility of users' electricity consumption[J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(6):31-36.
- [17] 李飞,梁宝全,张旭东,等.面向电动汽车快充站服务效率的自适应动态激励机制[J].*电力自动化设备*,2022,42(2):48-55.
- LI Fei, LIANG Baoquan, ZHANG Xudong, et al. Adaptive dynamic incentive mechanism for service efficiency of EV fast charging station [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(2):48-55.
- [18] 刘鑫,吴红斌,王鲸杰,等.市场环境下考虑需求响应的虚拟电厂经济调度[J].*中国电力*,2020,53(9):172-180.
- LIU Xin, WU Hongbin, WANG Jingjie, et al. Economic dispatch of a virtual power plant considering demand response in electricity market environment [J]. *Electric Power*, 2020, 53(9):172-180.
- [19] 马燕峰,谢家荣,赵书强,等.考虑园区综合能源系统接入的主动配电网多目标优化调度[J].*电力系统自动化*,2022,46(13):53-61.
- MA Yanfeng, XIE Jiarong, ZHAO Shuqiang, et al. Multi-objective optimal dispatching for active distribution network considering park-level integrated energy system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(13):53-61.
- [20] 孙媛媛,程凯强,许庆桑,等.考虑光伏出力相关性的主动配电网薄弱环节识别[J].*电力系统自动化*,2022,46(15):96-103.
- SUN Yuanyuan, CHENG Kaiqiang, XU Qingshen, et al. Identification of weak link for active distribution network considering correlation of photovoltaic output [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(15):96-103.
- [21] 刘敦楠,王玲湘,汪伟业,等.基于深度强化学习的大规模电动汽车充换电负荷优化调度[J].*电力系统自动化*,2022,46(4):36-46.
- LIU Dunnan, WANG Lingxiang, WANG Weiye, et al. Optimal scheduling of electric vehicle load for large-scale battery charging and swapping based on deep reinforcement learning [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(4):36-46.
- [22] 倪识远,张林垚.考虑动态重构的主动配电网多目标双层优化调度方法[J].*电力系统保护与控制*,2020,48(20):38-47.
- NI Shiyuan, ZHANG Linyao. Multi-objective bi-level optimal dispatch method of an active distribution network considering dynamic reconfigurations [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(20):38-47.
- [23] 赵晶晶,朱炯达,李振坤,等.考虑灵活性供需鲁棒平衡的两阶段配电网日内分布式优化调度[J].*电力系统自动化*,2022,46(16):61-71.
- ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LI Zhenkun, et al. Two-stage intraday distributed optimal dispatch for distribution network considering robust balance between flexibility supply and demand[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(16):61-71.

作者简介:

钱伟强(1992),男,上海人,工程师,主要从事电网运维检修工作。

(责任编辑 水 鹤)