

面向电网规划的重点需求侧资源响应潜力评估方法

张新¹, 岳园园², 曾好³, 王辉², 李涛³, 王主丁^{1, 3}

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆市 400044; 2. 国网陕西省电力有限公司经济技术研究院, 陕西省西安市 710075;

3. 重庆星能电气有限公司, 重庆市 400039)

摘要: 针对电网规划中需求响应(DR)对负荷预测的影响,基于包括用户可调节能力和响应度的DR特性,提出一种可操作性较强的DR潜力测算方法。首先,提出了电网规划中DR潜力评估的总体思路;其次,采用四象限法对影响DR潜力的可调节能力和响应度等重要因素进行分析,以确定近期和未来的重点需求侧资源;然后,提出重点需求侧资源参与激励型DR的削峰与填谷响应潜力评估方法,将大数据应用于采暖和降温负荷、工业负荷等需求侧资源(如可调节系数和负荷准线);最后,采用文中方法对某区域电网未来年份的DR潜力进行了评估。

关键词: 电网规划; 需求响应; 潜力评估; 可调节系数; 负荷准线

0 引言

随着需求响应(demand response, DR)措施的深入开展,如何在电网规划中考虑DR的影响是实现电网高质量发展的一个重要考量。DR作为需求侧管理中的一项措施,通过价格信号和激励机制来充分发挥需求侧资源的作用,涉及削峰填谷、平抑可再生能源波动和提高电能使用效率^[1]。电网规划是根据电网目前存在的问题和资源预测确定合理的电网改造建设方案,其中的资源预测涉及具有不确定性的DR潜力估算,即用户负荷总量中的一部分负荷通过改变工作班制和出力大小以及采用储能等手段进行合理优化后的负荷调整量。为避免电网规划与运行的脱节,应将需求侧资源作为新型电力系统的资源纳入规划,在对需求侧资源的特性、潜力和成本进行评估的基础上优化电网改造建设方案。因此,考虑DR对电网净负荷和相应规划方案的影响,具有重要的研究意义和现实意义。

目前,已有众多文献分别基于需求弹性、消费者心理学^[2]、经济学效用函数^[3]、统计学原理等对用户响应行为的建模进行了分析^[4]。相应的DR潜力评估模型可计算不同类型的DR项目实施后的效果或者不同场景下实施DR的负荷调整能力。然而,不同类型用户的价格弹性和用电特性等数据难以获取,且这些数据受地区和时间等因素影响较大,因此

这些评估方法的实用性较低,难以在电网规划中应用。对于电网规划中考虑DR的相关研究,通常将DR视为一种不确定性的影响因素,并结合相关规划方法建立包含众多影响因素的复杂数学模型,然后采用理论上可行的数学优化算法和智能启发式算法求解^[5-9],但这些研究并非直接针对电网规划中的DR潜力进行评估,而且存在部分影响因素难以建模、计算耗时和计算不稳定等问题。因此,新型配电网规划工作迫切需要可操作性强且实用的DR潜力评估方法。

本文提出一种在电网规划中考虑需求侧资源的响应潜力评估实用方法。首先,阐述了电网规划中DR潜力评估的意义,并提出了DR潜力评估总体思路;然后,通过对影响DR潜力的可调节能力和响应度等重要因素进行分析,识别区域重点需求侧资源,如近期的采暖和降温负荷、工业负荷,以及远期的电动汽车和储能;最后,针对用户响应行为的不确定性,采用灵敏度法进行分析,即结合电网规划中的高、中、低负荷预测方案提出对应的低、中、高3种响应度的潜力测算方法,涉及预测区域近期和未来的DR潜力测算。

1 DR潜力评估总体思路

本章基于DR潜力评估对电网规划的意义及其在电网规划中的不确定性分析方法,提出了电网规划中DR潜力评估的总体思路。

1.1 DR潜力评估意义

研究显示,针对中国普遍存在的短时尖峰负

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-03-09。

上网日期: 2023-05-04。

国家自然科学基金资助项目(U2066209)。

荷需求(如某省年95%以上的尖峰负荷持续时间仅为50.75 h,仅占全年8 760 h的0.579%),在供给侧建设调峰电厂和配套电网的投资成本高达约1万元/kW,而在需求侧开展DR削减尖峰负荷的投资成本仅为前者的14%~20%^[10]。可见,采取DR解决短时用电需求可以在有效解决供需矛盾的同时,大大减少全社会整体投资。因此,计及DR的电网规划的重点不在于DR的成本(如中断负荷补偿费用)多少,而应关注DR措施对负荷调节能力的大小,从而在传统负荷预测基础上考虑DR可能存在的实施效果,将由此获得的净负荷或网供负荷(主要为其最大值)用作后续电网规划的依据^[11],并使DR实施者能够经济、有效地针对用户或电网需求提出优化的DR实施策略^[12]。因此,DR潜力评估对提高电网投资效益具有重要意义,同时也有助于推动将DR作为常态化资源纳入电网规划之中。

1.2 DR潜力评估的不确定性分析方法

对于中长期负荷预测而言,由于存在较多不确定因素,无论预测模型的精度如何改进,任何相关因素的实质性改变都将导致预测结果与实际偏离较远。在实际电网规划中,通常采用灵敏度分析方法来处理负荷预测的不确定性,一般涉及高、中、低3种负荷预测方案。考虑到不同类型的用户参与DR的意愿不同,同时受通信技术、设备等因素的影响,用户的实际响应程度会存在较大的不确定性。因此,对DR潜力的预测结果也不应看作是一个固定值,而应是一个数值范围。本文据此也采用高、中、低3种方案对规划区域DR潜力进行评估,较为简洁实用。

1.3 电网规划中DR潜力评估的总体思路

DR主要分为价格型DR和激励型DR。由于价格型DR调节能力受国家相关峰谷电价政策影响,难以根据市场供需关系进行动态调整,在电网规划中可近似纳入常规负荷预测进行处理,而激励型DR对于短时削峰可看作运行优化问题,涉及电网规划与运行的互动,而且相较于价格型DR能够降低用户响应的不确定性,更好地引导用户改变用电行为^[13]。因此,本文以现行电价政策下的激励型DR为研究背景,提出了电网规划中DR潜力评估的总体思路:首先,对各类需求侧资源的用电行为特性和DR特性进行分析;其次,基于用户可调节能力和响应度识别重点需求侧资源,其中,可调节能力在本文中定义为某类型用户或负荷自身可增减或转移负荷的最大可能值,响应度则定义为负荷实际响应量占可调节能力的比例,表示在一定激励水平下,各类型用户参与DR的积极性(一般来说激励水平越高

响应度越大);最后,针对用户响应行为的不确定性,基于高、中、低3种响应度进行潜力测算。

2 重点需求侧资源识别

资源识别是潜力测算的基础,本章通过对不同领域需求侧资源的DR特性分析识别重点需求侧资源。

2.1 重点领域DR特性分析

在实际DR操作运行中,用户DR潜力的大小与不同领域负荷的可调节能力和响应度密切相关。

1) 工业领域

目前在中国,工业负荷是参与DR中最重要的—部分。工业生产负荷中,非连续性生产负荷可以通过更改生产计划等措施进行负荷削减或转移,可调节能力大、响应度较高;连续性生产负荷由于对供电可靠性要求高,负荷曲线波动不大,响应度较低,可调节能力较小。非生产性负荷虽然可调节能力较生产性负荷小,但可调节时段灵活且对供电可靠性要求不高,具有一定的可调节能力。因此,工业用户参与DR的负荷主要是非生产性负荷(主要为采暖和降温负荷)和非连续性生产负荷。

2) 建筑领域

建筑领域根据用户的特征可分为公共建筑、商业建筑和居民建筑,主要用电设备包括空调、照明、电梯等。其中,包括供热通风与空气调节系统的采暖和降温负荷可在不影响用户舒适度的情况下,通过适当调节设定温度和轮控的方式来降低峰荷^[14],具有较大的可调节能力。虽然单个用户采暖和降温负荷的可调节能力小于工业负荷,但由于负荷数量多且具有热惯性,已日渐成为DR中最受欢迎的调控资源之一^[15],且随着负荷集合商的出现,众多小用户的响应度还会得到进一步的提升。

3) 交通领域

近年来,电动汽车充电负荷不断上涨,对电网的影响也会持续攀升,需要考虑对电动汽车的充电行为进行研究和控制,以实现电网削峰填谷。根据电动汽车充电地点和充电需求紧急程度的不同,一般可将其分为目的地充电需求和紧急型充电需求^[16]。其中,前者一般发生在电动汽车驾驶的目的地(如居民小区、工作单位、商场等地的停车场),充电方式灵活,具有较大的可调节能力;后者需要在较短时间内满足其充电需求,通常采用直流快充方式,灵活性较低,可调节能力较小。

考虑到电动汽车与电网的互动主要发生在电动汽车目的地充电过程中,且目的地充电的电动汽车中又以私家车为主(电动私家车在全部电动汽车中

的占比大,可达到80%以上),本文主要考虑电动私家车目的地充电的削峰和填谷DR潜力。

4) 储能系统

储能系统兼具供蓄和快速功率调节能力,相较于电力系统传统的调度控制、需求侧管理等其他可控资源,能够在不影响各种分布式电源发电和负荷用电的情况下实现平抑波动、削峰填谷、延缓电网升级改造等目的^[17]。储能系统突破了传统响应资源自身的局限(如可调节负荷占比低和不确定性高),可调节能力大,随着相关技术进步和成本下降会更加适合参与DR。

5) 新基建

据统计,数据中心和5G基站在2025年的用电量均会达到社会总用电量的2%或以上^[18-19]。5G基站和数据中心的响应度较高,均可通过调节能耗来实现用电优化和峰谷差的降低,但在评估数据中心的DR潜力时,需要量化其在参与DR时可能出现无法满足其功能性要求的风险^[19],故本文主要考虑5G基站的DR潜力评估。虽然单个5G基站的可调节能力较小(约为1.5~1.6 kW^[18]),但随着通信网络的快速发展,5G基站的数量将会变得很庞大,总体的DR潜力不容小觑。

2.2 需求侧资源分类

通过总结国内外DR的发展现状和经验^[10],可得到需求侧管理中部分措施在不同电力市场发展阶段下对需求侧资源的利用与开发情况,如附录A表A1所示^[16,19]。基于表A1不同的市场发展阶段,并结合2.1节重点领域需求侧资源的响应特性分析,可将需求侧资源分为传统和新型两类,如图1所示。其中,在中国具有代表性的传统需求侧资源为对应冬夏两季用电高峰时段的采暖负荷和降温负荷,其比例均可占全部负荷的30%~50%;工业负荷在2020年用电量中的占比达66.96%,占据主导地位;对于具有代表性的电动汽车新型需求侧资源,根据某省充电基础设施“十四五”发展规划,2025年用电需求将达到6 740 MW,预计占该省当年最大负荷的15.5%;随着技术进步和市场开发,以用户侧储能和电动汽车为代表的众多新兴负荷参与DR的占比将不断攀升,并逐步成为参与DR的主要资源。长期来看,未来高比例新能源电力系统的需求侧资源利用规模有望达到20%以上的较高水平^[10]。

2.3 重点需求侧资源识别

基于上文分析,用户DR潜力的大小是用户可调节能力和响应度共同作用的结果。本文参考相关四象限分析法研究^[20],根据用户的可调节能力和响

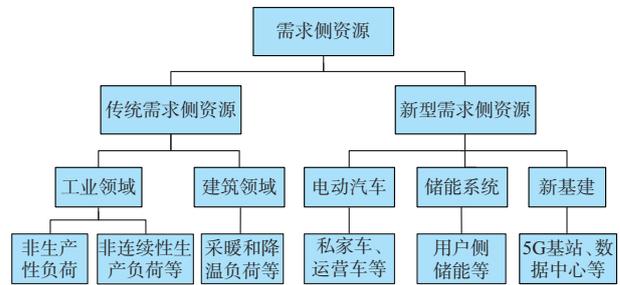


图1 传统和新型需求侧资源分类
Fig. 1 Classification of traditional and new demand-side resources

应度因素将重点领域的重点需求侧资源分为A、B、C、D四种类型,如图2所示。由图2可见,重点需求侧资源主要包括工业非连续性生产负荷、采暖和降温负荷、电动汽车和储能。其中,工业非连续性生产负荷及采暖和降温负荷等传统需求侧资源是近期开发的重点,而用户侧储能和电动汽车等不断涌现的新型资源将是未来需求侧资源开发的重点和潜力评估的主要对象。

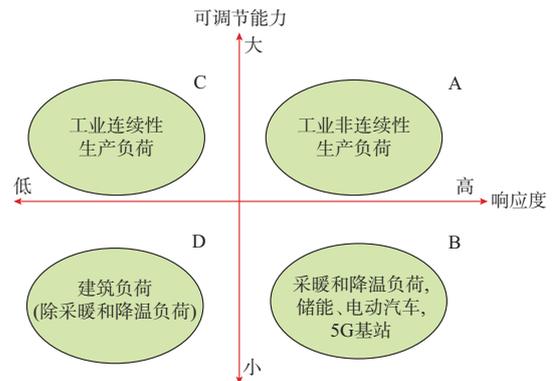


图2 基于响应特性分析的重点需求侧资源识别
Fig. 2 Identification of key demand-side resources based on response characteristic analysis

3 重点需求侧资源响应潜力测算方法

本文根据各重点需求侧资源的特点及其相关数据收集的可行性和便利性,提出了电网规划中重点需求侧资源的DR潜力测算方法。

3.1 采暖和降温负荷

1) 可调节能力

采暖和降温负荷是造成中国尖峰负荷不断增长的主要原因之一,DR潜力大。本文将春、冬季节视为采暖季,将夏、秋季节视为降温季,并基于不同季节的日负荷曲线,得到最大的采暖和降温负荷总量,即

$$\begin{cases} \Delta P_{Ts, \max, t} = P_{Ts, \max, t} - P_{Ts, \min, t} \\ \Delta P_{Tw, \max, t} = P_{Tw, \max, t} - P_{Tw, \min, t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta P_{Tw, \max, t}$ 和 $\Delta P_{Ts, \max, t}$ 分别为采暖和降温季所

有日负荷曲线中对应时刻 t 的最大值与最小值之差,即最大的采暖和降温负荷总量; $P_{T_w, \max, t}$ 和 $P_{T_w, \min, t}$ 分别为采暖季对应时刻 t 的最大负荷和最小负荷; $P_{T_s, \max, t}$ 和 $P_{T_s, \min, t}$ 分别为降温季对应时刻 t 的最大负荷和最小负荷。

考虑到采暖和降温季不同日负荷曲线对应时刻 t 的负荷差异,采用式(1)计算所得的最大采暖负荷和降温负荷出现的概率通常较小,若将其作为相应负荷的可调节能力,则通常会导致DR潜力评估过大。因此,为获得大多数情况下较为合理的最大采暖和降温负荷,本文借鉴文献[21]的思路,基于区域用户日负荷曲线分别计算采暖和降温季各时刻负荷的均方差,用来衡量和辨识相应负荷的波动情况以及大概率会出现的平均可调节程度(即平均的采暖和降温负荷分别与最大的采暖和降温负荷之比),并提出采用可调节系数来量化平均可调节程度,即

$$\begin{cases} E_w(t) = 2 \sqrt{\frac{1}{N_w} \sum_{d=1}^{N_w} [P_{w,d}^*(t) - P_{w,ave}^*(t)]^2} \\ E_s(t) = 2 \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{d=1}^{N_s} [P_{s,d}^*(t) - P_{s,ave}^*(t)]^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} P_{w,d}^*(t) = \frac{P_{w,d}(t) - P_{T_w, \min, t}}{P_{T_w, \max, t} - P_{T_w, \min, t}} \\ P_{s,d}^*(t) = \frac{P_{s,d}(t) - P_{T_s, \min, t}}{P_{T_s, \max, t} - P_{T_s, \min, t}} \\ P_{w,ave}^*(t) = \frac{1}{N_w} \sum_{d=1}^{N_w} P_{w,d}^*(t) \\ P_{s,ave}^*(t) = \frac{1}{N_s} \sum_{d=1}^{N_s} P_{s,d}^*(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_w(t)$ 和 $E_s(t)$ 分别为区域用户采暖和降温负荷在时刻 t 的可调节系数; $P_{w,d}(t)$ 和 $P_{s,d}(t)$ 分别为采暖和降温季第 d 天时刻 t 的负荷; N_w 和 N_s 分别为采暖和降温季的天数; $P_{s,d}^*(t)$ 和 $P_{w,d}^*(t)$ 分别为降温季和采暖季第 d 天时刻 t 的归一化负荷; $P_{s,ave}^*(t)$ 和 $P_{w,ave}^*(t)$ 分别为 $P_{s,d}^*(t)$ 和 $P_{w,d}^*(t)$ 在统计日期内的平均值。

某区域降温负荷及其可调节系数如附录A图A1所示。可见,在07:00—10:00和19:00—22:00时段,可调节系数保持着相对较高的水平,说明相应时段内负荷波动性较大,用户可选择不同的用电方式,平均可调节程度较大。

基于可调节系数,采暖和降温负荷的削峰可调节能力可近似表示为:

$$\begin{cases} P_{T_s, res} = \frac{1}{N_{res}} \sum_{t \in \Omega_{res}} \Delta P_{T_s, \max, t} E_s(t) \\ P_{T_w, res} = \frac{1}{N_{res}} \sum_{t \in \Omega_{res}} \Delta P_{T_w, \max, t} E_w(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{T_w, res}$ 和 $P_{T_s, res}$ 分别为采暖和降温负荷在削峰时段的平均可调节能力; Ω_{res} 为削峰时段的集合; N_{res} 为集合 Ω_{res} 中的时段数。

2) 响应度分析及取值

文献[22-23]研究了空调设定温度与节能效果之间的关系,即在人体舒适度范围内将室内空调温度设定调整 1°C ,空调系统能耗将减少 $5\% \sim 10\%$ 。本文考虑空调温度调整幅度为 $1 \sim 3^\circ\text{C}$;温度每变化 1°C 时,采暖和降温负荷的大小可分别改变 5% 和 7% 。

3) DR潜力

现阶段采暖和降温负荷只能通过削减的方式参与DR,在电网低谷时段难以参与响应。因此,本文只考虑采暖和降温负荷的削峰DR潜力,即

$$\begin{cases} \Delta P_{T_w} = \alpha_{wtemp} P_{T_w, res} \\ \Delta P_{T_s} = \alpha_{stemp} P_{T_s, res} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ΔP_{T_w} 和 ΔP_{T_s} 分别为采暖和降温负荷的DR潜力; α_{wtemp} 和 α_{stemp} 分别为采暖和降温负荷的响应度,且有 $0 \leq \alpha_{stemp} \leq 1, 0 \leq \alpha_{wtemp} \leq 1$ 。

3.2 工业负荷

借鉴文献[24-25]中负荷准线的概念,本节提出了工业负荷DR潜力测算思路和方法。

1) 可调节能力

a) 测算思路

由于工业连续性生产负荷对工业整体负荷曲线的变化特征影响较小,本文主要针对工业非连续性生产负荷,提出基于负荷准线的概念进行DR潜力测算。其中,负荷准线为工业用户参与DR的理想负荷曲线,通常为工业典型日负荷曲线的平均值水平线,准线以上和以下的负荷分别对应工业负荷的削峰和填谷可调节能力,如附录A图A2所示。

b) 削峰可调节能力

工业负荷削峰可调节能力可基于工业负荷曲线的最大值和平均值之差估算得到,即

$$P_{ind, res} = \frac{1}{N_{res}} \sum_{t \in \Omega_{res}} P_{ind, t} - P_{ind, avg} \quad (6)$$

式中: $P_{ind, res}$ 为工业负荷在削峰时段的平均可调节能力; $P_{ind, t}$ 为工业负荷曲线在时刻 t 的负荷; $P_{ind, avg}$ 为工业负荷所有时段的平均值。

若只有工业负荷的用电量数据而无负荷数据,可基于用电量和相应的最大负荷利用小时数估算出

最大负荷,然后计算出工业负荷可调节能力,即

$$P_{\text{ind, res}} = P_{\text{ind, max}} - P_{\text{ind, avg}} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} P_{\text{ind, max}} = \frac{E_{\text{ind}}}{T_{\text{ind, max}}} \\ P_{\text{ind, avg}} = \frac{E_{\text{ind}}}{8760} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{ind, max}}$ 、 $T_{\text{ind, max}}$ 和 E_{ind} 分别为某工业负荷的最大负荷、最大负荷利用小时数和年总用电量。

c) 填谷可调节能力

基于负荷准线的潜力测算思路,工业用户参与填谷DR的可调节能力为:

$$P'_{\text{ind, res}} = P_{\text{ind, avg}} - \frac{1}{N'_{\text{res}}} \sum_{t \in \Omega'_{\text{res}}} P_{\text{ind, } t} \quad (9)$$

式中: $P'_{\text{ind, res}}$ 为工业负荷在填谷时段的平均可调节能力; Ω'_{res} 为填谷响应时段的集合; N'_{res} 为集合 Ω'_{res} 中的响应时段数。

若没有 $P_{\text{ind, } t}$ 数据,可近似考虑填谷和削峰可调节能力相同。

2) 响应度分析及取值

由于不同行业的负荷特性和生产方式会导致响应能力的不同,可通过对用电比例较大且具有代表性的典型工业行业的分析,以及参考部分地区工业用户参与DR的情况,得到工业用户参与削峰和填谷DR的响应度。例如,削峰和填谷的响应度分别在30%~50%和20%~40%的范围内。

3) DR潜力

结合工业非连续性生产负荷的可调节能力和响应度可计算出其削峰和填谷DR潜力,即

$$\begin{cases} D_{\text{ind}} = \alpha_{\text{ind}} P_{\text{ind, res}} \\ D_{\text{ind, fill}} = \alpha_{\text{ind, fill}} P'_{\text{ind, res}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: D_{ind} 和 $D_{\text{ind, fill}}$ 分别为工业用户的削峰和填谷DR潜力; α_{ind} 和 $\alpha_{\text{ind, fill}}$ 分别为工业负荷的削峰和填谷响应度,且有 $0 \leq \alpha_{\text{ind}} \leq 1$, $0 \leq \alpha_{\text{ind, fill}} \leq 1$ 。

3.3 电动汽车充电负荷

电动汽车可通过有序充放电控制实现对电网基础负荷的削峰填谷。

1) 电动汽车充电负荷预测

首先,通过可获得基础数据(如电动汽车销售量占比和电动汽车渗透率指标等)的趋势分析,预测不同类型电动汽车数量以及不同充电设施上不同类型电动汽车数量^[26];然后,基于现有研究成果得到等效的单辆电动私家车日充电负荷曲线^[27];最后,将不同功能区的单辆私家车日充电曲线乘以对应电动汽车数量后累加得到区域充电负荷曲线,即

$$P_{\text{ev, } t} = n_v \lambda_1 \lambda_2 (r_{\text{re}} P_{\text{re, } t} + r_{\text{wo}} P_{\text{wo, } t} + r_{\text{bu}} P_{\text{bu, } t}) \quad (11)$$

式中: $P_{\text{ev, } t}$ 为区域电动私家车在时刻 t 的充电功率; n_v 为区域内汽车总量; λ_1 为电动汽车占汽车总量的比例; λ_2 为电动私家车占电动汽车总数的比例; r_{re} 、 r_{wo} 、 r_{bu} 分别为电动私家车前往居住区、工作区、商业区进行充电的比例(如可分别取0.70、0.10、0.05); $P_{\text{re, } t}$ 、 $P_{\text{wo, } t}$ 、 $P_{\text{bu, } t}$ 分别为单辆电动私家车在居住区、工作区、商业区时刻 t 的充电功率(见附录A图A3所示的曲线^[27])。

2) 可调节能力

本文考虑响应时段的平均充电负荷为其可调节能力,即

$$P_{\text{ev, res}} = \frac{1}{N_{\text{res}}} \sum_{t \in \Omega_{\text{res}}} P_{\text{ev, } t} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{ev, res}}$ 为电动汽车可调节能力。

3) 响应度分析及取值

电动汽车充电负荷可通过参与激励型DR实现对电网负荷的调节,但具有较高的不确定性。因此,可基于实际情况的调研、预测或展望来近似测算电动汽车的响应度,如削峰的响应程度可考虑在20%~60%的范围内。

4) DR潜力

结合电动汽车的可调节能力和响应度可估算出其削峰和填谷DR潜力。

a) 削峰DR潜力如下:

$$D_{\text{ev}} = \alpha_{\text{ev}} P_{\text{ev, res}} \quad (13)$$

式中: D_{ev} 为电动汽车充电负荷的削峰DR潜力; α_{ev} 为电动汽车充电负荷响应度(不考虑电动汽车并网情况下 $0 \leq \alpha_{\text{ev}} \leq 1$)。

b) 填谷DR潜力。本文近似将电动汽车的填谷DR潜力考虑为与削峰DR潜力相等,即

$$D_{\text{ev, fill}} = D_{\text{ev}} \quad (14)$$

式中: $D_{\text{ev, fill}}$ 为电动汽车的填谷DR潜力。

3.4 储能系统

储能系统凭借其调节灵活的优势,在DR中起到了重要作用。

1) 可调节能力

储能系统可通过不同充放电策略实现近似相同的削峰效果,即储能系统出力具有相对的确定性。因此,储能可近似以其最大容量响应电网的削峰填谷需求。区域用户参与DR的储能总容量可表示为:

$$P_{\text{ess}} = \beta \gamma \sigma P_{\text{max}} \quad (15)$$

式中: P_{ess} 为区域用户参与DR的储能总容量; β 和 γ 分别为对应储能造价下的配储用户数量占比和峰谷

差配储比例^[17]; σ 为区域用户的平均峰谷差率; P_{\max} 为区域最大负荷。

2) 响应度分析及取值

目前,配电网中的储能一般为电化学储能,响应速度快,相比其他需求侧资源响应度更高且较为稳定。可基于电化学储能的应用场景、放电深度和放电效率近似测算其响应度,如可按70%~90%的范围进行取值。

3) DR潜力

结合参与储能的可调节能力和响应度可计算出其DR潜力,即

$$D_{\text{ess}} = D_{\text{ess, fill}} = \alpha_{\text{ess}} P_{\text{ess}} \quad (16)$$

式中: D_{ess} 和 $D_{\text{ess, fill}}$ 分别为储能的削峰和填谷DR潜力; α_{ess} 为储能削峰填谷响应时段的响应度,且有 $0 \leq \alpha_{\text{ess}} \leq 1$ 。

3.5 5G基站

未来5G基站数量庞大,将具有可观的削峰调节能力。

1) 可调节能力

本文基于单个基站的调节功耗和5G基站的建设数量估算其可调节能力,即

$$P_{5G} = p_{5G} N_{5G} \quad (17)$$

式中: P_{5G} 为区域5G基站的可调节能力; p_{5G} 为单个基站的可调节功耗,如1.5 kW; N_{5G} 为区域5G基站建设的数量。

2) 响应度分析及取值

5G基站的所有权较为集中,使得基站参与DR时的调度更加快速和统一。因此,5G基站响应度明显高于常规电力用户,如可按50%~70%考虑其响应程度。

3) DR潜力

结合5G基站的可调节能力和响应度可计算出其削峰DR潜力,即

$$D_{5G} = P_{5G} \alpha_{5G} \quad (18)$$

式中: D_{5G} 为区域5G基站的削峰DR潜力; α_{5G} 为5G基站削峰响应时段的响应度。

4 算例分析

本章算例为中国某省需求侧资源的DR潜力评估及其简要分析,相应的重点需求侧资源及其响应度如表1所示。

采用本文方法,计及电动汽车和5G基站的发展以及用户侧储能造价的降低等因素,并结合某省2023年、2025年和2030年的负荷预测,对其相应年份的削峰和填谷总DR潜力进行了估算(本文总的

表1 重点需求侧资源及其响应度
Table 1 Key demand-side resources and their responsiveness

重点资源	响应度		
	高	中	低
采暖/降温负荷削峰	0.15/0.21	0.10/0.14	0.05/0.07
工业负荷削峰/填谷	0.50/0.40	0.40/0.30	0.30/0.20
电动汽车削峰或填谷	0.6	0.4	0.2
储能削峰或填谷	0.9	0.8	0.7
5G基站削峰	0.7	0.6	0.5

DR潜力仅考虑了重点资源,且近似为削峰填谷相应响应时段各重点资源DR潜力直接相加),结果如表2所示。

表2 某省DR总潜力预测结果
Table 2 Prediction results of total DR potential in a province of China

DR潜力	响应度	2023年		2025年		2030年	
		功率/MW	占比/%	功率/MW	占比/%	功率/MW	占比/%
削峰	高	3 649	11.3	5 674	13.0	10 370	19.6
	中	2 759	8.6	4 367	10.0	8 085	15.3
	低	1 870	5.8	3 059	7.0	5 794	10.9
填谷	高	1 986	6.2	3 410	7.8	7 537	14.2
	中	1 501	4.7	2 652	6.1	5 928	11.2
	低	1 016	3.2	1 894	4.4	4 318	8.1

注:表中“占比”为DR潜力占相应年份最大负荷的比例。

1) 对于采暖和降温负荷,根据式(2)计算得到的采暖和降温负荷可调节系数如附录A图A4所示,再由式(4)计算得到2020年采暖和降温负荷的可调节能力和相关占比,并基于这些占比以及负荷预测结果估算相应年份采暖和降温负荷的可调节能力。

2) 对于工业负荷,先采用式(7)和式(8)计算工业负荷的削峰和填谷可调节能力,再采用类似1)中的方法分别计算将来年份的可调节能力。

3) 基于式(11),可得如附录A图A5所示的充电负荷预测曲线,并根据式(12)计算将来年份的电动私家车响应时段的平均充电负荷(即可调节能力)。

4) 由于用户侧储能受成本和场地的限制,本文仅考虑工业用户的配储,根据式(15)求得将来年份的配储容量(即可调节能力)。

5) 经调研分析,获得将来年份5G基站的预计建成数量(分别为7万个、11万个和21万个),根据式(17)计算相应的可调节能力,并结合表1计算各重点资源的DR潜力。

经调研,截至2021年某省已储备了占最大负荷7.8%的可调节负荷资源,预计2023年储备的DR资源池总量与本文中方案预测结果较为接近,在一定程度上表明了本文方法的有效性和合理性。

本算例中响应度方案下各重点需求侧资源的DR潜力变化如附录A图A6所示。由图A6和表2可见,2030年及以前的工业负荷一直是削峰DR潜力的主要资源;在2025年及以前,工业负荷及采暖和降温负荷是DR潜力开发的关键。由于目前电动汽车总体负荷占比小和储能应用规模有限,对当前的DR潜力贡献较小,但到2030年时电动汽车与储能将达到较高的DR潜力水平,其中储能甚至将达到与传统需求侧资源相当的DR潜力水平。

5 结语

本文提出的高、中、低DR潜力测算方法简单实用,对于计及DR影响的区域电网负荷预测具有一定的参考价值。

1)针对采暖和降温负荷的DR潜力,基于本文提出的可调节系数概念和计算公式进行估算;针对工业用户削峰和填谷DR潜力,提出基于负荷准线的思想进行估算;此外,针对新兴负荷中具有一定代表性的电动汽车、储能和5G基站也给出了相应的DR潜力估算模型。

2)对某省电网近期和未来的重点需求侧资源响应潜力的计算与分析表明,本文方法所需数据的获取难度不大,可操作性较强;近期的DR潜力主要贡献为工业非连续性生产负荷及采暖和降温负荷,未来DR潜力主要贡献将包括电动汽车和储能。

3)5G基站和数据中心等数字化基础设施是潜在的灵活性资源,为在电网规划中更好地量化其DR潜力,还需要做进一步的深入研究。此外,各重点需求侧资源的响应度应根据区域DR工作开展情况进行动态调整。

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] 赵伟,熊正勇,潘艳,等.计及碳排放流的电力系统低碳规划[J].电力系统自动化,2023,47(9):23-33.
ZHAO Wei, XIONG Zhengyong, PAN Yan, et al. Low-carbon planning of power system considering carbon emission flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 23-33.
- [2] 张智晟,于道林.考虑需求响应综合影响因素的RBF-NN短期负荷预测模型[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1631-1638.
ZHANG Zhisheng, YU Daolin. RBF-NN based short-term load forecasting model considering comprehensive factors affecting demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1631-1638.
- [3] MISHRA M K, MURARI K, PARIDA S K. Demand-side management and its impact on utility and consumers through a game theoretic approach [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 140: 107995.
- [4] 黄剑平,陈皓勇,林镇佳,等.需求侧响应背景下分时电价研究与实践综述[J].电力系统保护与控制,2021,49(9):178-187.
HUANG Jianping, CHEN Haoyong, LIN Zhenjia, et al. A summary of time-of-use research and practice in a demand response environment [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 178-187.
- [5] 郭亦宗,冯斌,岳铂雄,等.负荷聚合商模式下考虑需求响应的超短期负荷预测[J].电力系统自动化,2021,45(1):79-87.
GUO Yizong, FENG Bin, YUE Boxiong, et al. Ultra-short-term load forecasting considering demand response in load aggregator mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 79-87.
- [6] MA H X, LAI L, SUN J Y. A new coordinated distribution network planning method considering demand response [C]//2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 22-24, 2021, Taiyuan, China: 1254-1259.
- [7] LIANG H S, MA J, LIN J. Robust distribution system expansion planning incorporating thermostatically-controlled-load demand response resource [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 302-313.
- [8] 刘文霞,李征洲,杨粤,等.计及需求响应不确定性的综合能源系统协同优化配置[J].电力系统自动化,2020,44(10):41-49.
LIU Wenxia, LI Zhengzhou, YANG Yue, et al. Collaborative optimal configuration for integrated energy system considering uncertainties of demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 41-49.
- [9] 刘洪,郑楠,葛少云,等.内嵌需求响应与优化运行策略的主动配电系统源网协同规划[J].电力系统自动化,2020,44(3):89-97.
LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Coordinated planning of source and network in active distribution system with demand response and optimized operation strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 89-97.
- [10] 王彩霞,时智勇,梁志峰,等.新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J].电力系统自动化,2021,45(16):37-48.
WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 37-48.
- [11] QI N, CHENG L, XU H L, et al. Smart meter data-driven evaluation of operational demand response potential of residential air conditioning loads [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115708.

- [12] WANG F, ZHOU L D, REN H, et al. Multi-objective optimization model of source-load-storage synergetic dispatch for a building energy management system based on TOU price demand response [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2): 1017-1028.
- [13] 张全明,崔晓昱,张笑弟,等.计及用户不确定性的多时段耦合需求响应激励优化策略[J].中国电机工程学报,2022,42(24): 8844-8854.
ZHANG Quanming, CUI Xiaoyu, ZHANG Xiaodi, et al. Incentive optimization strategy of multi period coupling demand response considering user uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8844-8854.
- [14] 崔屹峰,李珍国,魏思雨,等.面向需求响应的温控负荷单元随机选择模型[J].电力系统自动化,2021,45(19):126-132.
CUI Yifeng, LI Zhenguo, WEI Siyu, et al. Random selection model of thermostatically controlled load units for demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 126-132.
- [15] 姜婷玉,李亚平,江叶峰,等.温控负荷提供电力系统辅助服务的关键技术综述[J].电力系统自动化,2022,46(11):191-207.
JIANG Tingyu, LI Yaping, JIANG Yefeng, et al. Review on key technologies for providing auxiliary services to power system by thermostatically controlled loads [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 191-207.
- [16] 孙宏斌.能源互联网[M].北京:科学出版社,2020.
SUN Hongbin. Energy Internet [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [17] 高广帅,李新国,曾海燕,等.基于分段削峰的用户侧储能容量优化配置启发式方法[J].电工电能新技术,2023,42(1):70-78.
GAO Guangshuai, LI Xinguo, ZENG Haiyan, et al. Segment-by-segment power peak clipping based heuristic method for optimal sizing of energy storage systems on the user-side [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(1): 70-78.
- [18] 周宸宇,冯成,王毅.基于移动用户接入控制的5G通信基站需求响应[J].中国电机工程学报,2021,41(16):5452-5462.
ZHOU Chenyu, FENG Cheng, WANG Yi. Demand response of 5G communication base stations based on admission control of mobile users[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5452-5462.
- [19] 吴刚,高赐威,陈宋宋,等.考虑需求响应的数据中心用电负荷优化研究综述[J].电网技术,2018,42(11):3782-3788.
WU Gang, GAO Ciwei, CHEN Songsong, et al. A survey on data center power load optimization considering demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3782-3788.
- [20] 需求侧资源潜力挖掘方法与实践——以长三角中心城市湖州为例[R/OL]. [2022-12-09]. <https://news.bjx.com.cn/html/20200623/1083433-5.shtml>.
Method and practice for exploring potential of demand side resources: taking Huzhou, the central city of the Yangtze River Delta, as an example[R/OL]. [2022-12-09]. <https://news.bjx.com.cn/html/20200623/1083433-5.shtml>.
- [21] 金伟超.基于电力大数据的用户用电行为分析与用电优化策略研究[D].杭州:浙江大学,2021.
JIN Weichao. Research on consumer behavior analysis and electricity consumption optimization strategy based on power big data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [22] 杨华,张慧午,曹磊.寒冷地区某低能耗建筑空调运行节能潜力分析[J].建筑节能,2019,47(12):82-85.
YANG Hua, ZHANG Huiwu, CAO Lei. Energy saving potential of air conditioning operation of a low energy building in cold area[J]. Building Energy Efficiency, 2019, 47(12): 82-85.
- [23] LUO Zhixing, WANG Yiqun, LU Yiqing, et al. Rapid prediction method of building air-conditioning energy consumption based on indoor design temperature update [J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(11): 28-35.
- [24] 范帅,郑琨琪,王芬,等.基于负荷准线的大规模需求响应[J].电力系统自动化,2020,44(15):19-27.
FAN Shuai, JIA Kunqi, WANG Fen, et al. Large-scale demand response based on customer directrix load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 19-27.
- [25] 孟琰,肖居承,洪居华,等.计及需求响应不确定性的节点负荷准线:概念与模型[J/OL].电力系统自动化:1-17[2022-10-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.tp.20221019.1643.004.html>.
MENG Yan, XIAO Jucheng, HONG Juhua, et al. Nodal customer directrix load considering demand response uncertainty: concept and model[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-17 [2022-10-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.tp.20221019.1643.004.html>.
- [26] 贾龙,胡泽春,宋永华.考虑不同类型充电需求的城市内电动汽车充电设施综合规划[J].电网技术,2016,40(9):2579-2587.
JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua. An integrated planning of electric vehicle charging facilities for urban area considering different types of charging demands [J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2579-2587.
- [27] 李振坤,钱晋,宋治儒.考虑电动汽车停泊概率的配电网接纳电动汽车能力评估方法[J].智慧电力,2021,49(11):31-37.
LI Zhenkun, QIAN Jin, SONG Zhiru. Evaluation method of electric vehicle hosting capacity in distribution network considering electric vehicle parking probability [J]. Smart Power, 2021, 49(11): 31-37.

张新(1995—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统规划与运行、需求响应。E-mail: 592341427@qq.com

岳园园(1992—),女,硕士,工程师,主要研究方向:电网规划。E-mail:yueyuanyuan0913@163.com

曾好(1996—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统规划、运行与优化、需求响应。E-mail: zeng.hao23@foxmail.com

(编辑 章黎)

Response Potential Evaluation Method of Key Demand-side Resources for Power Grid Planning

ZHANG Xin¹, YUE Yuanyuan², ZENG Hao³, WANG Hui², LI Tao³, WANG Zhuding^{1,3}

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Research Institute of Economics and Technology of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

3. Chongqing Electric Energy Star, Inc., Chongqing 400039, China)

Abstract: Aiming at the influence of demand response (DR) on load forecasting in the power grid planning, a highly operatable calculation method for the DR potential is proposed based on the DR characteristics including user adjustable ability and responsiveness. First, the general idea of DR potential evaluation is proposed for the power grid planning. Secondly, the four-quadrant method is used to analyze the important factors such as the adjustable ability and responsiveness that affect the DR potential, so that the key demand-side resources are determined in the near-term and future. Then, the peak-shaving and valley-filling response potential evaluation methods of key demand-side resources participating in the incentive-based DR are proposed, which applies big data to the demand-side resources such as heating and cooling loads and industrial loads (e.g. the adjustable coefficient and customer directrix load). Finally, the future DR potential of a regional power grid is evaluated by the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U2066209).

Key words: power grid planning; demand response; potential evaluation; adjustable coefficient; customer directrix load

