

面向新型电力系统电量平衡的可调节负荷互动潜力分析

焦秀华

国网山西省电力公司晋城供电公司

摘要:在“碳达峰”、“碳中和”的背景下,可调负荷参与新一代电力系统的电能平衡问题显得尤为重要。首先,本文从我国负荷特征出发,深入剖析新型电力系统环境下电力电量平衡发展趋势和存在的问题;其次,通过对典型客户可调负荷潜力的分析,建立计及电量平衡的可调节潜能测算方法;最后,结合实例分析最大调节能力、调节时间与电量平衡间的关系,提出可调负荷在新电网环境下的发展趋势。

关键词:新型电力系统;电量平衡;可调节负荷;潜力

【DOI】10.12252/j.issn.2096-627X.2023.08.081

引言

随着我国“碳达峰”、“碳中和”和“新能源”战略的实施,以新能源为主的现代能源系统逐渐构建,传统化石能源在终端用能中所占比重逐渐降低。在今后的发展中,我国将以清洁能源比重持续提高、终端用能节能减排为主要任务,并逐步向源网荷储协同发展。用电需求响应与国家能源的绿色低碳发展战略相吻合。当前,在国家新一代电力系统规划中,尚未考虑可调负荷对区域电力系统电能平衡的作用。本文分析了以电量平衡为导向的可调负荷潜力测算方法,并研究其对电力系统功率平衡和电能平衡的支持程度,并通过实证研究,验证可调负荷在新电力系统规划和建设中的应用效果。

一、极端天气的负荷影响

近几年,全球变暖引起的极端气候事件频发,从而使得尖峰负荷持续上升。例如,在冬季,由于受到冷空气的影响,采暖用电的比重增长较快。根据2021年1月份一些省市的最大负荷及电采暖负荷的实际情况可以发现,北方地区的采暖负荷不超过10%,而江苏、浙江等长三角地区,冬季的采暖负荷达到29%-38%,达到了1/3,因此需要更多的采暖负荷。

“十四五”及“十五五”时期,我国家庭用电需求将会继续增长,预计在高峰时,电力供暖的负荷将达到50%-60%,而在夏天,则会有30%-35%的下降。

按行业划分,大工业和一般工商业用电负荷相对平稳,在家庭用电中占很大比重的50%左右。在冬季,由于受到冷空气的影响,整个月份的供暖负荷有很大的波动。

二、新型电力系统平衡问题分析

在碳中和和新型电力系统目标的背景下,新能源装机规模将持续增长。到2021年,新型电力系统累计装机规模为6.4亿kW,占全国新能源装机的26.7%。其中,风电装机3.3亿kW,光伏装机3亿kW,占并网总装机的14%,光伏装机的13%。随着“双碳”战略的实施,新型电力系统规模有望实现跨越式发展,2030年新能源装机

规模将达到41%,发电规模将达到22%。

1. 新能源在高比例电力系统中的负荷特征

针对我国各地区特征,选择华东、华中、西北、东北、西南等典型省市,进行电力负荷与新能源功率匹配度研究,发现新能源比例高的地区,夏季和冬季抗调峰特征显著,而冬季则是最弱的。

新型电力系统电量平衡问题分析新能源比例持续增长,将会对新型电力系统在多个时间尺度上的电能平衡产生影响。

(1) 日平衡分析

首先,新能源的功率波动很大,并且其最低功率也很低。2020年度新能源发电功率在日内变化幅度大于45%,各省(市)区(公司)经营区新能源最低功率(3.6%)、8.0%(8.0%)和10.7%(10.7%),新能源最低瞬间出力(0.2%、1.1%和5.0%),区域之间的互补效应不显著,对电能平衡的支持力度不足,高比重新能源电网的供电可靠性很难保证。

其次,电力系统的调峰容量不足,无法满足新能源高比例消纳的需要。在新型电力系统中,用能侧包含了大量的分布式电源和可调控的负荷,且源-荷角色切换具有很强的随机性。考虑到新型电力系统渗透率和发电效率存在一定的约束关系,如果到2030年新能源利用效率达到95%,电力系统将面临1.96亿KW的调峰容量缺口。假设新型电力系统容量最大化,则可使新能源消纳1600亿度,但新能源利用效率将下降2%。

(2) 长周期平衡分析

首先,新能源与负荷匹配度不高,对电力系统的供电保障能力不强;受夏季和冬季空调负荷的影响,我国夏季和冬季的峰值负荷迅速增加,特别是在冬季寒潮的影响下。但是在春秋两季,太阳能在夏天是最大的。新型电力系统的月电量分配与用电需求之间的不一致,使得新型电力系统的季节性供需矛盾突出。

其次,电力市场长期调控的能力较弱。当前,以电化蓄能、抽水蓄能等为主要调控方式的电力系统,其调

控周期较短。电解水制氢技术具有长期调控能力，但仍停留在前期示范阶段，很难应对新电力系统建设引起的季节性用电负荷平衡问题。

三、不同行业可调节负荷潜力分析模型

电力系统的负荷特点和调控方法因行业分类而有很大差别。从总体上看，整个行业的可调整空间很大，商用建筑的可调整资源主要包括制冷、供暖等温控负荷，而住宅用户的可调整资源则包括制冷和供暖设备。此外，一些新的负荷如电动车，也有很大的负荷调节潜力。

1. 工业负荷可调节潜力分析

大型工业用电总体来说比较平稳，它们都是典型的能源密集型产业，通常都是三个24小时的轮班工作，除了维修期和节假日之外，基本上都是满负荷运转，全年的波动很小。在此基础上，结合我国的实际情况，对我国的钢铁、电解铝等产业的可调整性进行了研究。

(1) 钢铁

钢铁行业的主要生产负荷设备有电炉、轧钢机等，该设备是将从高炉中还原冶炼出来的铁水，经过铁水的预处理，加入到顶底复吹氧转炉中，通过吹炼除去杂质，把钢液倒进包里，再经过二次精炼，把钢水提纯，再经过凝固成型连铸，再经过轧制工序，最终变成钢材。

(2) 电解铝

电解铝工业普遍采用24小时三班倒的生产模式，一天中的负荷有轻微的波动。在生产条件许可的条件下，电解铝工业中可调整的设备以铸造炉、铸造机为主。电解铝的生产过程为：以熔化的冰晶石为溶剂，以碳体作阳极，以铝溶液为阴极，通过强直流电流，使电解池两端发生电化学反应。通过对典型用户的生产数据进行分析，发现工业用电容量约为22%，且反应时间一般不超过2小时。

2. 商用建筑调控潜力分析

对商用建筑和住宅用电而言，其可调潜力主要来源于供冷、热等热负荷。

对于空调的冷却与供暖，其可调整潜力的计算模式为：式 $P_{DR, decreased} \times t_{DB} \times EER = c \times S \times H \times \rho \times (T_{limit} - T_{set})$ 。其中： t_{DB} 是要求响应期限；可减少中央空调的有功功率；是中央空调的制冷效率比率； c 表示空气的比热，通常选择在300K的温度下的固定压力比热容，其数值是1.005KJ； S 是建筑的冷却区域；其中， H 是建筑的平均楼层高度； ρ 表示空气的密度，通常选择在300K的温度下，其值是1.177公斤/ m^3 ；用户设置的制冷温度为 T_{limit} ，室温24℃时，人体感到最舒适； T_{set} 指的是大楼使用者所能忍受的最大房间温度。

空调、直热式电热供暖装置是一种恒温负荷，它的调节时间主要受使用者的房间温度的限制；从各种设施的角度来看，住宅用电负荷的可调潜力在0.5-2h左右。

3. 电动汽车可调节潜力分析模型

电动汽车在无序充电过程中，其充电负荷呈现出高频率波动、高容量占用、小容量贡献小等特点。目前常用的安时积分法、等效电路法和卡尔曼滤波法等算法都没有考虑电池在充放电过程中所引起的电池衰减、电池内部电阻的变化，从而导致电池的剩余有效电量计算存在很大的偏差。

然而，由于电池内部结构更为复杂且具有强的非线性，其SOC值目前还无法直接获得，而只能通过实测数据和相关算法来间接获得。随着循环次数的增加，电池的SOC会加速衰退，因此必须根据电池的健康状况进行动态调节。而环境温度也会极大地影响到锂电池的性能。比如，当温度低于-20℃时，其充放电效率和比容量都会与室温下有很大差异，而当温度达到45℃时，其能量密度将会降低到60%。根据各大品牌电动车在过去一年内的实际行驶数据，对其进行实时地可耗电量SOC计算。利用安时积分法对单个充电过程中的电量进行计算，并利用健康指标对其进行校正。

4. 可调节负荷效益

现阶段，全国各地都在积极推动需求响应的落实，以市场化方式缓解电力系统调峰，推动新能源消纳。需求响应的应用场景以削峰填谷为主，其实现时机主要集中在夏季和冬季，即供冷采暖负荷较大的夏季和冬季负荷高峰时段，而“填谷”则集中在整个社会用电负荷偏低、新能源弃电严重的节假日。

通过有关试验实例分析，可调负荷的经济效益如下：

(1) 节约发输电投资效益。与新建发电、输电设施投入大、利用效率低等特点相比，通过需求响应来提高电力系统的运营柔性更加经济可行。

(2) 提高新能源的消纳效率。可调负荷能够与新能源的逆调峰特征形成互补，有效提高电力系统安全运行水平。通过对新型电力系统商的合理让利，促使其在新能源高峰时段多用电量，减少用户成本，提高新能源消纳，改善负荷特性，提升电力系统负荷率。

(3) 节约能源和降低排放的效率。可调负荷在节能减排方面有着显著的优势，能够为实现“双碳”目标提供强有力的支持。其主要表现为：第一，发输电投资的建设，由于电力系统的需求响应能力的提升，节省了大量的能源和资源；二是将电力市场对新能源的消纳转化为电力系统的节能减排效益。

资料显示，最近几年国内超过95%的峰值单次持续

时间超过7-8小时，超过97%的峰值持续时间为5-7小时。但是，现有的可调控负荷资源的响应时间一般只有0.5-2小时，很难在不同的时间尺度上完全适应要求。当前，在国家新一代电力系统规划中，尚未将可调负荷引入到地区电力系统的电能平衡问题中。为此，亟须进行电力系统可调负荷对电力系统电能平衡承载力的可靠性评估，为我国新一代电力系统示范工程提供技术支持。

四、面向电量平衡的可调节负荷潜力分析方法

1. 计及电量平衡的可调节潜力评价

电量平衡是在电力系统实现电能平衡后，各种发电装置在给定的时段内所能提供的电能和所需的预计用电量之间的差额。高峰（低谷）负荷持续期间，电力系统总用电余额（缺额），通过对负荷装置进行调整，实现消（增）用电，实现电力系统总用电的平衡。

2. 算例分析

以某省份为例，2020年最高用电功率为11700万kW，年均用电7千万kW，新型电力系统总量为3230万kW，包括1683万kW的太阳能和1547万kW的风力发电。通过对该地区的夏季最高用电及发电高峰时段的实例分析，得出了以下结论。

(1) 夏季最大负荷日

为满足区域电力系统90%~97%的负荷削峰能力，选取该地区夏季最大负荷日作为典型日，并将可调负荷调整时长控制在1-3小时，与在平衡限制下进行不同调整时长下可调负荷容量的差别进行比较。

通过反复计算发现，当电力平衡时，当最大负荷所占比例增大时，所要求的可调整负荷能力会迅速增长。

(2) 新型电力系统最大出力日

选取该区夏季新能源最大功率日为代表，以满足地区网最大负荷峰值功率90%~97%、可调整负荷平均调整时间长度1-3小时的情形为实例，比较了不同调整时间长度对电能平衡的支持作用。

不同调整时段对电量支撑能力的比较，如图1，利用实测资料，比较本地区在2022年冬天最大负荷时可调节负荷与电量的差别。当天峰值负荷的95% ($P_{95, \max}$) 在17:30至21:30之间，并维持4小时，而在16:00至22:00期间，峰值负荷的90% ($P_{90, \max}$) 以上时段是16:00-22:00，并维持6小时。

在只计电力平衡限制的情况下，本地区可调负荷的峰值功率为1937.9万kW，约为11700万kW最大功率点的16.6%。计及平衡约束条件下，针对不同种类可调负荷所需调整的时段与负荷同步率，得出本地区的最大出力比例为8.5%左右，只相当于无出力情况下的50%左右。

五、结束语

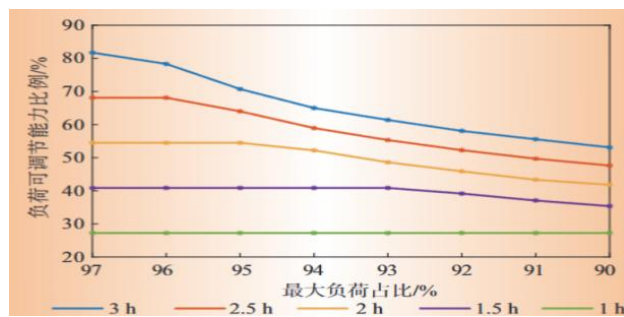


图1 不同调整时段对电量支撑能力的比较

在新型电力系统规划和施工中，要发挥能源消费侧灵活资源优势，以“源荷互动”的方式来实现电力系统平衡。本文根据已有的可调负荷潜力评价结果，建立了以电能平衡为导向的可调容量预测模型。电力供需平衡是电力供需双方在电力系统运行过程中存在的矛盾，其最大限度地限制了电力系统在电力系统运行过程中的调峰能力。以我国代表性省份为研究对象，通过实证研究，探讨调控时间长短对于电力系统电力平衡和电能平衡的支持程度，并通过典型省份的典型日观测资料，比较研究常规调控能力评价与电力系统负荷平衡后的实际效益的差别。研究发现，在电力平衡限制条件下，调整时间较长，削峰量较小，则系统的调峰能力就能完全弥补系统的不足。但是，当用电高峰的时候，电力系统的峰期会迅速延长，电力系统的可调控性将会出现严重的短缺。

为此，在新型电力系统建设中，应兼顾可调负荷对地区电力系统电能平衡的支持作用，适度降低火力发电后备容量，以达到网荷联动减排目标。在制订和实施需求应对政策时要兼顾各产业、各时段的用电同步比例，分期、有序地进行调整，充分发掘具有长期响应能力的可调负荷，使其能够更好地支持电力系统的电能平衡，建立规范的可调控电力系统，使电力系统能更好地发挥电力系统的作用，鼓励电力用户积极参加电力系统。

参考文献

- [1] 张运洲, 张宁, 代红才, 张丝钰, 吴潇雨, 薛美美. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 1-11.
- [2] 王明富, 吴华华, 杨林华, 乔松博, 惠恒宇, 杨阳, 丁一. 电力市场环境下能源互联网发展现状与展望[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(2): 1-7.
- [3] 武昕, 于金莹, 彭林, 王庆华, 闫雨龙. 基于用户边缘侧事件解析的工业电力负荷非侵入式感知辨识[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 29-37.
- [4] 徐青山, 丁一帆, 颜庆国, 郑爱霞. 大用户负荷调控潜力及价值评估研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6791-6800.