DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2024. 01. 004

针对温控负载变化的虚拟电厂控制策略研究

Research on control strategy for virtual power plants in response to thermostatically controlled loads

田泽禹,沙钊旸,赵全斌,严卉,种道形* TIAN Zeyu, SHA Zhaoyang, ZHAO Quanbin, YAN Hui, CHONG Daotong*

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室,西安710049)

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘 要: 温控负载是一种变化刷烈、波动频繁、高峰负荷比例较高的负载,对电网的安全产生了极大的影响。为了 应对这一问题,系统的输出功率往往会超过90%负荷最大值的调峰限制。针对虚拟电厂(VPP)系统内的超限过程 进行了研究,并提出了2种控制策略,以降低超限总电量或者利用超限电量的同时获取收益。在验证策略的控制效 果时,选取了2种由温控负载引起的功率需求的典型变化。研究结果表明,温控负载引起的功率需求峰值的变化对 策略具有重要影响。在安全模式下,超限比例与峰值的增加呈反比,而与平均功率的增加呈正比;在收益模式下, 峰值变化会影响储能放电过程,平均功率变化则会影响储能充电过程。随着功率需求的增加,收益逐渐减小,收益 范围为3.62万~3.25万元。

关键词:虚拟电厂;温控负载;协调控制策略;电价差收益;APROS;电动汽车;储能;调峰

中图分类号:TK 01 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2024)01-0028-10

Abstract: Thermostatically controlled load (TCL) is of frequent and drastic fluctuations and high- proportion peak load, which threats the safe operation of the power grid. To alleviate the fluctuation, a power system has to raise its load over the peak load regulation constraint of 90% maximum load. To study the over-limit process of a virtual power plant (VPP) system, two control strategies are proposed to reduce the total amount of over-limit electricity and gain profits from the process. Two types of variation laws of the power demand varying with TCLs are selected to study the effectiveness of the strategies. The results show that the peak value of the power demand varying with TCLs has a great impact on the strategies. Under the safe mode, the proportion of over-limit electricity is inversely proportional to the power demand peak value , while is proportional to the average value. Under the profiting mode, since the peak value and average value of power affects the charging and discharge processes, the profit decreases with the increase of power demand, ranging from 36 200 to 32 500 yuan.

Keywords: virtual power plant; thermostatically controlled load; coordinated control strategy; price differential revenue; APROS; electric vehicle; stored energy; peak regulation

0 引言

随着全球能源短缺和环境污染等问题的日益 严重,传统能源发电的弊端越来越凸显。预计到 2060年,我国将实现碳达峰、碳中和,并且非化石能 源消费比重将达到83%,新能源发电量占比将超过 60%^[1]。然而,随着风力发电和光伏发电等新能源 的大量接入,配电网的安全性和经济性受到了挑 战^[2]。在电网的非正常运行情况下,新能源机组面 临的出力间接性、随机性或故障区段未供电等问 题,使得片区内可再生能源利用率大打折扣^[3]。虚 拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)的出现为解决这 些问题提供了一种有效途径^[4]。VPP的基本概念是 将电网中分布式电源、可控负荷和储能装置聚合成 一个虚拟的可控集合体,提高可再生能源消纳量, 保证电网的安全稳定运行,并参与电力市场和辅助 服务市场的运营,实现实时电能交易,从而成为推 动"双碳"目标实现的有效途径^[5]。

VPP主要由发电系统、储能设备和通信系统等

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB4202403);陕西 省创新能力支撑资助项目(2023-LL-QY-29)

National Key R&D Program of China (2022YFB4202403); Innovation Capacity Support Program of Shaanxi Province (2023-LL-QY-29)

部分构成^[6],根据其不同聚合的分布式资源容量分 为大型、中型以及小型VPP^[7]。不同类型的VPP因 其不同的构型各有特点,如文献[8]中将光伏(PV)、 风力发电厂(WPP)、压缩空气储能(CAES)、电池储 能系统(BESS)和电动汽车集成到VPP中。文献[9] 中的VPP聚合了电池储能系统(BESS)和热泵系统 (HPWH)。根据不同构型的VPP特点并将其应用于 适合的实际运行过程中,不仅能优化资源利用,还 可以提高供电可靠性^[10]。

在 VPP 运行过程中,温控负荷(Thermostatically Controlled Loads, TCLs)是最常见的负荷侧可调资 源,是指需要维持一定温度的负荷,包括商业楼宇 的中央空调、居民住宅的空调热水器等用户侧温控 类负荷^[11],具有变化大、波动频繁、高峰负荷比例高 等特点。这些特点会对最大负荷产生一定影响^[12], 例如在夏季用电高峰时期,全网总用电量的40%将 用于满足空调负荷需求,最大负荷也相应增加^[13]。 一般认为将可控负载提供的功率限制在90%最大 负荷以下,可以保证电力系统安全稳定运行^[14];但 是根据实际情况,随着温控负荷的增加,供应比例 会有所提高。根据国家电网的统计,超过最大用电 负荷95%的持续时间普遍低于24h(累计不足1d), 对应电量不超过全年用电量的0.5%;超过最大负 荷90%的持续时间普遍低于168h(累计不足1周), 对应电量不超过全年用电量的1%^[15]。针对文献调 研的结果可以发现,目前对于电力系统响应负载变 化的研究较少,更多的是将调峰功率限制作为边界 条件研究系统的调度过程^[16]。而实际中的电力系 统尤其是对于以 VPP 为主的相对独立的电力系统 而言,适当的超过调峰限制去响应负载变化是非常 常见的调节手段,对于此缺少足够的研究去探究或 指导调度过程。

1 VPP模型搭建与容量选取

本文在仿真软件 APROS 中搭建了大型 VPP系统,其中含有 350 MW 燃煤机组、100 MW 光伏机组、 搭载2组 87.84 MW 磷酸铁锂电池的电动公交车、基 于陕西省典型日电力需求曲线变化得到的负载需 求以及电网模块及相应的控制部分组成,VPP构型 示意如图1所示。经过对 VPP模型中各单元模型的 稳态验证、动态验证,模型稳定且准确,模型的精度 能够满足下文研究的需要。



© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

营计划的研究,总结了目前运营中的电动公交车的 一些特点。

(1)电动公交车具有保障公共服务的需要,其 工作的时间是依据提前设定好的运行路线与运行 时间进行的,并不受乘车人数量的变化而变化^[18]。

(2)受到更换燃油公交车为电动公交车过程中的经济成本和公交车电池组的发展限制(多为2018,2019年前后更替),当前电动公交车中有54%的车辆长度为10~12m,电池容量为280~320kW·h。2018年的平均日行驶里程为123km^[19]。而随着城市的发展,公交线路的平均运行里程更长。燃油车辆的平均运行里程约为180km。电动公交车要在没有外部补充电源的情况下完成整个线路的运营较为困难。

(3)电动公交车的充电方式为慢充(充电速率 小于3C),主要采用磷酸铁锂电池^[20]。采用慢充的 原因一方面受制于技术,另一方面慢充的方式能够 最小化电池容量的损耗,降低损失。因此,电动公 交车主要在夜间进行集中充电。

(4)大多数电动公交车拥有独立的充电场所, 但充电桩的建设并不完善,导致数量不足,无法为 每辆公交车提供单独的充电站。调查发现,公交车 与充电桩的比例为3:1。

(5)受制于目前公共交通公司的运营成本提高、收入下降,导致公司收益入不敷出的现象,相比 于民用电动汽车更有动力参与VPP并获得收益对 换车的成本进行补贴,更符合基本利益同时易于 合作。

(6)在对中国西北地区电动公交车特点的研究 中,选择了知名电动车公司比亚迪推出的K8公交车 型。具体电池参数见表1,表中SOC为荷电状态。 公交公司提出了各种解决电动公交车短运营里程 的替代方案,其中经济成本最低的运营计划是"2:3 替换",即3辆公交车中有2辆为常规公交车,1辆为 备用车,同时运营2条公交线路^[21-22]。运营模式的 示意如图2所示。因此,本研究选择电动公交车系 统的"2:3替换"运营计划以提高模型的通用性。

	表1	电动公交车技术参数
Fable 1	Tech	nical attributes of electric buses

		sates of electric se	
参数	值	参数	值
额定容量/(A·h)	540	额定开路电压/V	540.0
电芯容量/(A·h)	270	电芯开路电压/V	3.2
SOC的可用范围/%	10~100	电压变化范围/V	420.0~613.0
储能的额定功率/(kW·h)	291.6	最大放电电流/A	-540
串联电芯数	169	最大充电电流/A	1 080
并联电芯数	2	额定放电功率/kW	291.6



Fig. 2 Operation mode of the electric bus system with two running buses in every three buses

2 基于安全与收益的VPP协调控制策略

为了在 VPP 储能容量不变的情况下,提高系统 对于由温控负载引起的负载变化的适应性,本文提 出了针对 VPP 中的燃煤机组单元超限工况时的控 制策略,并根据实际运行情况与调度目标划分为基 于安全的控制策略以获得最小的超限电量,和基于 收益的控制策略充分利用超限电量获得电价差收 益。VPP 的控制人员能够根据不同的需求选择不同 的方案进行调度。

2.1 基于安全的VPP协调控制策略研究

首先根据由温控负载影响下的新的负荷变化 曲线确定出系统的调峰时段变化,调峰时段即是系 统负载需求曲线超过需求曲线最大功率点90%限 制线以上的时间。在调峰时段开始前,系统需向电 动公交车储能充电以为后续的调度放电做准备。 当调峰时段开始后,系统进入放电时段,由在时段 内的储能放电潜力与功率需求可以计算系统对燃 煤机组输出功率的要求。燃煤机组平均输出功 率为

$$P_{\text{avg}} = \frac{Q_{\text{demand}}(i) + Q_{\text{bat}-\text{avl}}}{t_i}, \qquad (1)$$

式中: P_{avg}为调峰时段内系统对于燃煤机组的输出 功率需求, MW; Q_{bat-avl}为电池储能在调峰时段的可 用电量, MW·h; Q_{demand}(i)为在i时段内系统的电量需 求, MW·h; t_i为调峰时段的总时长, 由功率曲线与 90%最大负荷点限制线的交点确定, h。其中电动 公交车储能的可用容量由2部分组成, 分别是电动 公交车储能A组与储能C组, 电动公交车储能的可 用容量为

 $Q_{\text{bat-avl}} = (S_{\text{OC, A-avl}} + S_{\text{OC, C-avl}}) \times Q_{\text{bat}} \times \eta_{\text{d}},$ (2) 式中: $S_{\text{OC, A-avl}}$ 为储能A组的剩余SOC,表征了储能 的电量剩余; $S_{\text{OC, C-avl}}$ 为储能C组的剩余SOC; $Q_{\text{bat-rat}}$ 为电动公交车储能的额定容量,MW·h; η_{d} 为电动公

© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

交车储能的放电效率,由储能模型确定效率 为0.94。

通过在调峰时段内计算系统的平均功率需求 的方式,系统能够在最小超限功率的情况下满足由 温控负载引起的系统功率变化。缩短电动公交车 储能的充电时间,在达到调峰时段就立即进行燃煤 机组功率调整的方式能够尽量减小充电量,进而减 小电池在充放电过程的电量损失,使系统能够在最 小的超限电量的情况下满足由温控负载引起的系 统功率变化。但是直接进行燃煤机组平均功率的 计算也存在着相应的问题,需要进行燃煤机组平均 输出功率的修正。

国家发展改革委与国家能源局公布的2020年 陕西省省级电网典型电力负荷曲线(负荷根据VPP 的容量整体减小了1/60)如图3所示。从图中可以 看出负载的峰谷变化明显。如果在调峰时段直接 使用计算后的燃煤机组平均功率进行调度,供电量 会先高于需求后低于需求,储能则会先充电后放 电,造成储能功率的盈余或者储能功率缺失不能满 足负载需求。所以,需要对调度过程的平均功率与 调度过程进行修正,提高控制的精确性。





对于功率的修正主要包括2部分。一部分是针 对调度前的充电过程,根据功率需求曲线可以计算 出该充电时段的盈余功率,并由充电效率计算出充 电量。另一部分修正时段的确定选择调峰时段开 头作为起始,平均功率输入与输出交点最近的功率 点作为结束,确定时段。时段内的充电量计算公 式为

 $Q_{\text{bat-c}}(i) = (P_{\text{avg}} \times t_i - Q_{\text{demand}}(i)) \times \eta_c,$ (3) 式中: $Q_{\text{bat-c}}(i) \Rightarrow i$ 时段内储能的充电量; η_c 为系统 中电动公交车储能的充电效率,由储能模型确定效 率为0.85。

第2部分是针对调度结束时充电过程的修正, 策略选择通过额外调度燃煤机组进行降负荷的方 式,控制电动公交车储能持续放电,以达到对系统 储能最大化利用的目的。第2部分修正时段选择平 均功率输入与输出的第2个交点作为起始,选择输 出与90%最大负荷值的交点作为结束。将此时段 的燃煤机组输出功率设定为90%最大负荷值,计算 该时段储能的放电量为

$$Q_{\text{bat-d}}(i) = Q_{\text{demand}}(i) - P_{90\% \max} \times t_i, \qquad (4)$$

式中: $Q_{\text{bat-d}}(i)$ 为在i时段内储能放电量,MW·h; $P_{90\%\text{max}}$ 为系统的90%最大负荷值,MW。将该放电量 与充电时对应的放电量计算后便能得知在修正后 系统的平均功率值,即

$$P_{\text{coal-cor}}(t_i) = \frac{Q_{\text{bat-c}}(i) + Q_{\text{bat-di}}(t_i)}{t_i \times \eta_c \times \eta_d}, \qquad (5)$$

$$P_{\text{coal}}(t_i) = P_{\text{coal}-\text{cor}}(t_i) + P_{\text{coal}-\text{ori}}(t_i), \qquad (6)$$

式中: $P_{coal-cor}(t_i)$ 为燃煤机组在 t_i 时段内的输出功率 修正值, MW; $P_{coal-ori}(t_i)$ 为燃煤机组输出功率原始 值, MW; $P_{coal}(t_i)$ 为未经修正的 t_i 时段燃煤机组输出 功率。

2.2 基于收益的VPP协调控制策略研究

受到城市用电规律的影响,调峰时段往往是电网的峰值电价时段。VPP作为价格敏感型的电力系统,通过调度获得合理的收益是VPP建立与持续运行的关键^[23-26]。而其中主要的获取收益的方式便是谷值电价买电、峰值电价卖电以获得电价差收益,所以对于调峰时段的调度会对VPP的收益产生至关重要的影响。当全年或者当月温控负载变化平缓,系统的安全压力较小时,面对温控负载的变化是可以以优先保障收益作为目标进行调度的,此时就需要提出基于收益的VPP协调控制策略以应对系统温控负载的变化。

策略的主要目的是获取最大的电价差收益,这 需要系统在谷值电价或者平值电价时尽可能多的 充电,在峰值电价时保障将储能完全释放。所以, 策略在平值电价时段,调用燃煤机组保持最大输出 功率;在峰值电价时段,确定燃煤机组的输出功率 将储能完全放电。在峰值电价结束后,如果调峰时 段并未结束,由峰值电价时段结束时的功率需求确 定对燃煤机组的调用量。方案中的调度计划 见表2。

3 仿真结果分析与评价

为了探究温控负载对于系统的调度影响与新 策略的应对情况,需要全面地考虑在温控负载影响 下的负荷需求曲线的变化。本文将相关的变化总 结为2类:温控负载导致负荷曲线峰值变化的情况, 本文称为工况1,如图4所示;温控负载未导致负荷 表2 基于收益的VPP协调控制策略控制计划

Table 2 Profit-based VPP coordinated control strategy							
	时间段	连入电网的储能组	电费	调度目的			
11	:30—16:30	С	平值	电动公交车储能在谷电价时最大化充电,充电结束后储能组C剩余储能 $S_{\rm oc}$ =1			
16	:30—18:30	А	平值	储能车组A工作结束接入电网,同时此时段光伏机组输出功率下降,负载开始受到 温控负载的影响,需求增大。为获得最大的收益,在此时段调度燃煤机组输出功率 为额定功率,P=350 MW,储能组A充电,充电结束S _{0C,r=18:30}			
18	:30-23:00	A,C	峰值	为获得最大收益,储能在峰值电价时段完全放电,此时段燃煤机组的输出功率信号为P _{pek} 。时段结束时,储能的设计容量剩余均为S _{0c} =0.1,电池放电下限值			
23	:00—调峰时段结束	С	谷值	储能放电结束,但调峰时段仍在继续,需要满足系统功率需求,设定 P_{valley} = P_{valley} -动输出功率设定值			

曲线峰值变化,仅增加了调峰时段的功率需求情况,本文称为工况2,如图5所示。在工况1中,负载 需求的峰值变化会影响90%最大负荷限制值,会改 变系统的调峰时间与燃煤机组参与调峰时段的比 例。而工况2中,各个曲线的90%最大负荷限制值 不变,调峰时间差异较小,仅改变调峰时段内的总 需求电量。



图 4 工况 1: 温控负载导致负荷峰值变化后的负载曲线 Fig. 4 Condition 1: Load variation with the power peak value





相对于夏季工业与商业的持续供冷,民用负载 部分的温控负载变化与时间有更紧密的联系,更不 可预测,所以本文工况1与工况2负载曲线的变化 主要集中在夜间,针对夜间负载峰值进行变化。同 时,对中国的北方城市而言,集中采暖使得在冬季 的温控负载变化远不如夏季,所以太阳辐照度选取 西安地区夏至典型日的辐照度曲线,其对应的光伏 单元输出功率随时间的变化如图6所示。





在 VPP 中,消纳可再生能源作为重要职责,光 伏的输出功率需要优先被利用,同时负载的需求也 必须被满足以保障电网运行稳定,所以本文将光伏 机组与负载2个 VPP 中的不可控单元的变化整合成 系统功率需求,再调度可控单元包括燃煤机组与储 能的功率以满足功率需求曲线。

综上所述,本文的仿真时间定为16:30以后,民 用温控负载的需求逐渐升高对调度产生影响,与此 同时电动公交车储能轮动接入电网,是全局控制的 关键时段^[13]。输入控制策略后形成调度计划并进 行仿真,系统在2个工况下的功率需求曲线如图7、 图8所示。

3.1 不同策略的评价指标

VPP中的可控单元主要包括电动公交车储能与 燃煤单元。可控单元的响应情况是控制策略控制 效果的重要指标,而不同的可控单元根据其不同的 功能又有不同的变化表示形式。

对于电动公交车储能而言,实时的电量变化曲 线是最重要特征。电量变化表示着储能充电与放 电的状态和时段内的充电、放电量的相对关系。关 键时段储能电池的容量剩余则决定了系统对于储 能的利用率^[22]。

基于安全的策略需要储能电池在调峰结束时



图7 工况1在温控负载导致负荷峰值变化后的功率需求曲线 Fig.7 Power demand variation with the power peak value



Fig. 8 Power demand variation with the power peak value not affected by TCLs

段的电量剩余最低,意味着燃煤机组在调峰时段的 平均输出功率最低,满足安全性要求。基于收益的 策略需要储能电池在低电价充电结束有最高的可 用电量,在高电价放电结束时有最低的剩余电量, 保障在高电价时段放电量最大以实现最大收益。 所以,对于储能电池而言,监测时段内的电池 SOC 变化与关键时间点的 SOC 是对于控制效果的重要 评价指标。

对于燃煤机组而言,输出功率的变化是最重要的特征。受到调峰限制的影响,燃煤机组的输出功 率理应被限制在90%最大负荷以下,在某些特殊情 况才能超过,本文的研究重点也在于此。那么无论 是安全策略还是收益策略,超限时间与超限电量都 是一定要被关注的,所以燃煤机组输出功率的变化 是衡量控制效果的又一重要指标。

3.2 基于安全的控制策略仿真结果分析与评价

工况1在安全策略下VPP可控单元评价指标的 变化曲线如图9所示。图中可以看出燃煤机组与电 动公交车储能随时间的变化情况。对于燃煤机组 而言,在调峰开始前维持额定输出功率为VPP供 电,在调峰开始后按照计算得到的修正后的平均功 率进行调度。在达到限制值与平均功率的交点后, 调整燃煤机组输出功率使储能充分放电。对于电 动公交车储能,在调峰时段开始前,分别充电,在开 始后逐渐放电。当各情况下调峰时段结束时,储能 的剩余 SOC 分别是 0.16,0.09,0.11,较储能电池的 放电下限 0.1误差在-0.01~0.06之间,对应的放电 量 偏差为 4.7 MW·h,说明控制策略调度效果 明显。



工况2在安全策略下VPP可控单元评价指标的 变化曲线如图10所示。由图可知,相比于工况1,3 种情况调峰时段差异小且较之工况1时间更长,燃 煤机组开始调度的时间相同,平均输出功率随着需 求的增大而增大。

虽然在调峰时段,电池储能存在先充电后放电

情况,但是由于对输出功率的修正,3种情况下调峰时段结束时储能SOC为0.16,0.10,0.08,能够达到

控制目的,有较好的控制效果,控制策略可行 可靠。





对比2种不同工况可以发现,工况1时由于负荷需求的峰值发生变化,随着峰值的增加90%最大负荷限制提高,超过限制部分的功率在不断减小, 工况1.1,1.2,1.3的超限平均功率为8.7,1.0, -7.3 MW。

而在工况2,因为90%限制不变,工况1.1,1.2, 1.3的超限平均功率不断增加,为8.7,12.1,17.9 MW,对应超限电量为54.4,84.7,125.3 MW·h。从 仿真结果可知,相比使负载峰值明显增大的温控负 载工况1,使负载在时段内平均增大的温控负载工 况2更对与系统的稳定性产生影响,超限的无论是 时间还是电量都显著提升,作为电网的控制者要更 为关注工况2的调度。

3.3 基于收益的控制策略仿真结果分析与评价

工况1在收益策略下VPP可控单元评级指标的 变化曲线如图11所示。从图中可以看出燃煤机组 严格按照电价时段的区分而调度,同时储能的SOC 也在平值电价充电,在峰值电价放电,峰值电价结 束时剩余SOC分别为0.09,0.10,0.16,其中工况 1.3的容量剩余为0.16,受到燃煤机组输出功率的 限制,在该点无法实现完全放电,故在某些极端天 气时,收益策略会受到影响。



工况2在收益策略下VPP可控单元评价指标的 变化曲线如图12所示。

由图可知,相比工况1,工况2的功率需求峰值 降低,燃煤机组与储能能够达到要求,不存在如图 11中工况1.3的放电限制。所以燃煤机组输出功率的变化与电价时段的关系更为明显,电池储能在峰值电价结束时,SOC在[-0.03,0.03]之内,能够达到控制要求。



Fig. 12 Evaluation indicators for the controllable units in the VPP under the profiting mode

在收益策略下,对于工况1,因为温控负载对系 统功率需求的影响集中在峰值部分,在平电价充电 时段工况1.1,1.2,1.3的充电量相同,放电则受到 峰值提升的影响,燃煤机组功率限制。

工况1.1,1.2,1.3系统储能的峰值放电量为 95.39,94.57,91.28 MW·h,收益为3.62万,3.59 万,3.47万元。如果系统峰值较之工况1.3进一步 提升,可以预见系统的电价差收益将进一步降低。

相比工况1,工况2时因为系统的峰值不变,燃 煤机组输出功率能够满足需求,所以放电过程各情 况能到放电限制值,但是受到温控负载影响,充电 过程负荷需求不同,充电量各不相同。

工况 2.1, 2.2, 2.3 系统的峰值放电量分别为 95.39, 92.10, 85.5 MW·h, 收益分别为 3.62 万, 3.50万, 3.25万元。

同时收益策略下的超限电量也是重要的参考因素,数据汇总后可知,工况1的平均超限功率为10.1,8.5,0.0 MW,超限电量分别为75.75,23.38,0.00 MW·h;工况2的平均超限功率为8.72,13.27,18.71 MW,超限电量分别为61.04,99.53,149.68 MW·h。

4 结论

本文针对城市中夜间温控负载变化对VPP功 率需求的影响,提出了对于VPP的控制策略,通过 在指定时间内控制燃煤机组输出功率超过调峰限制的方式满足额外的功率需求。并针对控制目的提出了基于安全与收益的2种方案,模拟了在工况1和工况2时,2种温控负载变化下策略的运行情况并进行对比研究。本文的主要结论如下。

(1)提出了基于安全与收益的控制策略。其中 基于安全的策略以尽量小的燃煤机组超限功率解 决温控负载带来的额外功率需求,适用于温控负载 波动较强、超限额度不足的情况下,维持系统运行 稳定。其中基于收益的策略更多的调度超限功率 在满足温控负载需求同时获得额外电价差收益,适 用于温控负载波动较弱、超限额度有盈余的情况, 提高系统的收益。

(2)在基于安全的策略控制下,对系统的超限 电量影响更明显的是工况2。系统在工况1时得益 于调峰限制的提升(90%最大负荷峰值),峰值越高 反而超限功率越低,从8.7 MW降低为0 MW;在工 况2时,调峰限制不变,负载需求的平均值越高超限 功率越高,从8.7 MW升到17.9 MW,超限电量从 54.4 MW·h升到125.3 MW·h。

(3) 在基于收益的策略下,工况1的变化影响着 储能的放电过程,工况2的变化影响着储能的充电 过程,两者的收益变化不大,但是超限电量有明显 区别。工况1下,随着峰值提升收益从3.62万元降 到3.47万元,超限电量则从75.75 MW·h降为0 MW·h;工况2下,随着平均值提升收益从3.62万元 降至3.25万元,超限电量从61.04 MW·h升到 149.68 MW·h。

(4)温控负载引起的功率需求峰值的变化对策略有重要影响:在安全模式下,超限比例与峰值的增加呈反比,与平均功率的增加呈正比;在收益模式下,峰值会影响储能放电,平均功率则会影响储能充电,收益都随着功率需求的增加而减小。

参考文献:

[1]艾芊.双碳目标下虚拟电厂资源聚合与协同调控研究[J].电力工程技术, 2022, 41(6): 1.

AI Qian. Research on resource aggregation and cooperative regulation of virtual power plant under dual carbon target [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41 (6): 1.

[2]方燕琼, 艾芊, 范松丽. 虚拟电厂研究综述[J]. 供用电, 2016, 33(4): 8-13.

FANG Yanqiong, AI Qian, FAN Songli. A review on virtual power plant [J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(4): 8–13.

- [3]NAVAL N, YUSTA J M. Virtual power plant models and electricity markets—A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 149: 111393.
- [4]GOIA B, CIOARA T, ANGHEL I. Virtual power plant optimization in smart grids: A narrative review [J]. Future Internet, 2022, 14(5): 128.
- [5]KALAF A A, ALYOZBAKY O S, ALGHANNAM A I. A modern technique to manage energy profile in Iraq: virtual power plant (VPP) [C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 1973(1): 012078.
- [6]FAN S, LIU J, WU Q, et al. Optimal coordination of virtual power plant with photovoltaics and electric vehicles: A temporally coupled distributed online algorithm [J]. Applied Energy, 2020, 277: 115583.
- [7]OSHNOEI A, KHERADMANDI M, BLAABJERG F, et al. Coordinated control scheme for provision of frequency regulation service by virtual power plants [J]. Applied Energy, 2022, 325: 119734.
- [8]张伟,罗世刚,滕婕,等.考虑温控负荷聚合调控的新能源-储能联合规划[J].储能科学与技术,2023,12(6): 1901-1912.

ZHANG Wei, LUO Shigang, TENG Jie, et al. Joint planning of renewable energy and storage considering thermostatically controlled loads aggregation regulation [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12 (6) : 1901–1912.

[9]郭旭歆,高赐威,王朝亮,等.基于中央空调虚拟储能模

型的调峰策略研究[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(4): 42-46.

GUO Xuxing, GAO Ciwei, WANG Chaoliang, et al. Peak adjustment strategy based on central air conditioning virtual energy storage model[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(4): 42-46.

- [10]KIM J, MULJADI E, GEVORGIAN V, et al. Capabilitycoordinated frequency control scheme of a virtual power plant with renewable energy sources [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(16): 3642-3648.
- [11]CHAPALOGLOU S, NESIADIS A, ILIADIS P, et al. Smart energy management algorithm for load smoothing and peak shaving based on load forecasting of an island's power system[J]. Applied Energy, 2019, 238: 627-642.
- [12]马学礼,王笑飞,孙希进,等.燃煤发电机组碳排放强 度影响因素研究[J].热力发电,2022,51(1):190-195.
 MA Xueli, WANG Xiaofei, SUN Xijin, et al. Influence factors of carbon emission intensity of coal-fired power units
 [J]. Thermal Power Generation,2022,51(1):190-195.
- [13]TIAN Z Y, WANG Z, CHONG D J, et al. Coordinated control strategy assessment of a virtual power plant based on electric public transportation [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 59: 106380.
- [14]JU L W, YIN Z, ZHOU Q Q, et al. Nearly-zero carbon optimal operation model and benefit allocation strategy for a novel virtual power plant using carbon capture, power-togas, and waste incineration power in rural areas [J]. Applied Energy, 2022, 310: 118618.
- [15]孙惠,翟海保,吴鑫.源网荷储多元协调控制系统的研究及应用[J].电工技术学报,2021,36(15):3264-3271.
 SUN Hui, ZHAI Haibao, WU Xin. Research and application of multi-energy coordinated control generation, network, load and storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3264-3271.
- [16]ROUZBAHANI H M, KARIMIPOUR H, LEI L. A review on virtual power plant for energy management [J]. Sustainable energy technologies and assessments, 2021, 47: 101370.
- [17]GOIA B, CIOARA T, ANGHEL I. Virtual power plant optimization in smart grids: A narrative review [J]. Future Internet, 2022, 14(5): 128.
- [18]POURGHADERI N, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M, et al. A local flexibility market framework for exploiting DERs' flexibility capabilities by a technical virtual power plant[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(3): 681-695.
- [19]ZHANG L, LIU D Y, CAI G W, et al. An optimal dispatch model for virtual power plant that incorporates carbon trading and green certificate trading [J]. International Journal of Electrical Power & Energy

Systems, 2023, 144: 108558.

- [20]MICHAEL N E, HASAN S, BISWAL B, et al. Reactive power compensation using electric vehicle and data center by integrating virtual power plant [J]. Electric Power Components and Systems, 2022, 50(4-5): 245-255.
- [21]AHMADIAN A, PONNAMBALAM K, ALMANSOORI A, et al. Optimal management of a virtual power plant consisting of renewable energy resources and electric vehicles using mixed-integer linear programming and deep learning[J]. Energies, 2023, 16(2): 1000.
- [22]薛露露, 韦围, 刘鹏, 等. 中国纯电动公交车运营现状 分析与改善对策[R/OL]. 北京:世界资源研究所, 2019. https://www.wri. org.cn/publications.

XUE Lulu, WEI Wei, LIU Peng, et al. Overcoming the operational challenges of electric buses: Lessons learnt from China [R/OL]. Beijing: World Resources Institute, 2019. https://www.wri.org.cn/publications.

- [23]ULLAH Z, HASSANIN H, CUGLEY J, et al. Planning, operation, and design of market-based virtual power plant considering uncertainty [J]. Energies, 2022, 15 (19) : 7290.
- [24]王学科,陈北洋,周保卫,等.基于分离预处理的城镇 污泥原位资源化技术分析[J].华电技术,2021,43 (12):23-28.

WANG Xueke, CHEN Beiyang, ZHOU Baowei, et al. Analysis of insitu municipal sludge resource utilization technology based on separation pretreatment [J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 23-28.

[25]侯鲁洋,葛磊蛟,王飚,等.面向新型产消者的综合能 源系统和电力市场研究[J].综合智慧能源,2022,44 (12):40-48.

HOU Luyang, GE Leijiao, WANG Biao, et al. Research on the integrated energy system and the electricity market towards new prosumers [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(12): 40-48.

[26] 葛磊蛟,崔庆雪,李明玮,等.面向低碳经济运行的新型电力系统态势感知技术综述[J].综合智慧能源, 2023,45(1):1-13.

GE Leijiao, CUI Qingxue, LI Mingwei, et al. Review on situational awareness technology in a low-carbon oriented new power system [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(1): 1-13.

(本文责编:张帆)

收稿日期:2023-05-11;修回日期:2023-07-15 上网日期:2023-08-16;附录网址:www.iienergy.cn

作者简介:

田泽禹(1996),男,博士生,从事热力系统动态仿真与策略方面的研究,345395611@qq.com;

种道形*(1978),男,教授,博士,从事热力系统和多相流 方面的研究,dtchong@mail.xjtu.edu.cn。

*为通信作者。