

# 基于群感知技术的互动型智能台区研究与设计

刘国伟<sup>1</sup>, 陈宏辉<sup>1</sup>, 陈童<sup>1</sup>, 杨永<sup>1</sup>, 庞凯<sup>2</sup>, 唐志远<sup>2</sup>, 刘俊勇<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司茂名供电局, 广东 茂名 525000;

2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**针对目前中国配电网台区数据采集不全、信息化和智能化程度低、用户和电网之间缺乏交互等问题,考虑未来台区分布式可再生能源、储能系统、电动汽车等灵活性资源广泛接入对电网的冲击,以适应未来配电网电力市场化改革需求为目标,开展基于群感知技术的互动型智能台区研究与设计。首先,基于万物互联的思路构建智能台区电力物联网,实现台区负荷感知与数据监测,打通信息交互通道;然后,基于台区监测数据,设计一次能源自平衡和自趋优算法,实现台区的智能经济运行和智慧供电;最后,以信息物理系统为基础,对未来台区多能互补机制的建立进行了分析展望,力争将台区建成真正的智能体,为未来智能台区的建设发展提供可行的借鉴与参考。

**关键词:**群智感知; 智能台区; 智能体; 多能互补

中图分类号:TIM 727 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2024)03-0022-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240305

## Research and Design of Interactive Intelligent Distribution Area Based on Crowd Sensing Technology

LIU Guowei<sup>1</sup>, CHEN Honghui<sup>1</sup>, CHEN Tong<sup>1</sup>, YANG Yong<sup>1</sup>, PANG Kai<sup>2</sup>, TANG Zhiyuan<sup>2</sup>, LIU Junyong<sup>2</sup>

(1. Maoming Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Maoming 52500,

Guangdong, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University,

Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:**Due to the fact that there are the problems of incomplete data acquisition, low degree of informatization and intellectualization, and lack of interaction between users and power grids in distribution area in China, an interactive intelligent distribution area based on crowd sensing technology is studied and designed, which considers the impact of extensive use of distributed renewable energy sources, energy storage systems and electric vehicles in the future distribution area on power grids, and will adapt to the demand of electricity market reform in future distribution network. Firstly, based on the Internet of Everything, an intelligent electric Internet of Things in distribution area is constructed to realize load sensing and data monitoring, and to open up information interaction channels. And then, based on the monitoring data, the self-balancing and self-optimizing algorithm of primary energy in distribution area are designed, and the smart economic operation and intelligent power supply of distribution area are realized. Finally, based on cyber-physical systems, the establishment of multi-energy complementation in future distribution area are analyzed and prospected, which strives to build a real intelligent distribution area and provides a feasible reference for the future development and construction of intelligent distribution area.

**Key words:** crowd sensing; intelligent distribution area; agent; multi-energy complementation

## 0 引言

目前,中国 10 kV 及以上配电网的自动化技术已经得到了较为完善的发展,形成了一套较为成熟

基金项目:广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20172902)

的配电网自动化运行和管理系统,网络可靠性及智能化水平较高<sup>[1-3]</sup>。但是,中国配电网台区的发展仍处于落后状态,存在智能化、信息化程度不高,数据采集不全、数据利用率偏低等问题。许多台区无法有效采集用户的用电信息,或者虽然对用户信息进行了采集,但缺乏相应的数据挖掘与分析手段,无法

实现基于数据驱动的台区运行管理,制约了智能配电网的进一步建设与发展。此外,未来配电网将是集分布式可再生能源、储能系统、电动汽车等众多不确定性因素于一身的配电末端,如何利用多种控制手段实现其内部能源与负荷的自平衡,保证台区的安全可靠运行,减小对电网的冲击,甚至对电网的运行起到支撑作用,是一项具有重要现实意义的研究。

在实现台区经济运行方面,文献[4]立足于农网台区的经济运行水平,通过综合分析台区负荷增长率及多种状态下的变压器成本,确定台区变压器的选型及配置方法,但没有考虑分布式可再生能源的接入给变压器容量配置带来的影响。文献[5]综合考虑了变压器的全生命周期成本及分布式光伏出力不确定性,利用 Cholesky 分解与非参数和密度估计建立分布式光伏与负荷的概率模型,并采用机会约束求解配电变压器的定容问题,为台区经济运行提供理论依据。文献[6]针对具有不同无功特性的台区在进行无功补偿配置时难以进行决策的问题,先将不同的台区按地域分布及组成成分分为3类,对每种台区按其电气特征建立指标体系与基态模型,通过最优无功配置率与特征指标的相关性确定最佳的无功补偿方案,但同样没有考虑可再生能源接入的影响。

在台区数据管理与分析方面,文献[7]提出采集电能之外数据信息的重要意义,并对涉及的数据特征进行了综合分析,结合国外应用实例,对未来中国配用电信息在负荷预测、窃电分析、需求响应、分布式能源管理等方面的应用提出了相关建议。文献[8]将供电半径、配电变压器出线总截面、风期平均负载率、负荷率、年用电量增长率5个特征作为台区的特征指标,对台区的运行状况进行综合评价,从而为台区管理提供依据。

在台区自动化及智能化建设方面,文献[9]针对配电网台区自动化程度低的问题,设计了基于智能终端的台区自动化系统,通过数据采集与监测对台区运行的多种指标进行综合评估,并以此为依据下达相应的控制指令,从而提高台区的自动化水平,但没有考虑分布式可再生能源的接入与市场化信息,不能适应未来台区的发展趋势。文献[10]提出了一种三相不平衡自动检测方法,通过用户与变压器各相之间的相关系数确定用户所属相别,根据台区

配电变压器的电流数据分析三相不平衡度,并采用遗传算法求取三相不平衡度最小时对应的用户接入相别,但相序调整仍需依靠人力,自动化水平没有得到显著提升。

综上所述,目前台区运行、管理、自动化等方面的研究多基于传统台区数据采集模式,没有充分考虑未来能源发展格局<sup>[11-16]</sup>。尽管部分研究指出了大数据平台建设的重要性,但缺乏理论基础与台区实际的结合,没有真正给出实现台区与用户灵活交互的解决方案。针对目前存在的问题,有必要对台区进行智能化建设,充分应用移动互联、人工智能等现代信息技术和先进通信技术,实现台区各个环节、台区与电力用户之间万物互联、人机交互,打造状态全面感知、信息高效处理、互动灵活便携的泛在台区物联网,实现台区智能运维与自动响应,将未来智能台区打造为真正的智能体。

## 1 智能台区电力物联网构建

未来分布式光伏与风电、储能设备、电动汽车等诸多元素的接入将给台区带来两大难题:1)可再生能源发电的随机性和不确定性会加大台区运行的不确定性,可能产生双向潮流,系统运行更加复杂;2)储能、电动汽车的出现,在增大台区源荷可调节性的同时也加大了市场化交易难度。针对以上情况,充分应用移动互联、人工智能等现代信息技术和先进通信技术,实现配电网台区各元件万物互联、人机交互,搭建一种状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活的交互型泛在台区物联网,成为一种有效的可行性方案。

### 1.1 智能台区电力物联网网架结构

下面提出一种基于群感知技术的互动型智能台区物联网架构,如图1所示。图1中主站系统通过与智能台区终端互联来管控A、B、C等多个台区,每个台区配电变压器处接有智能台区终端,其后的分接箱和用户侧表箱处都独立接有分布式台区终端,且同时与智能台区终端连接,如图中台区B所示。基于传感器、网络通信、嵌入式计算等技术的网络计量,为台区用户侧能量管理和经济用电提供了低成本、易实现的解决方案。除普通台区用户类型外,某些特殊电力用户,如图示用户5,可采用分布式台区终端控制下的用户能量管理系统以实现自主能量管

控。用户以通过优化家庭用电安排来降低用电成本为主要目标,不仅能够正确的设备运行控制和可再生能源最优利用下达到电力用户侧的能源可持续性,进而减少检修或事故停电给用户带来的影响,同时通过合理配置用户储能以有效缓解光伏等微型分布式电源并网引起的电压越限和波动问题,实现清洁能源的可再生利用。为实现与用户侧的灵活互动,该系统还能向消费者反馈各类信息,如电网实时电价、用电模式、所在台区运行情况、台区检修通知、分布式能源可发电量、清洁能源利用率等,用户也可通过交互面板设置和输入数据来与台区管控进行互动。

针对集中控制的、数量庞大的台区用户群,可采用以风光互补储能系统和柴油发电为主的分布式能源台区微电网形式运作。台区微电网可采用第三方机构投资运营或用户自发自用、余电上网的自运营模式。配置监控服务器作为微电网控制中心与分布式台区终端互联,通过对储能和可调控负荷的优化控制,有效抑制分布式能源并网的不确定性波动,同时实现台区多资源的灵活、高效应用,为配电台区的智能运行与自主管控提供了新的思路。

### 1.2 智能台区物联网数据采集与通信解决方案

传统台区负荷受人类生产生活影响,具有明显

的周期性和规律性,台区负荷预测准确率高,且负荷易于管控。因此传统台区对于用户侧用电信息的感知可以仅依靠用户户外总表实现。随着可再生能源发电技术的进步和用户用电意识的提高,未来台区内用户更加倾向于户内安装光伏、风电等可再生能源发电设备以节约用电成本。典型的风电、光伏出力特性函数如式(1)和式(2)所示。

$$P_{w,t} = \begin{cases} 0 & v < v_{in}, v \geq v_{out} \\ \frac{v-v_{in}}{v_{rate}-v_{in}} P_{w,rate} & v_{in} \leq v < v_{rate} \\ P_{w,rate} & v_{rate} \leq v < v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{w,t}$ 为风电出力; $v$ 为风速; $v_{in}$ 、 $v_{out}$ 、 $v_{rate}$ 分别为风机的切入、切出风速和额定风速; $P_{w,rate}$ 为风机的额定功率。

$$P_{pv} = f_{pv} P_{pv,rate} \frac{A}{A_s} [1 + \alpha_p (T_{pv} - T_{STC})] \quad (2)$$

式中: $P_{pv}$ 为光伏出力; $f_{pv}$ 为光伏阵列能量转换效率; $A$ 为光伏的实际光照强度; $P_{pv,rate}$ 为光伏的额定功率; $A_s$ 为光伏的额定光照强度; $\alpha_p$ 为光伏的功率-温度系数; $T_{pv}$ 为光伏的实际温度; $T_{STC}$ 为标准测试环境下的光伏温度。

虽然式(1)和式(2)给出了清晰的风光发电特性,但实际运行中很难准确预测特定时段的光照强

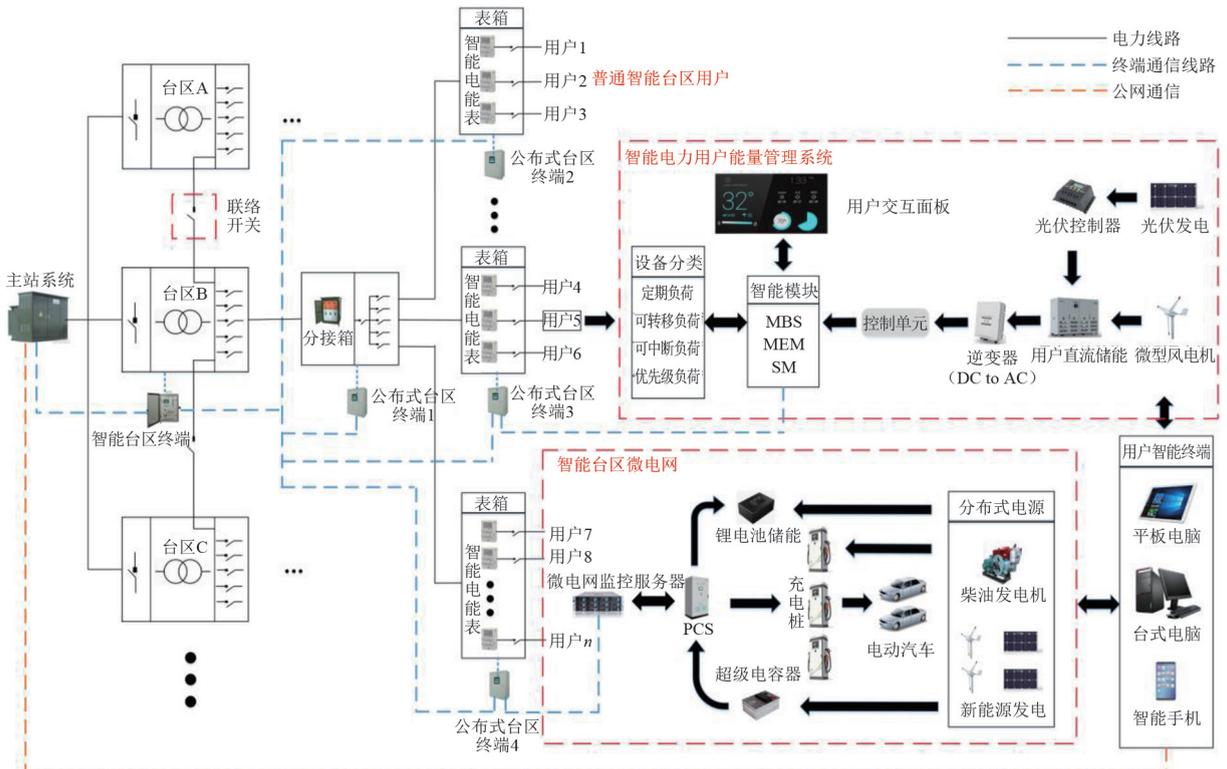
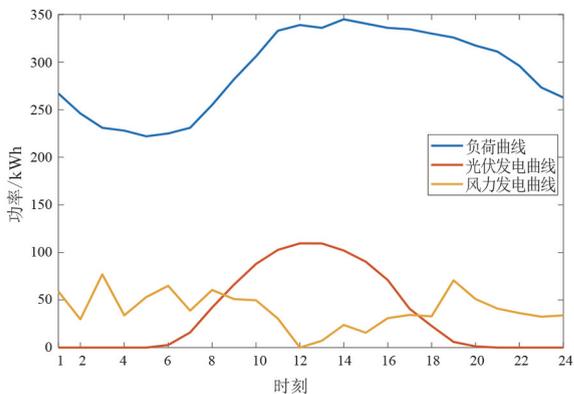
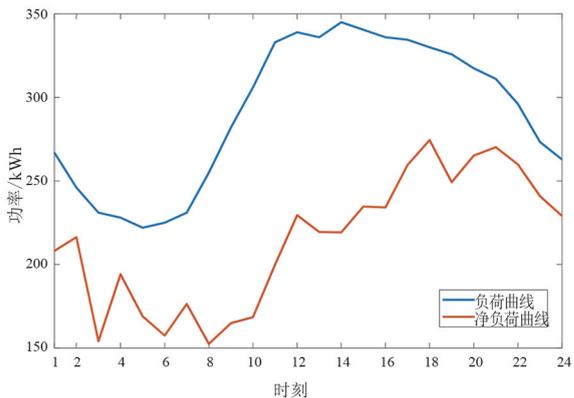


图 1 智能台区物联网整体结构

度和风速,因此风光出力具有强烈不确定性。风光不确定性会极大改变台区负荷特性,给台区管理带来不便。以中国南方某智能台区试点为例,典型负荷曲线、光伏发电曲线和风力发电曲线如图2(a)所示。可以看出,典型负荷曲线峰谷特性明显,而风力发电没有明显特点。虽然图中光伏发电曲线存在较为明显的昼夜差异,但实际上一天内光照强度变化难以准确预测,因此风电和光伏发电均存在不确定性。图2(b)为负荷曲线和考虑了风光发电以后的净负荷曲线。由于叠加了风力和光伏发电,负荷曲线产生了较大的变化,相邻时段负荷相关性减弱,给台区负荷管控带来挑战。因此亟需研究构建基于万物互联思想的智能台区物联网,实现台区态势全面感知。



(a) 典型负荷曲线和可再生能源发电曲线



(b) 典型负荷曲线和净负荷曲线

图2 负荷曲线和可再生能源发电曲线

群感知技术能够为台区提供可靠的数据采集及监测平台,为后续智能台区功能的实现提供数据支撑。所谓群感知技术,即实现对台区内所有用户、电力设备、配电线路电气量及非电气量的数据采集与信息交互,使台区作为一个智能体,能够时刻感知内部大量个体的运行情况,从而为台区智能决策<sup>[11]</sup>提供客观依据。

群感知技术依靠用户侧与台区侧的智能终端完成数据采集与通信,其逻辑架构如图3所示。

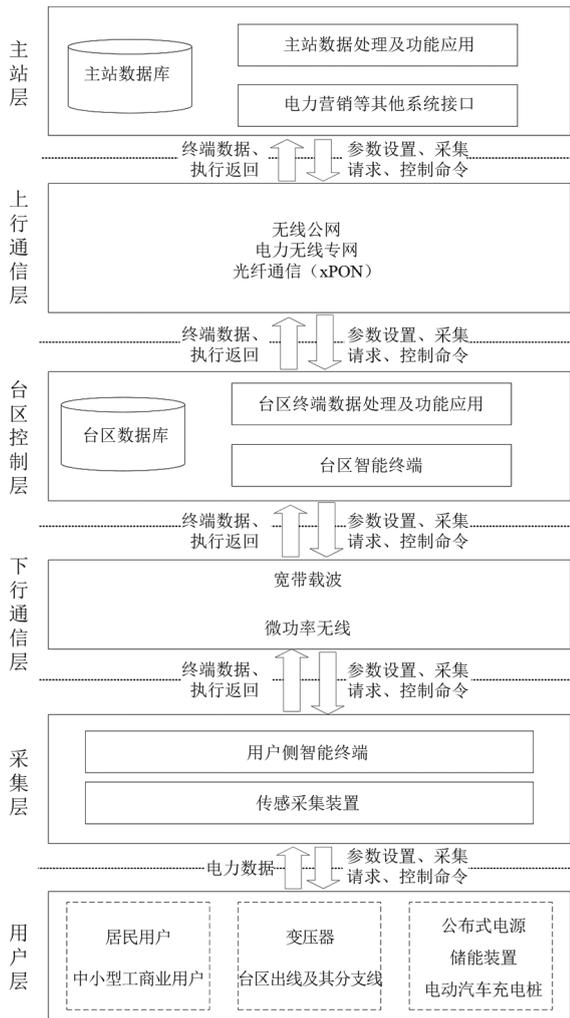


图3 群感知逻辑架构

其中,用户层是各种计量设备的采集对象,包括中小型工商业用户、居民用户、分布式电源、储能设备、电动汽车充电桩、台区变压器、台区出线及其分支线等;采集层主要为用户侧智能终端,智能终端能够获取传感采集装置上的相应数据,并通过相关通信方式将数据上送至台区智能终端,也能够根据台区控制层下发的动作指令执行相应操作;下行通信层位于用户层和台区控制层之间,其作用是满足台区终端与用户侧终端之间高效、可靠的双向通信,其通信方式有宽带载波、微功率无线等;台区控制层是智能台区配用电信息采集与管控系统的重要组成部分,也是实现台区智能化的核心,其作用是通过下行通信层汇集用户层的各类数据信息,在本地实现数据存储及分析、指令下发功能,并通过上行通信层将数据传输至主站层;上行通信层位于台区控制层和主站层之间,作用是满足台区终端与主站终端之间

高效、可靠的双向通信,通信方式有无线公网、电力无线专网、光纤通信等;主站层作为配用电信息采集与管控系统的管理和控制中心,主要功能是对台区数据的采集、传输、处理和应用以及系统安全与运行进行管控,是确保智能台区后续功能可靠实现的平台,同时能够有效地实现与其他不同系统之间的数据共享与交换。

### 1.3 智能台区负荷感知

台区负荷感知能够精准掌握各类负荷的动态特性,形成有效的统计、分析系统,对负荷预测、台区发展规划、电力市场发展提供有效的技术支持。为引导电力用户改变用电行为提供支撑,从而进一步体现台区与用户之间的交互作用,提高配电网运行的经济性、可靠性和安全性,改善用户用电体验。台区负荷感知主要涉及台区电力用户负荷分类与台区用户负荷非侵入式监测与分解。

未来智能台区将建成涵盖多种电力信息的台区大数据。针对台区电力数据海量多源异构的特点,研究适用于大规模数据的模式识别技术、聚类分析方法、数据挖掘算法,是实现台区灵活、互动的智能用电控制的关键,而对台区负荷数据进行分类是配用电数据挖掘的基础。精确的负荷分类有助于把握电力用户的用电习惯,感知其潜在的用电特性,对平衡台区电力供需、识别用户用电模式、评估需求响应能力、削峰填谷等具有重要意义<sup>[12]</sup>。典型负荷分类如图 4 所示。

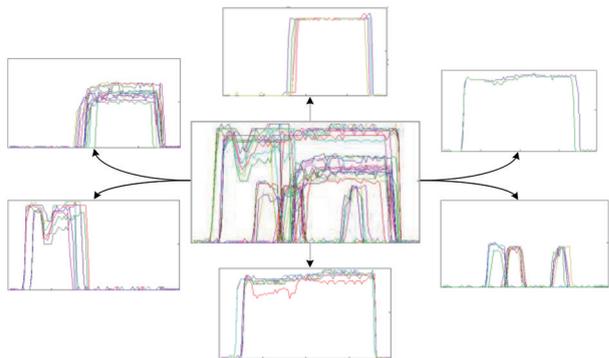


图 4 负荷分类效果

实现用户内部用电负荷监测方式有侵入式与非侵入式两种。侵入式负荷监测主要研究组网方式及数据传输策略,依靠安装在用电设备处的传感器实现用电信息的采集,采集准确率高,易于后续数据分析工作的开展,但存在易引起用户反感、设备安装成本高昂、数据量过大、可靠性难以保证等问题。非侵

入式负荷监测与分解主要研究基于变点和人工免疫算法的事件检测方法、综合考虑稳态特征和暂态特征的特征提取技术,研究提高基于监督学习和非监督学习的负荷识别精度的技术。通过安装在用户进线处的非侵入式负荷监测与分解装置获取用户的特征信息,通过对特征信息的处理与分析获取用户内部用电设备的工作情况,这种方法准确率稍低,但大大减少了所需的设备成本,能够顺应未来智能台区的发展趋势,是构建智能台区物联网的重要环节。

## 2 基于电力物联网的台区智慧供电

### 2.1 智能台区安全及经济运行基础技术

作为集传统能源负荷与新型能源负荷于一体的智能体,智能台区不仅要达到传统自动化台区的要求,还必须突破现有电力环境的约束,着眼于未来将要面临的问题,实现自身安全、高效运行的同时也有必要为区域大电网提供一定支撑,提高区域配电网的可靠性和经济性。以上述目标为导向的智能台区物联网应具备台区自动识别、台区网络重构与自愈、一二次信息融合的智能台区多维度预警、快速定位与故障隔离、状态检修、基于大数据的配变容量调整与窃电技术、基于图像识别的一键顺控技术等功

### 2.2 台区一次能源的自平衡与自趋优

未来智能台区将转型成为由分布式电源、储能装置、能量转换装置、监控和保护装置等组成的源、荷、储一体化小型配用电系统,高渗透率可再生能源和储能的接入将为配电网规划和台区管控带来了诸多亟待解决的技术问题。考虑到以下特点:1) 低压台区电压等级低,系统容量较小;2) 采用清洁环保的可再生能源为主的多能源联供辅助发电形式;3) 台区内部多资源配置可协调满足基本电力供需平衡,可支撑离网状态的台区独立运行;4) 为减少分布式发电大规模接入对电网造成的冲击,通过对台区下源、荷、储的协调控制来实现与配电网交换功率的实时灵活调控。并基于上述特点,针对用户群较大的台区搭建微电网系统进行集中管控,以此作为台区用户侧大量可再生能源接入配电网的一种有效形式。

台区微电网系统自主完成台区供电、分布式电源发电、储能充放电以及用户用电的统一优化管控,实现台区一次能源的自平衡消纳。在此基础上,根

据用户特点,可设定个性化的优化运行目标,并融入电价激励等需求响应机制,微电网动态调整运行决策方向以进一步实现能源自趋优利用,即在保证一定可再生能源利用率的前提下,微电网自适应选择充电来源并积极调节台区下储能的充放电功率以降低用户用电成本,并配合用户侧负荷需求以实时响应台区供电侧电价信号,同时达到辅助台区改善负荷特性、提升电压质量、降低线损以及平滑分布式发电出力等目标。

可以预见,为了实现实时优化运行,未来智能台区将采用在线优化方法在台区可再生能源出力、储能充放、用户负荷与电价数据随时间逐步获取的情况下,为台区一次能源自平衡、自趋优提供可行的执行策略。传统地,区域优化问题多采用物理确定性模型,通过建立数学方程来描述物理问题。然而这种基于模型的方法主要存在4个方面的缺陷:1)严重依赖领域专家来建立各个主体合适的模型和参数,其中完全物理模型的复杂性和引入的非线性特性对算法的计算可处理性提出了挑战。2)一旦台区的结构和规模改变,数学模型和参数都会受到影响。同时随着不确定性分布的变化,基于模型的控制与预测器需要被重新设计,这既不经济也不易维护。3)由于台区的不完全可观测性,模型通常采用迭代求解,此时算法的收敛性只能在一些严格的前提下得到保证。4)实时在线应用几乎是不切实际的,因为多个主体的迭代交互十分复杂,耗时耗力。综上所述,未来智能台区的自平衡、自趋优问题难以用传统优化方法求解。

近年来机器学习快速发展,其强大的感知学习能力和数据分析能力契合了智能电网中大数据应用的需求。其中强化学习(reinforcement learning, RL)通过决策主体和环境之间的不断交互来获取环境知识,并采取影响环境的行动以达到预设目标。RL通过求解贝尔曼方程得到最优的动作价值,如式(3)所示。而深度学习(deep learning, DL)不依赖于任何解析方程,是利用大量的现有数据来描述数学问题和近似解,将其应用于RL中可以有效缓解价值函数求解困难等问题。

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \lambda \cdot [r_t + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)] \quad (3)$$

式中: $s$ 和 $s'$ 为当前时刻和下一时刻的环境状态向量; $a$ 和 $a'$ 分别为当前时刻和下一时刻主体的执行

动作; $r_t$ 为动作执行后反馈的即时奖励; $\lambda$ 为学习率; $\gamma$ 为未来奖励的折扣因子。

作为一种DRL方法,深度Q网络(deep q-network, DQN)通过结合一种从环境状态到行为的深度神经网络(deep neural network, DNN)映射,大大提高了传统强化学习的性能。DQN的训练流程如图5所示。这种基于无模型强化学习和数据驱动的台区优化方法,将具备更高的计算效率和可观的拟合精度,且自适应能力较强。

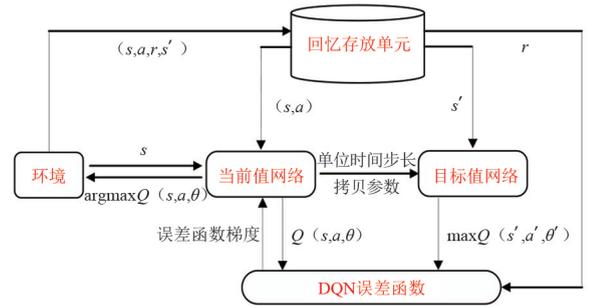


图5 DQN训练过程

未来智能台区中,各主体可以通过不断感知负荷需求与可再生能源波动等台区环境状态,在控制目标下与环境进行交互得到反馈奖励。DQN以感知的系统环境状态特征向量 $s$ 作为网络输入,直接输出最优动作价值 $Q(s, a)$ ,并通过回放交互数据来迭代训练映射网络,最终实现算法收敛。

### 2.3 智能台区电力用户需求响应

未来台区下大量分布式发电和储能的接入为电力用户与台区之间的交互提供了更多可能,用户可以根据自身意愿,主动参与到台区运行当中,进一步实现数据信息的广泛交互,但这也为配电网规划和台区管控方案的选择带来诸多亟待解决的问题。随着智能电网和电力市场的发展与完善,传统仅依靠电力供应侧的调整和控制无法解决的问题能够通过需求侧响应得到明显改善,人们对需求侧资源有了新的认识,竞争性市场中的需求侧资源开始逐渐扮演起重要角色。通过实施价格型或激励型需求响应,引导需求侧资源参与电力系统运行,对供应侧和需求侧资源进行综合规划是未来电力系统的发展趋势。

家庭用户作为未来智能台区需求侧重要的主体,对家庭用户的资源进行管理将成为智能台区充分挖掘用户侧响应资源的重要方式<sup>[13]</sup>。

针对电力需求较高的台区用户,搭建基于灵活互动台区管理体制下的智能电力用户能量管理架

构,通过家庭智能设备(intelligent device, ID)、无线配电盘(wireless switch board, WSB)、微型电能管理器(micro energy manager, MEM)、分布式发电与储能单元传感控制技术及通信技术,利用高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)实现智能用户内部用电量数据、设备运行数据、家用储能数据、微型分布式发电数据、电能质量数据以及环境数据全方位感知,实现台区“用户能量情景知晓”<sup>[14]</sup>,为台区需求响应提供强大的数据支撑。每个用户空间中的 ID 和 WSB 能够感应各种设备的开启和关断,其中 ID 的感应模块自动完成其高负载电耗的测量,WSB 则完成小功率负荷用电的监测,两者同时将所测数据无线传输 MEM。MEM 能与一个房间或几个房间中的 IDs 和 WSBs 进行交互并实施控制,它不仅是用户节点的量测终端,也是路由器向分布式台区终端发送的路由数据。为有效管理可再生能源,根据设备类型、负荷水平、使用区域、运行时间等可辨别特征来对用户设备进行分类,按用电量大小划分负载耗能等级,进一步划分定期负载、用户优先级负载、可再生能源中断时按设定优先级顺序延迟运行的保留负载。

分布式台区终端接收用户输入的设备用电参数和电费计划信息,根据清洁能源的可用性,配合台区主站调控自主完成智能用户下可调负荷的切断与转移、家庭用电来源切换、用电量优化控制以及电动汽车充放电策略等,对用户内部系统用电行为进行灵活高效的引导,不仅能有效降低用户用电成本,而且能改善台区负荷特性,促使台区经济高效运作。台区与家庭的双向互动可以引导用户主动参与智能台区的建设和管理,为用户提供更加智能友好的供电服务。

### 3 智能台区多能互补研究

智能台区不仅包含“电”这一概念,更是一个“能源”概念。未来的台区必将形成风-光-热-电-气-储多种能源互相支撑、互为补充的格局。21 世纪是信息的时代,未来台区内的多种能源形式很难通过物理层面的连接形成完整的系统,但信息的传输不受限制。因此,信息物理融合系统(cyber-physical systems, CPS)是实现台区能源互联的重要基础<sup>[15]</sup>。

#### 3.1 面向智能台区的信息物理融合系统

相对于传统台区而言,智能台区下覆盖范围扩

大,其传感器、决策单元的数量大大增加使得二次信息网络规模也不断扩大,这使得传统台区管理模式将无法适应未来台区下接入资源的多样化和运行环境的复杂化,台区智能化建设亟需一种运算能力更加强大、通信技术和控制技术更为先进的监控系统,信息物理融合系统通过 3C (computing、communication、control) 技术的有机融合与深度协作而实现复杂系统的实时感知、动态控制和信息服务,正好满足智能台区发展要求,其架构如图 6 所示。

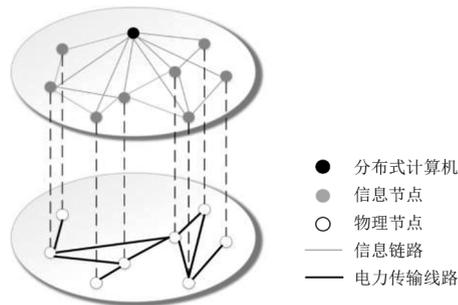


图 6 信息物理融合系统架构

台区 CPS 物理层主要包括对应台区物理节点所有的测量、传感装置以及执行装置,信息系统包括台区通信系统和计算控制系统。台区 CPS 运行过程中,物理层的传感器实时感知台区运行环境并采集数据信息,底层信息将通过通信网络在相邻节点间传输并由分布式计算主机获取,本地处理器迅速响应主站和用户需求以调整内部关联关系作用于执行器动作,台区主站可以根据全局状况对执行器的响应策略进行控制。

CPS 不仅能高效可靠实现台区的多维度安全预警、故障快速定位隔离、设备智能运维和台区网络自愈等功能,同时它也是所提台区微电网与用户能力管理系统一体化精准管控和深度协作的强有力技术支撑,CPS 对台区的计算、通信、控制能力进行深化改造,全面提升台区智能化和自动化水平。

#### 3.2 基于 CPS 的智能台区多能互补运行

目前,能源互联网的研究处于起步阶段,还有许多问题亟待解决。其中一个关键的问题是信息系统与能量系统的交互。智能台区依靠大量采集、传输、存储设备实现内部万物互联,基于海量数据构建台区物联网,为台区实时监测与控制运行奠定基础,也为云计算、大数据等新兴技术提供了接口。面对每时每刻都在产生的庞大“数据流”,必须有可靠、安全、高效的信息系统与之配合,提高信息实时传输、

计算能力,打通“信息流”与“能量流”的交互通道,实现信息和能量的紧密耦合,打造台区全信息共享体系。CPS是解决上述问题的途径之一,基于CPS的台区多能互补运行能够促进不同能源系统间的信息交互,实现不同信息的深度融合,构建高效健全的能源供应-需求体系。

## 4 算例分析

### 4.1 算例系统

选取如图7所示34节点主动配电网作为算例,基于搭建的智能台区管控框架,以24h为例,展示台区智能经济运行效果。该算例含有5个光伏发电电源、2个蓄电池和2个微型燃气轮机。各分布式电源的参数配置如表1所示。日负荷曲线和光伏发电出力曲线如图8所示。

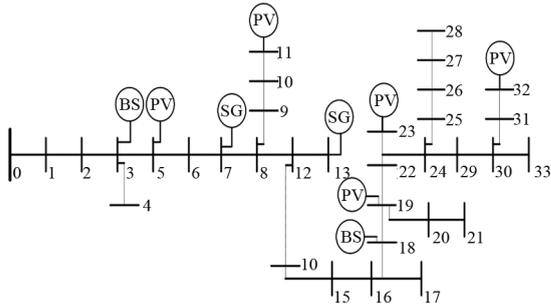


图7 配电网算例结构

表1 分布式电源参数配置

设备	连接节点	额定功率/kW	容量/kWh
光伏	5,11,19,23,32	6	—
微型燃气轮机	7,13	10	—
蓄电池	3,18	8	56

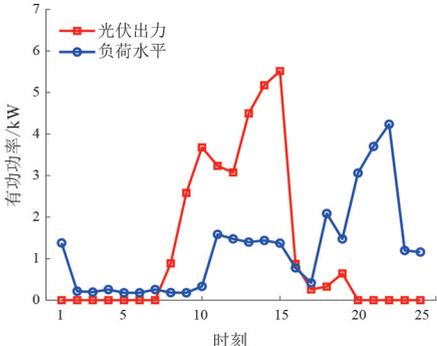


图8 日负荷及光伏出力曲线

### 4.2 仿真分析

基于所提智能台区管控框架设计,对台区智能经济运行效果进行如下展示。

台区需求响应能力量化评估:根据台区分布式电源配置情况,结合负荷及光伏出力精准预测,在保

证配电网电能质量的情况下对台区需求响应能力进行快速量化评估,结果如图9所示。

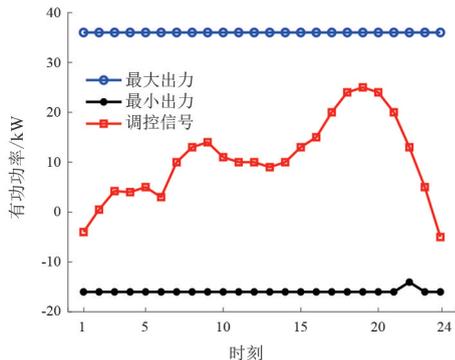


图9 台区需求响应边界及调控出力曲线

台区智能经济运行:电力市场环境下,台区根据自身需求响应调节能力,参与电力市场交易。根据交易结果,对台区分布式可控资源进行经济调度,调控信号见图9,分布式电源经济调度结果如图10所示。

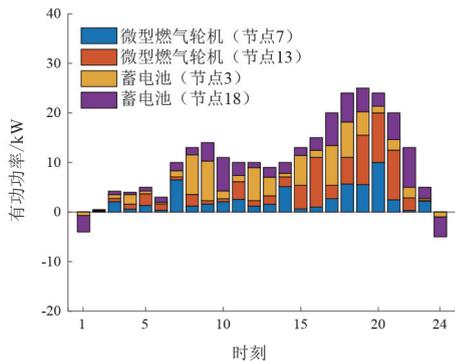


图10 分布式电源时序最优出力

## 5 结论

上面提出了一种基于群感知技术的互动型智能台区架构方案,对其组成架构以及功能实现进行了简要阐述。对未来智能台区在实现能源系统的自平衡与自趋优运行、实现清洁能源消纳大背景下综合资源的最优规划与管控、建立智能台区电力市场模式等目标的过程中所面临的问题进行了分析,对解决这些问题所需的关键技术进行了分析。

所提的智能台区架构方案需大量智能台区设备支撑实现,距离现实应用尚有一定距离。此外,对于如何具体利用DQN算法准确识别跨台区用户信息,彻底解决跨台区用户归属难题还需要进一步研究。

### 参考文献

[1] 沈兵兵, 吴琳, 王鹏. 配电自动化试点工程技术特点及

- 应用成效分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 27-32.
- [2] 沈郑毅, 刘天琪, 洪行旅, 等. 中心城市大型配电自动化设计方案与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 49-53.
- [3] 彭晖, 任远, 宋鑫, 等. 基于双核架构的分布式地县配一体化技术支持系统设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 75-80.
- [4] 寇凌峰, 梁英, 王金丽, 等. 计及负荷增长风险的配电变压器选型方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1384-1389.
- [5] 杨楠, 李宏圣, 袁景颜, 等. 计及不确定性和全寿命周期成本的配电变压器规划方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 94-104.
- [6] 欧阳森, 陈欣晖. 考虑基态-差异化特征的台区无功优化配置策略[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3513-3519.
- [7] 王鹏, 林佳颖, 郭岫, 等. 配用电数据分析及应用[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3333-3340.
- [8] 欧阳森, 杨家豪, 耿红杰, 等. 面向台区管理的台区状态综合评价方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 187-192.
- [9] 汤毅, 程乐峰, 李正佳, 等. 基于智能台区的配电网经济运行及优化高级分析系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 150-158.
- [10] 耿俊成, 马文栋, 郭志民, 等. 基于智能电表大数据分析的台区变压器三相不平衡治理[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 103-108.
- [11] 段祥骏, 王金丽, 冯德志, 等. 配电台区建设与改造智能决策系统设计和实现[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2709-2715.
- [12] 朱文俊, 王毅, 罗敏, 等. 面向海量用户用电特性感知的分布式聚类算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 21-27.
- [13] 武东升. 家庭能量管理系统用电与电能调度优化策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [14] 张新昌, 周逢权. 智能电网引领智能家居及能源消费革新[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 59-67.
- [15] 高慧, 黄春艳, 周鑫, 等. 基于紧迫度的城中村台区改造优先级评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 158-165.
- [16] 秦博雅, 刘东. 电网信息物理系统分析与控制的研究进展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5816-5827.

#### 作者简介:

刘国伟(1978), 男, 高级工程师, 从事配电网管理和智能配电网研究工作。

(收稿日期: 2023-08-09)

(上接第 12 页)

- [3] 苗长越, 王维庆, 王海云, 等. 光伏接入对系统小干扰稳定的影响研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 211-215.
- [4] 张凌浩, 张明, 嵇文路, 等. 基于灰色关联理论和 BP 神经网络的分布式光伏电站运维数据虚拟采集方法[J]. 电力建设, 2021, 42(1): 125-131.
- [5] 郭辉, 杨国清, 姚李孝, 等. 基于综合相似日和功率相关性的光伏电站预测功率修正[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(9): 52-58.
- [6] ALMONACID F, PEREZ-HIGUERAS P J, PERNANDEZ E F, et al. A methodology based on dynamic artificial neural network for short-term forecasting of the power output of a PV generator[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 85(9): 389-398.
- [7] 叶林, 裴铭, 路朋, 等. 基于天气分型的短期光伏功率组合预测方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 44-54.
- [8] 李燕青, 杜莹莹. 基于双维度顺序填补框架与改进 Kohonen 天气聚类的光伏发电短期预测[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 60-65.
- [9] 祝暄懿, 姚李孝. 基于相似日和小波神经网络的光伏短期功率预测[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(3): 75-78.
- [10] 李正明, 梁彩霞, 王满商. 基于 PSO-DBN 神经网络的光伏短期发电出力预测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 149-154.
- [11] 葛磊蛟, 秦羽飞, 刘嘉恒, 等. 基于相似日与 BA-WNN 的分布式光伏数据虚拟采集方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 8-16.
- [12] KUREMOTO T, KIMURA S, KOBAYASHI K, et al. Time series forecasting using a deep belief network with restricted Boltzmann machines [J]. Neurocomputing, 2014, 137(15): 47-56.
- [13] NAIR V, HINTON G E. Rectified linear units Improve restricted Boltzmann machines [C] // Proceedings of the 27th International Conference on International Conference on Machine Learning (ICML-10), June 21-24, 2010. Haifa, Israel.
- [14] AMINI M H, MOGHADDAM M P, KARABASOGLU O. Simultaneous allocation of electric vehicles' parking lots and distributed renewable resources in smart power distribution network[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 28: 332-342.
- [15] 阮仁俊, 陈焯, 刘天琪. 基于混沌理论和排序选择的蚁群无功优化算法[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 49-54.

#### 作者简介:

张 华(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网物联网、电力系统分析等;

李世龙(1989), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为数字化配电网与配电网运行控制;

龙 呈(1987), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网运行及自动化。

(收稿日期: 2023-06-09)