

5G 通信基站参与需求响应: 关键技术与前景展望

雍培, 张宁, 慈松, 康重庆*

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

5G Communication Base Stations Participating in Demand Response: Key Technologies and Prospects

YONG Pei, ZHANG Ning, CI Song, KANG Chongqing*

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments

(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The 5th generation mobile networks (5G) is in the ascendant. The 5G development needs to deploy millions of 5G base stations, which will become considerable potential flexibility resources for power systems. Meanwhile, dispatching 5G base stations to participate in demand response can significantly reduce the 5G-power consumption cost. Therefore, 5G base station dispatch can achieve a win-win situation between communication systems and power systems. This paper introduced the essential equipment and power consumption characteristics of 5G base stations and investigated their demand response potential. Then, the key technologies for 5G base station to participate in demand response was analyzed. Further, the application scenarios to dispatch 5G base stations as demand-side resources were considered. Finally, potential business models were discussed.

KEY WORDS: 5G communication; 5G base station; energy internet; energy management; battery energy storage; demand response

摘要: 第5代移动通信技术(5th generation mobile networks, 5G 通信)发展方兴未艾。5G 网络的普及需要建设大量的 5G 基站, 这些海量的 5G 基站将在未来成为可观的潜在灵活性资源。5G 基站参与需求响应, 即对于 5G 基站中的供电设备和用电设备进行调度, 能够在降低 5G 用电成本的同时, 为电力系统提供灵活性资源, 实现通信系统与电力系统的双赢。该文总结了 5G 基站的基本组成设备和用电特性, 分析了其参与需求响应的潜力; 梳理了 5G 基站参与需求响应所必需的关键技术; 展望了 5G 基站作为需求侧资源参与电力

系统互动的应用场景; 最后, 对于 5G 基站参与需求响应潜在的商业模式进行探讨。

关键词: 5G 通信; 5G 基站; 能源互联网; 能量管理; 储能电池; 需求响应

0 引言

第 5 代移动通信技术(5th generation mobile networks, 5G 通信)相比于前代技术, 具有“高带宽、大容量、高可靠性、低延时、低功耗”的特点^[1], 将提供更优秀的通信质量和更丰富的应用场景, 推动经济和社会的快速发展。近年来 5G 技术的研发和推广方兴未艾。2015 年, 国际电信联盟(international telecommunication union, ITU)正式将 5G 通信的法定名称确定为“IMT-2020”。2017 年, 第三代合作伙伴计划(3rd generation partnership project, 3GPP)启动 5G 标准的制定工作, 并于 2019 年 3 月和 2020 年 7 月分别发布了 Release 15 版本和 Release 16 版本的 5G 标准, 推进 5G 技术规范的全球统一。世界各国均积极推动 5G 通信的技术研发和商业部署, 美国、德国、日本、韩国等纷纷公布各自的 5G 发展计划。截至 2020 年 11 月中旬, 全球已有 52 个国家和地区的 125 家运营商推出了符合 3GPP 标准的 5G 商用服务^[2]。

我国在 5G 技术积累、商用推广和设施建设方面位于世界前列^[3]。国家“十三五”规划纲要明确提出“积极推进第五代移动通信(5G)和超宽带关键技术研究, 启动 5G 商用”的目标。2019 年 6 月 6 日, 工信部正式向中国电信、中国移动、中国联通和中国广电发放了 5G 商用牌照, 标志着我国正式进入 5G 商用元年^[4]。作为保障 5G 网络覆盖的重要

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作研究项目(52061635101); 内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0018)。

Project Supported in Part by the International (Regional) Joint Research Project of National Natural Science Foundation of China (52061635101); The S&T Major Project of Inner Mongolia Autonomous Region in China (2020ZD0018).

环节, 5G 基站建设得到高度重视。2020 年 3 月 4 日, 中央政治局常务委员会明确提出“加快 5G 网络、数据中心等新型基础设施建设进度”。截至 2020 年 9 月, 我国已累计开通 5G 基站 69 万座, 占全球比重近 7 成, 终端连接数超过 1.8 亿个^[5]。据估计, 到 2030 年, 我国建成 5G 基站数量将会突破千万^[6]。

建设海量的 5G 基站保障了 5G 网络覆盖, 但同时也会导致通信运营商的用电成本成倍上升^[7]。一方面, 当前单个 5G 基站的满载功耗约为 4kW, 相当于 4G 基站的 3 倍; 另一方面, 5G 基站的建设数量也将大大超过 4G 基站。因此, 通信运营商需要寻找有效降低用电成本的办法。当前主要采取的方法为: 在不影响通信服务的前提下, 通过动态关闭部分设备与功能, 或者动态调整设备功耗, 达到节能目的^[8]。虽然上述思路已经取得了一定效果, 但是 5G 基站用电成本仍然显著高于 4G 基站。高昂的用电成本或将成为制约 5G 通信进一步发展的瓶颈之一。

5G 基站参与需求响应是降低用电成本的潜在途径。其中, 本文中所指的电力需求响应为广义上的需求响应, 包括了调度用户侧的灵活性资源参与到电力系统运行中的一系列应用, 例如电网调峰、辅助服务等。5G 基站建设时均装设了储能电池作为不间断电源(uninterruptible power supply, UPS), 同时基站设备功耗本身可调节, 因此在保证供电可靠性和通信服务质量的同时具有一定的用电灵活性。通过充分发掘 5G 基站的用电灵活性, 通信运营商可以参与到电网需求响应中, 降低基站的用电价格或获取相应的需求响应补贴, 从而有效缓解 5G 基站用电成本过高的问题。

对于电力系统而言, 利用 5G 基站提供的灵活性资源, 能够促进可再生能源消纳。为应对大量可再生能源并网带来的强不确定性, 电力系统需要更多的灵活调节资源来实现发电和负荷的实时平衡^[9]。虽然单个 5G 通信基站的功率较小, 但是 5G 基站的总数量庞大, 属于典型的分布式资源。如果能够有效对海量 5G 基站进行协调调度, 充分发挥其用电灵活性, 则可以形成可观的聚合效应, 为消纳可再生能源提供支撑。

国内外部分企业已经开展了控制通信基站与电网互动的尝试。日本最大的通信运营商 NTT DOCOMO 公司开展了“绿色基站”的技术验证^[10]; 南非 MTN 公司采用华为 PowerStar 技术, 实现基站

能量动态管理^[11]; 南方电网启动了“通信基站闲散储能”示范项目。然而当前各种项目仍以示范和技术验证为主, 尚未开展大规模商业应用。主要原因如下: 前代基站体量较小, 且用电负荷相对稳定, 开展需求响应潜力不足; 其次, 部分关键技术仍不成熟; 再次, 缺乏有效的运营和商业机制, 盈利模式不清晰。此外, 大多数项目在调度基站储能电池时, 电池可能无法同时兼顾 UPS 供能, 难以协调供电可靠性和参与需求响应的经济性。

5G 基站参与需求响应, 可实现电力系统与通信系统的有效互动, 促成双方的合作共赢。当前仍鲜有文献对于 5G 基站参与需求响应进行探究, 因此有必要梳理其关键性技术, 分析其发展前景。本文介绍了构成 5G 基站的基本设备, 基于 5G 基站的用电特点分析了其参与需求响应的潜力; 梳理了实现 5G 基站参与需求响应的关键技术; 展望了 5G 基站作为需求侧资源参与电力系统互动的应用场景; 最后, 探讨了 5G 基站参与需求响应潜在的商业模式。

1 5G 基站基本构成与特点

为满足大容量、低时延的通信要求, 新设备的投用使得 5G 基站性能相比于前代基站取得了显著提升。同时, 新设备也使得基站的用电负荷特性发生变化。在 5G 技术框架中, 5G 基站包含宏基站和微基站, 其中宏基站用于广域覆盖, 功耗大; 微基站用于室内补盲, 功耗小。宏基站开展需求响应的潜力更大, 本节主要对目前主流的商用 5G 宏基站进行分析。

1.1 5G 基站的基本构成

5G 基站设备主要包括供电设备和通信设备两类, 此外还需安装照明、空调设备等。其中, 供电设备包含电源和储能电池; 通信设备主要包括有源天线单元(active antenna unit, AAU)、基带单元(base band unit, BBU)和网络传输设备。5G 基站的典型组成如图 1 所示。

通信设备负责收发无线信号, 对于信号进行处理, 并接入 5G 核心网, 是移动终端与 5G 网络间的接口。BBU 用于实现基带数字信号处理, 功能包括快速傅里叶变换/逆变换、调制/解调、信道编码/解码等。传输设备用于实现 5G 网络接入, 按照规定的协议与模式同 5G 主干网络交互。AAU 由天线阵列和前代基站的射频单元集成而来。其中, 为了

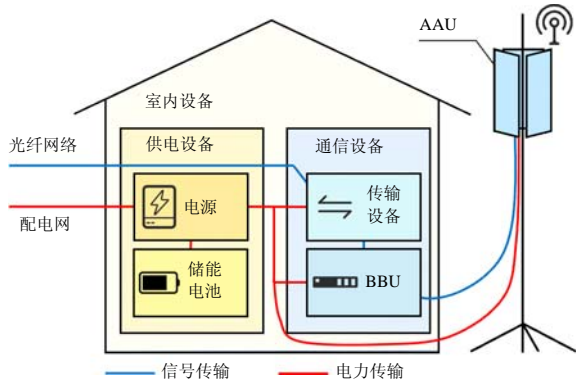


图 1 5G 基站的典型设备
Fig. 1 Typical equipment of 5G base stations

提高信道容量，5G 通信使用多天线组成的天线阵列代替了传统天线，从而实现了多进多出(multiple-in multiple-out, MIMO)技术^[12]。AAU 的发送(下行)功能将数字中频信号通过数模转换模块转换为模拟信号，使用射频模块将其调制为射频信号，经过功率放大器进行放大后，由天线阵列发射；同时，接收(上行)功能接收空间中的无线电信号，并逆向将其转化为数字信号。

供电设备负责为基站中的通信设备提供直流电。其中外部电源是主要的供电途径，将配电系统中的交流电转换为直流，供给各通信设备；储能电池是后备供电途径，当配电系统发生故障停电时，由储能电池给设备供电，保障通信服务不受影响，提高可靠性。传统铅酸电池能量密度较低，很难适应 5G 基站需求，使用性能优良的锂离子电池作为基站备用电源已经逐渐成为主流^[13]。随着近年来电动汽车的快速发展，回收梯次利用退役动力电池作为基站储能，能够有效降低投资成本^[14]。作为中国最大的基站运营商，中国铁塔公司已经在 2018 年已停止采购铅酸电池，统一采购梯次利用的动力锂离子电池^[1]。

1.2 5G 基站负荷需求

5G 基站的负荷需求根据供电的形式可以分为交流负荷和直流负荷。交流负荷主要包括照明负荷、空调负荷等维持基站室内环境的用电负荷；直流负荷是基站内负荷的主要形式，由 AAU 负荷、BBU 负荷、传输设备负荷以及其他部分如直流电源损耗等组成，如图 2 所示。

5G 基站用电设备中，耗电量最大的为 AAU，占到总用电量的约 90%^[8]。AAU 的功耗随基站的通信负载变化而变化。从用途上来看，AAU 的功耗可以进一步分为功率放大、小信号、数字中频和电

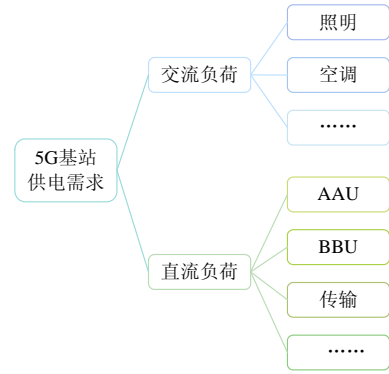


图 2 5G 基站的负荷组成

源功耗。图 3 给出了不同通信负载率下的 AAU 功耗分布。不同负载率下，功率放大模块的功耗变化最明显：满载条件下，可占到总功耗的 58%；而空载条件下，仅占 15%。相比之下，其他用电设备(包括直流设备如 BBU、传输设备等和交流设备如照明、空调等)的负荷随通信负载率的变化则较小。

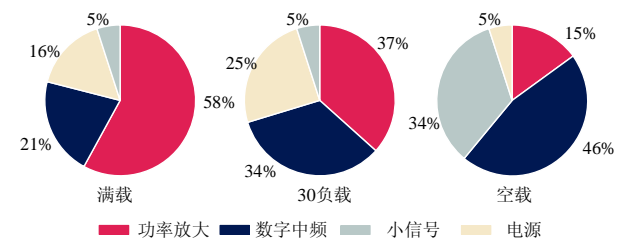


图 3 不同负载率下的 AAU 功耗分布

Fig. 3 Power consumption distribution of AAU under different load rates

作为 5G 基站功耗的主要组成部分，AAU 功耗随基站的通信负载变化的特点使得 5G 基站的用电特性显著受到通信负载的影响。相比而言，前代技术基站的用电设备则功耗更加稳定。根据爱立信公司测试结果，5G 基站的用电负荷与通信负载近似呈一次线性关系^[15]：

$$P_b = \alpha_b + \beta_b T_b \tag{1}$$

式中： P_b 为基站用电负荷； T_b 为为基站通信负载， α_b 和 β_b 为常系数。在不同负载工况下，基站的用电功耗不同；通信忙时的基站功率显著高于通信闲时。

5G 基站负荷受通信负载影响的特性使得其存在参与需求响应的潜力。一方面，基站设备的功耗具有一定的调节灵活性；另一方面，通信负载在一天中变化导致基站设备功耗在各个时段不同，相应地保障基站供电可靠性所需的储能电池最小备用容量在各个时段也不相同。可以根据基站的通信负载大小，动态地将储能电池的容量分为两部分：一部分作为供电后备；另一部分作为灵活调度资源。

因此, 可以将 5G 基站的储能电池当作一种容量时变的储能, 参与到需求响应中。

2 5G 基站参与需求响应关键技术

5G 基站参与需求响应需要有一系列关键技术作为前提。本节主要讨论需要开展的相关研究和技術实现, 包括基站设备功耗管理、储能电池能量管理、储能电池可调度容量评估、通信负载预测和基站聚合与协同调度。基站设备功耗管理和储能电池能量管理是 5G 基站用电调控的直接技术; 储能电池可调度容量评估用于评价在保障基站供电可靠性前提下, 储能电池的调度可行域; 通信负载预测用于估计 5G 基站用电负荷, 服务于储能电池的可调度容量分析; 基站聚合与协同调度用于实现海量 5G 基站的协同。

2.1 基站设备功耗管理

基站设备的功耗管理是基站参与需求响应的前提之一。其可提供一定的基站功耗调节空间, 同时实现有效节能, 减少运营商电费支出。当前主要的基站功耗管理技术包括, 亚帧关断、通道关断、深度休眠、载波关断、4G/5G 共模基站协同、下行功率调控等, 具体介绍如下:

亚帧关断: 在发送信号过程中, 检测到部分下行亚帧无数据发送时, 可在对应周期内将功率放大器射频模块关闭, 从而降低射频组件功耗。亚帧关断适用于业务对于时延较不敏感的场景。

通道关断: 5G 基站实现了多通道信号传输, 在通信负载较轻时, 可以关闭或休眠部分射频通道。当前已经实现了在指定时间按照预先设定的程序关断部分通道, 即通道的静态关断; 如何根据实时需求动态实现通道的开启和关闭将是未来的研究方向。

深度休眠: 当 5G 网络中没有用户时, 关闭 AAU 所有可关闭的模块, 包括数字中频、功率放大器等, 只保留用于唤醒的基本数字接口, 使得 AAU 进入深度休眠。对于宏基站和微基站共同覆盖的区域, 可在通信闲时让微基站 AAU 进入深度休眠模式。

载波关断: 在多频段共同覆盖的场景下, 可以在通信负载较低时关闭部分载波, 仅保留一个频段, 以维持少量的信号传输; 当负载升高时, 再开启全部载波, 提供大容量通信。

4G/5G 共模基站协同: 对于 4G 和 5G 重叠覆盖的区域, 在仅使用 4G 网络即可满足通信需求的

场景下, 可动态地关断和开启 5G 网络。

下行功率调控: 在满足用户通信需求的前提下, 5G 通信支持用户级的发射功率调整。例如, 对于距离基站空间距离近且信道良好的用户, AAU 的功率放大器可调低对应的发射功率, 从而实现基站功率调控。

目前虽然通信运营商和设备厂商已经开发了多项功耗管理技术, 但各项技术没有得到较好的整合, 且功耗管理流程均需预先设定。如何根据实时的通信负载情况, 动态结合不同时间尺度和空间尺度的功耗管理技术, 实现基站功耗的最优管理, 将是下一步研究的重点目标^[8]。

2.2 基站储能电池能量管理

5G 基站储能电池是基站参与需求响应的重要设备。储能电池的频繁调度需要通过电池能量管理系统(battery management system, BMS)实现。尤其在大量使用梯次利用的退役动力电池作为基站储能的情况下, BMS 的重要性凸显。

BMS 涉及的主要技术包括状态监测、电池保护、电量状态(state of charge, SoC)估计、健康状态(state of health, SoH)估计、充放电控制、温度管理和电池均衡^[16]。状态监测主要是对于电池的电压、电流和温度提供实时精准的监测。电池保护功能用于防止电池工作在有潜在危险的状态下, 例如过充、过放、过冷或过热等, 保障电池本身和使用者的安全。SoC 估计是 BMS 系统的一项重要功能, 实时估计电池的 SoC 是对电池进行调度的先决条件。由于 SoC 无法直接测量, 因此需要通过设计算法对其进行估计。SoH 估计给出了当前电池的健康状态, 并预估电池的未来寿命。充放电控制功能使电池以给定的功率充电或放电, 并使充放电功率保持在安全的范围内。温度管理需要根据实时监测数据, 将电池的工作温度控制在最佳工作状态。电池均衡用于优化电池组的整体性能, 对于由退役动力电池构成的电池组尤为重要, 接下来将进行详细介绍。

由于单块电池难以应用需求, 储能电池均通过串联、并联或给定的拓扑结构组成储能系统进行工作。电池组内不同电池单元之间存在不一致性, 包括电池单元容量、内阻、电压等各项参数的差异, 会导致充放电不均衡的现象发生^[17]。电池单元在出厂时, 在各项参数上即会存在微小的差异。随着不断的使用, 电池的不一致性将会逐渐扩大^[18]。动力电池需要装载在电动汽车上使用, 不同电池的运行

工况、环境温湿度均不相同,以及存在震动、挤压等因素的影响,可能出现挤压变形、极柱漏液、表面破损等潜在后果^[19]。外部环境因素不同,电池结构受损程度不同,会进一步加大动力电池的不一致性。当经过多次充放电循环后退役时,动力电池的不一致性已经不可忽视。

退役动力电池的不一致性对于储能系统造成的影响主要包括:短板效应、过充过放、实际电流倍率动态变化、电池自放电倍率不同^[19]。短板效应指电池单元可用容量的不一致;过充过放指在仅监控电池组整体的情况下,导致部分电池单元的过充或过放;实际电流倍率动态变化指由于电池单元可用容量的动态变化,导致电流倍率的变化,引起电池组性能恶化;电池自放电倍率差异表征电池闲置时的自放电损耗的不同。

5G 基站参与需求响应,需要频繁调度储能电池进行充放电,退役动力电池的不一致性问题必须得以解决。建立合理的电池组电路拓扑连接,设计均衡电路;在 BMS 中引入电池均衡算法,并设置充放电均衡控制策略,是退役电池不一致性问题的解决方案^[20-21]。此外,文献[22]提出了一种“数字化电池储能系统”的新框架,为 5G 基站储能能量管理提供了新思路。

2.3 基站储能电池可调度容量评估

评估 5G 基站储能电池的可调度容量是储能电池参与需求响应的前提^[23]。5G 基站储能电池与一般储能电池的最大区别在于,其首要功能为供电后备,需在配电网发生故障时为基站通信设备提供 UPS,保障基站用电设备的供电可靠性。必须在确保基站用电可靠性达标的前提下对于储能电池进行调度。若因参与需求响应,对储能电池进行了过度放电,同时配电网发生故障,储能电池电量过低将会导致基站失电。

评估储能电池的可调度容量首先需要分析 5G 基站对于备用容量的需求。下一代移动通信网络联盟(next generation mobile networks alliance, NGMN)规定,5G 基站的可用度应该达到 99.999%^[24]。基站如果仅依靠配电网供电难以使供电可靠性达标,需要储能电池预留一定容量作为备用。当前基站建设过程中大都按照储能电池备电 3 小时进行设计,用以满足基站的供电可靠性指标。然而不同时刻、不同位置的 5G 基站对于储能电池备用容量的需求不同,储能电池的装机容量在某些时段存在冗余。

本文将储能电池装机容量分为两部分,一部分为储能电池备用容量,用于满足可靠性要求;剩余部分定义为可调度容量。5G 基站对于储能电池的备用容量需求是时变的。如前所述,5G 基站用电负荷与通信负载近似呈一次线性关系。在通信负载高的时段,用电负荷相应更高,需要储能电池拥有更高的备用容量以应对潜在电网故障;在通信负载低的时段,用电负荷相应较低,对于储能电池的备用容量需求降低。5G 基站对于储能电池的备用容量需求取决于所在配电网节点的可靠性。对于高可靠性的配电网,例如深圳市福田区配电网,2019 年用户平均停电时间仅为 0.19 分钟^[25],发生停电故障的概率低,相应基站的储能电池备用容量需求较小。对于低可靠性的配电网,例如部分农村配电网,基站的储能电池需要有更高的备用容量以应对潜在的停电故障。

定量分析 5G 基站对于储能电池备用容量的需求,需要建立基站供电可靠性模型,可靠性模型也是调度基站储能参与需求响应的理论保障。由于基站可通过配电网或储能电池供电,在构建供电可靠性模型时,应考虑配电网节点可靠性和储能备用时间两方面的影响。在模型中引入储能备用时间,将使得传统基于马尔科夫模型的配电网可靠性分析方法难以适用^[26];同时,由于引入储能后供电可靠性较高,使用基于仿真采样(例如蒙特卡洛采样)的可靠性分析方法将可能较大的误差^[27]。因此,如何建模并计算基站供电可靠性将成为关键问题之一。基于基站供电可靠性模型,可以估计给定 5G 基站达到可靠性指标所需的储能备用时间,并通过下式得到其对于储能电池备用容量的需求:

$$C_{\min}^{\text{res}}(t) = \int_t^{t+T_{\min}^{\text{res}}} P_b(t) dt \quad (2)$$

式中: $C_{\min}^{\text{res}}(t)$ 为 t 时刻的最小备用容量; T_{\min}^{res} 为最小储能备用时间; $P_b(t)$ 为基站用电负荷。

获得不同时刻为达到可靠性指标所需预留的最小备用容量后,从储能电池总安装容量中扣除预留部分,即为 5G 基站的储能可调度容量。图 4 给出了 5G 基站不同时段储能可调度容量的示意图。在通信负载高的时段,可调度容量低;通信负载低的时段,可调度容量高。不同地区的基站对应的通信负载高峰时刻不同,例如商业区基站和居民区基站峰荷载发生时刻不同,因此不同基站的可调度容量间存在互补效应。

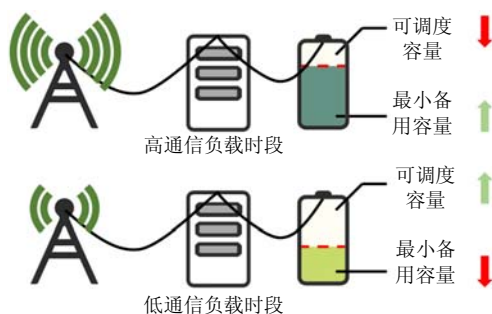


图 4 5G 基站不同时段储能可调度容量示意图

Fig. 4 An example of the 5G base station batteries' dispatchable capacity in different hours

2.4 基站通信负载预测

在 5G 基站储能电池的可调度容量评估中, 需要根据基站的通信负载计算基站未来用电负荷, 然后基于式(2)得到储能电池的最小备用容量。因此精确预测 5G 基站的通信负载是计算可调度容量的重要步骤。

5G 基站通信负载预测可以借鉴电力系统短期预测的方法和思路。从时间尺度上, 基站通信负载预测与电力系统短期负荷预测类似; 在空间颗粒度上, 基站通信负载预测与电力系统用户级负荷预测类似。相比于用户用电行为存在较大随机波动, 基站的通信负载规律性更强, 因此可以利用电力系统短期负荷预测原理与方法预测 5G 通信负载。电力系统的短期负荷预测方法已经得到了充分的研究^[28]。从基础的回归模型^[29]、时间序列模型^[30]; 发展到基于机器学习的预测方法, 例如支持向量机^[31]和人工神经网络^[32]; 到结合多种预测方法的综合预测模型^[33]; 再到近来受到广泛关注的深度学习模型^[34]和概率预测方法^[35]。

当前, 已经有一些文献研究了针对通信流量的预测方法^[36-38], 但基站级的 5G 通信负载预测仍然较少。因此, 需要建模 5G 基站通信负载的特性, 充分考虑单个基站通信负载随时间变化的时间相关性和多个相邻基站之间由于用户流动产生的负载转移所对应的空间相关性, 并考虑影响基站通信负载的外部相关因素, 建立短期甚至超短期的 5G 基站通信负载预测方法。此外, 5G 基站通信负载预测研究的重要制约因素之一在于缺乏公开有效的基站级 5G 通信负载数据集。

2.5 基站聚合与协同调度

5G 基站难以直接参与需求响应, 需要进行协同调度。考虑到 5G 基站数量众多、分布广泛、单站体量较小的特点, 电力系统无法直接对海量基站

进行直接调度, 需要将单个基站建模为有自身运行可行域的可控负荷, 并引入协同机制, 将海量的分布式 5G 基站资源聚合。因此, 设计 5G 基站聚合框架、协同机制、调度算法成为关键问题。

图 5 给出了一个 5G 基站协同调度示例, 主要由 5G 基站本地控制, 云端协同控制以及与电力系统的对接机制组成。在本地端, 通过 5G 基站的单站能量管理系统对于本基站内部的设备进行管理, 实时监测各用能设备和储能电池的状态, 实现用能设备的功耗管理, 制定储能电池的充放电策略, 并决定基站直流电源的工作状态。同时, 与云端的协调机制通过有线或无线公网通信, 上传本基站的设备工作信息和可调度容量信息; 接收云端下发的调度信息, 并根据调度信息, 做出本地设备的用能决策, 优化用能行为。在云端, 部署相应的通信、计算资源和决策算法实现分布式资源云边协同。一方面, 接收每一个基站上传的实时信息, 评估每个 5G 基站的可用状态。另一方面, 与电力系统需求响应主站, 上传聚合后整个 5G 基站系统的调度可行域, 作为电力系统决策的边界条件; 接收电力系统需求响应主站给出的调度信息, 例如调度指令、价格信息等, 并进行 5G 基站系统的全局优化, 确定每一个基站的响应行为, 并通过通信网络将指令下发调度指令。其中, 在云端将所有基站的可用信息进行聚合, 形成整个 5G 基站系统的调度可行域, 是电力系统和通信系统有效互动的重要前提。在电力系统的优化决策模型中, 如果将颗粒度细化到每个 5G 基站, 将会导致模型规模过大难以求解, 同时无法有效保护隐私。因此需要对于基站进行聚合, 并将聚合后的调度可行域提供给电力系统决策模型。这种聚合将 5G 基站系统内每个基站的可行域, 等值到 5G 基站系统与电力系统交互的端口上。

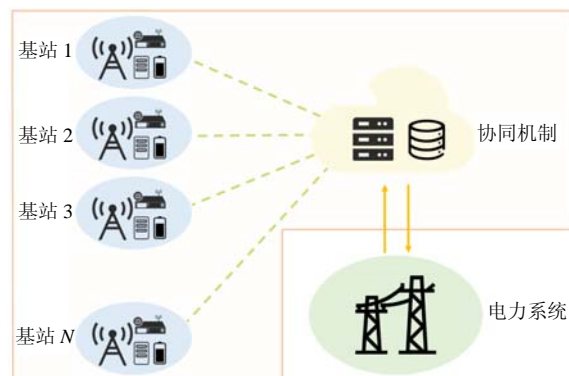


图 5 5G 基站协同调度示意图

Fig. 5 An example of the 5G base station coordinated dispatch

在考虑多时段耦合的情况下,如何将每个基站的运行约束进行等值,得到5G基站系统的可行域约束,仍未得到较好的解决方案。

相比于海量电力用户进行需求响应聚合时需要对个体利益(代表用户)和整体利益(代表聚合商)进行权衡,5G基站的协同只需考虑整体利益。这是由于5G基站虽然数量庞大、分布广泛,但是所有权较为集中,一般属于通信运营商或基站运营商。因此在做决策时,优化目标为通信运营商或基站运营商的利益最大化,而不用考虑单个基站的利益问题。

在聚合的基础上,5G基站灵活性资源与电力系统需求响应主站之间的互操作需要借由自动需求响应(automated demand response)系统完成。自动需求响应系统在不依赖人工操作的前提下,能够自动根据外部信号调度需求侧资源参与响应^[39-40]。当前,国内外已经针对自动需求响应的标准和架构开展了广泛研究^[41-42]。聚合后的5G基站灵活性资源在自动需求响应中可被等效为大用户或负荷聚合商。因此,需要设计自动需求响应信息交换接口^[43],实现5G基站灵活性资源与自动需求响应系统的信息交互与指令下达。此外,随着需求响应业务的复杂化和场景的多样化,文献[44]探讨了在自动需求响应系统应用数据分发服务(data distribution service, DDS)技术的潜力。

3 5G基站参与需求响应应用前景

本节主要对于5G基站在需求响应中的应用前景展开讨论;分析在不同需求响应应用场景下,5G基站的响应潜力,能否参与响应,如何参与响应,以及参与响应的收益。本节主要涉及电力调峰、阻塞管理、调频辅助服务等典型的电力需求响应场景。

3.1 参与电力调峰

随着可再生能源渗透率的不断提高,电力系统净负荷的峰谷差增大,面临愈发严峻的调峰问题^[45]。5G基站由于装设了储能电池,同时可以对于基站设备进行功耗管理,具备参与电力调峰的能力。虽然单站的功率仅为千瓦级,但是作为“新基建”的重要组成部分,未来5G网络基本建成后,数量庞大的基站群将使得基站能耗在电力负荷中的比例大大提高,具有很强的调峰潜力。

基站参与电力调峰主要依靠储能电池的充放电和基站设备的功耗管理。对于储能电池,在评估

得到未来时段用于满足供电可靠性的最小储能备用容量后,可将剩余容量参与到电力调峰中。在用电高峰时段放电,并在用电低谷时段充电,基于储能的日内调度进行削峰填谷。同时,在用电高峰的时段,在不影响用户通信质量的情况下,开展例如通道关断、下行功率调控、多基站协同等设备功耗管理技术,可以进一步降低高峰电力需求。不同基站由于覆盖范围不同,其通信负载达峰的时段也不相同。对于那些通信负载高峰与电力系统负荷高峰错开的基站,在电力负荷高峰时段开展功耗管理的效果更加明显。

在当前国内的峰谷电价机制下,在用电低谷时段充电,用电高峰时段放电,能够通过峰谷价差实现套利,降低基站的用电成本。在国外基于节点边际电价(locational marginal price, LMP)的实时电价机制下,5G基站同样具有很大的价差套利潜力。

3.2 参与阻塞管理

在配电网中,由于负荷的自然增长,以及分布式可再生能源、电动汽车等新元素的接入,可能导致配电网出现阻塞^[46]。配电网阻塞将会导致部分负荷无法得到电能供应,或使得电气设备工作在过载区间,影响电能供应的安全性和经济性。5G基站负荷由于具有一定范围内灵活调节的特性,可用于配电网的阻塞管理。

在配电网出现阻塞时,调度处于该配电网中的5G基站在保障通信质量的前提下开展能耗管理;同时利用基站储能电池在可调度区间内进行放电,减小阻塞时段5G基站从配电网获取的功率。进一步地,如果5G基站装设的直流电源支持能量的双向流动,且储能电池额定放电功率大于基站设备用电负荷,还可以通过直流电源将直流电逆变为交流电,向配电网反送功率缓解阻塞。

此外,还可以对于配电网中的5G基站用电和分布式可再生能源、电动汽车等进行联合调度,充分发掘配电网中各类灵活性资源的调节能力,缓解配电网阻塞,提高运行的经济性和安全性。

3.3 参与调频辅助服务

维持频率恒定是电力系统运行的重要任务。传统频率调节主要靠火电机组增减出力实现,其中一次调频依赖所有火电机组的调速器对于频率进行有差调节,二次调频由具有自动发电控制(automatic generation control, AGC)功能的调频机组实现。随着电力系统发展,越来越多的主体参与到调频中,

包括可再生能源、可控负荷、电动汽车、各类储能等。国外大量的成熟电力市场中都设立了专门的调频辅助服务市场。调频市场的参与者事先在市场上进行报价，并由市场根据报价进行出清；参与者根据自身的中标情况在实时运行中响应系统的调频需求；根据对调频需求的响应效果，参与者可以收获相应的辅助服务收益。

5G 基站具有良好的参与调频辅助服务的潜力。调频辅助服务要求参与者拥有良好的快速调节能力，能够跟踪调频需求进行灵活的出力调整。美国 PJM 电力市场将调频资源分为 RegA 和 RegD 两类，其中 RegD 类调频资源的调节速度更快，对应的调频信号每两秒更新一次，调频资源需要实时跟踪调频信号，从而保持频率恒定^[47]；RegD 资源的调频价格要显著高于 RegA 类资源。5G 基站的储能电池大规模采用退役锂离子动力电池，具有很好的动态特性，在接到系统的调频信号后，能够灵活进行充放电，响应系统的调频需求。此外，在调频信号快速更新的过程中，既有上调信号也有下调信号，相较于参与调峰，储能电池在响应调频信号的充放电中 SoC 日内变化较小，与 5G 基站储能电池需要保留一定备用容量的前提条件相适应。参与调频也需要设置调度策略，在频率处于正常范围时优化储能电池 SoC^[48]，以便于在系统有调频需求时，提供更好的调频响应。

在调频辅助服务中，5G 基站通过储能电池提供灵活快速的响应能力，能够获得可观的调频收入。同时，对于储能电池的频繁充放电会导致其寿命的衰减，导致电池使用寿命缩短^[49]，5G 基站需要付出更多的电池更换成本。

3.4 综合应用

5G 基站也可以同时参与多种需求响应应用，在电网负荷侧扮演多种角色。当前，已经有相关文献对电池储能同时兼顾多种用途开展研究。文献[50]提出了通过动态规划方法对储能电池价差套利和参与调频进行协同优化；文献[51]研究了储能电池同时参与调峰和调频的协同方法。未来对于 5G 基站而言，同样具有同时参与多种需求响应应用场景的潜力。

4 5G 基站参与需求响应商业模式

5G 基站参与需求响应商业模式的核心问题包括，参与需求响应如何产生收益，产生的收益如何

归属和分配，所需付出的成本如何测算，以及参与各方能否获得足够回报的问题。本节将从不同运维主体的视角，对于 5G 基站参与需求响应的商业模式进行分析和展望。

4.1 基站运营商运维模式

为了实现 5G 网络覆盖，通信运营商有两种途径：一种是自建基站并进行运维；另一种是向基站运营公司租赁基站，并在基站内安装本通信公司的设备。在这里，我们将拥有自建基站的通信运营商和专门的基站运营公司统称为基站运营商。如图 6 所示，在基站运营商运维模式下，基站运营商拥有基站灵活性资源的所有权和运维控制权，作为独立主体参与和电力系统的互动。电网公司在电力系统实时运行中向基站运营商提出需求，基站运营商控制基站灵活性资源参与需求响应。

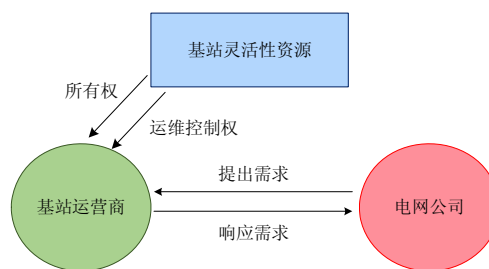


图 6 基站运营商运维模式示意图

Fig. 6 An example of the base station owner operation mode

基站运营商参与需求响应可以降低度电成本，并获取额外收益。在满足可靠性和通信质量的前提下，在电价低时为储能电池充电，并在电价高时用储能电池给基站设备供电，能够降低基站用电的度电成本。进一步地，可以与供电公司合作，通过实现电网友好型的用电方式，从供电公司处获得更低的用电价格。此外，控制基站设备参与辅助服务，能够从辅助服务市场中获得提供相应服务所应得的收益。例如在美国 PJM 调频市场中，调频辅助服务的中标者会获得相应的支付，支付金额与中标量、报价、提供调频服务的类型和质量密切相关^[47]。

基站运营商所需付出的额外成本主要来自于基站的新增建设成本和储能电池寿命减少的成本。如前文讨论，基于现有 5G 基站建设方案开展需求响应需要进行技术改造和新增设备，这会增加基站的成本。同时，改造后的 5G 基站建设方案更加智能化和信息化，有助于降低基站日常维护花销。储能电池寿命有限，频繁调度其参与需求响应将会降低电池寿命。储能电池的寿命缩短也应等效

地计入基站参与需求响应的额外成本中。

在电力市场逐渐建设成熟的条件下，通过电价差和辅助服务支付获得收益，将能够有效降低基站运营商的用能成本，减轻 5G 基站耗电量显著上升的影响，提高基站运营商盈利能力。

4.2 电网公司运维模式

如图 7 所示，在电网公司运维模式下，电网公司向基站运营支付资源使用费，并获得基站灵活性资源的运维控制权。电网公司在电力系统日常运行中，可以对于 5G 基站内的灵活资源进行调度，以满足电力系统的经济性和可靠性需求。此模式中，基站运营商纯粹作为资源提供方，而不用在日常运维中进行决策；电网公司保证基站的通信质量和用电可靠性要求的前提下，使用灵活性资源。双方通过合作，实现互利共赢。

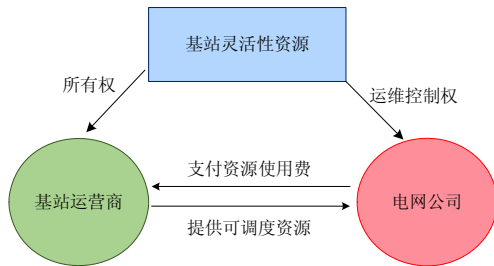


图 7 电网公司运维模式示意图

Fig. 7 An example of the power grid company operation mode

基站运营商在合作中提供灵活性资源而获得租金形式的额外收益，进一步增加利润。同时，需要向电网公司提供不同时段的可调度空间，作为电网调度的边界条件。当然，基站运营商也需面临 4.1 节所述的电池加速老化等成本增加。

电网公司通过此方式可以获得大量可以直接调度的灵活性资源，提高电力系统的运行灵活性。通过优化运行，能够降低系统运行成本，同时促进风电、光伏等可再生能源消纳。此外，向基站运营商支付租金并获得灵活性资源的轻资产运营模式，相较于直接建设储能电站，在成本上具有优势。

4.3 第三方运维模式

第三方公司也可以参与 5G 基站需求响应，则基站运营商和电网公司的两方格局变为三方互动合作，如图 8 所示。基站运营商不用直接介入非自身主营业务的需求响应中，而是由第三方公司充当基站运营商的代理，作为基站运营商和电网公司之间的桥梁。在此模式下，第三方公司拥有基站灵活性资源的运维控制权，并根据电网公司的需求信

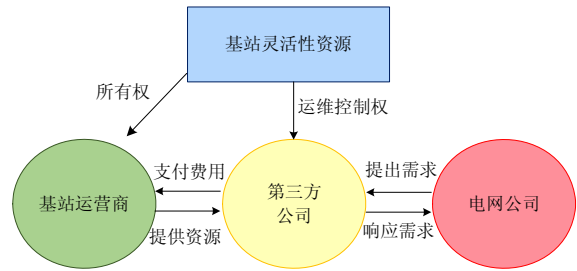


图 8 第三方公司运维模式示意图

Fig. 8 An example of the third party company operation mode

号调度基站灵活性资源参与需求响应。

在需求响应过程中，第三方公司可以通过分时或实时电价套利，参与辅助服务市场等方式获取收益。而在与基站运营商的合作中，第三方公司的扮演的角色可以不同。例如，第三方公司可以采取轻资产运营的方式，由基站运营商负责设备的升级和改造，而后第三方公司向基站运营商租赁 5G 基站灵活性资源。第三方公司也可以采取重资产运营的方式，承担基站的供电业务，投资建设基站的供电设备和储能电池，拥有固定资产所有权，并负责日常维护；基站运营商则不拥有供电设备与储能资产，直接向第三方公司购买供电服务。

5 结论

5G 通信网络的快速发展将会带来 5G 基站的大量建设。对于电力系统而言，数量庞大的 5G 基站是潜在的灵活性资源。促进 5G 基站参与需求响应，能够降低基站的用电成本，增加电力系统灵活性，从而实现通信系统和电力系统的互利共赢。本文首先分析了 5G 基站的基本构成设备，基站的用电特性表明了其具有较大的需求响应潜力。从基站设备功耗管理、储能电池能量管理、基站可调度容量评估、通信负载预测、基站协同调度等方面对于 5G 基站参与需求响应的关键技术进行了梳理。在此基础上，本文展望了 5G 基站在需求响应中包括调峰、阻塞管理、调频等的应用场景；探讨了 5G 基站参与需求响应潜在的商业模式。当前，5G 基站与电力系统的互动仍处于起步阶段，为实现大规模的商业应用，还需在关键技术上取得突破，同时需要建立合理的市场机制与盈利模式。随着相关技术的发展和市场机制的建立，5G 基站将作为一种负荷侧的灵活性资源，深度参与到电力系统运行中，在降低电力系统运行成本、促进可再生能源消纳、建设能源互联网方面发挥重要作用。希望本文能够为 5G

通信基站参与需求响应的相关研究和实际应用提供参考, 促进电力系统和通信系统的共同发展。

参考文献

- [1] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4024.
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous Internet of things in electricity: technical principles and typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4024(in Chinese).
- [2] Global Mobile Suppliers Association. LTE to 5G November 2020: global market status[EB/OL]. (2020-11-20). <https://gsacom.com/technology/5g/>.
- [3] 王智慧, 汪洋, 孟萨出拉, 等. 5G 技术架构及电力应用关键技术概述[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(8): 8-19.
WANG Zhihui, WANG Yang, MENG Sachula, et al. 5G technology architecture and key technologies of power application[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(8): 8-19(in Chinese).
- [4] 黄震, 刘军, 李洋. 5G 商用元年发展现状及应用挑战[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 18-25.
HUANG Zhen, LIU Jun, LI Yang. Development status and application challenges in the first year of 5G commercial era[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(1): 18-25(in Chinese).
- [5] 中国电子信息产业发展研究院. 5G 融合应用发展白皮书(2020)[EB/OL]. (2020-12-04). http://www.xinhuanet.com/tech/2020-12/04/c_1126821689.htm.
China Center for Information Industry Development. White paper on 5G application development(2020)[EB/OL]. (2020-12-04). http://www.xinhuanet.com/tech/2020-12/04/c_1126821689.htm(in Chinese).
- [6] 中国电子信息产业发展研究院. 5G 产业发展白皮书(2020)[EB/OL]. (2020-12-01). <http://www.mtx.cn/#/report?id=684243>.
China Center for Information Industry Development. White paper on 5G industry development(2020)[EB/OL]. (2020-12-01). <http://www.mtx.cn/#/report?id=684243>(in Chinese).
- [7] 王宏延, 完颜绍澎, 顾舒娴, 等. 5G 建设与电力基础资源运营方案研究[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(12): 9-14.
WANG Hongyan, WANYAN Shaopeng, GU Shuxian, et al. Research on 5G construction and operation scheme of electric power basic resources[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(12): 9-14(in Chinese).
- [8] 中国移动研究院. 5G 基站节能技术白皮书[EB/OL]. (2020-08-28). <https://max.book118.com/html/2020/0913/8105107075002142.shtm>.
China Mobile Research Institute. White paper on 5G base station energy saving technology [EB/OL]. (2020-08-28). <https://max.book118.com/html/2020/0913/8105107075002142.shtm>(in Chinese).
- [9] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-19.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-19(in Chinese).
- [10] KOMIYA K, SEKI S, TAKENO K. Environmentally-friendly, disaster-resistant green base station test systems[J]. NTT DOCOMO Technical Journal, 2013, 15(1): 35-41.
- [11] GSMA. Case study: PowerStar and MTN South Africa [EB/OL]. (2019-04-17). <https://www.gsma.com/futurenet/works/wiki/powerstar-and-mtn-south-africa-energy-saving-case-study/>.
- [12] LARSSON E G, EDFORS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 186-195.
- [13] 刘彦龙. 中国锂离子电池产业发展现状及市场发展趋势[J]. 电源技术, 2019, 43(2): 181-187.
LIU Yanlong. Development and market trend of Li-ion battery industry in China[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(2): 181-187(in Chinese).
- [14] YANG Jie, GU Fu, GUO Jianfeng. Environmental feasibility of secondary use of electric vehicle lithium-ion batteries in communication base stations[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 156: 104713.
- [15] FRENGER P, TANO R. More capacity and less power: how 5G NR can reduce network energy consumption[C]// IEEE 89th Vehicular Technology Conference(VTC2019-Spring). Kuala Lumpur: IEEE, 2019: 1-5.
- [16] RAHIMI-EICHI H, OJHA U, BARONTI F, et al. Battery management system: an overview of its application in the smart grid and electric vehicles[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 4-16.
- [17] 马泽宇, 姜久春, 文锋, 等. 用于储能系统的梯次利用锂电池组均衡策略设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 106-111.
MA Zeyu, JIANG Jiuchun, WEN Feng, et al. Design of equilibrium strategy of echelon use Li-ion battery pack for energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 106-111 (in Chinese).

- [18] 张彩萍, 姜久春, 张维戈, 等. 梯次利用锂离子电池电化学阻抗模型及特性参数分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 54-58.
ZHANG Caiping, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige, et al. Characterization of electrochemical impedance equivalent model and parameters for Li-ion batteries echelon use[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 54-58(in Chinese).
- [19] 周方方. 退役磷酸铁锂动力电池不一致性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
ZHOU Fangfang. Research of inconsistencies of eliminated LiFePO₄ power batteries[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015(in Chinese).
- [20] EINHORN M, ROESSLER W, FLEIG J. Improved performance of serially connected Li-ion batteries with active cell balancing in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2448-2457.
- [21] MANENTI A, ABBA A, MERATI A, et al. A new BMS architecture based on cell redundancy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4314-4322.
- [22] CI Song, HE Hongjie, KANG Chongqing, et al. Building digital battery system via energy digitization for sustainable 5G power feeding[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(5): 148-154.
- [23] YONG Pei, ZHANG Ning, HOU Qingchun, et al. Evaluating the dispatchable capacity of base station backup batteries in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, Early Access.
- [24] Next Generation Mobile Networks. 5G white paper [EB/OL]. (2015-02-17). <https://www.ngmn.org/work-programme/5g-white-paper.html>.
- [25] 郭宇立. 南方电网深圳供电局以世界一流供电可靠性支撑深圳“双区”建设[N]. 深圳晚报, 2020-5-18(A03).
GUO Yuli. Shenzhen power supply bureau of China Southern Power Grid supports Shenzhen's "two zone" construction with world-class power supply reliability[N]. Shenzhen Evening News, 2020-5-18(A03)(in Chinese).
- [26] CHOWDHURY A, KOVAL D. Power distribution system reliability: practical methods and applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011: 45-77.
- [27] BILLINTON R, WANG Peng. Teaching distribution system reliability evaluation using Monte Carlo simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 397-403.
- [28] GROSS G, GALIANA F D. Short-term load forecasting [J]. Proceedings of the IEEE, 1987, 75(12): 1558-1573.
- [29] PAPALEXOPOULOS A D, HESTERBERG T C. A regression-based approach to short-term system load forecasting[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1535-1547.
- [30] CONTRERAS J, ESPINOLA R, NOGALES F J, et al. ARIMA models to predict next-day electricity prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1014-1020.
- [31] CHEN B J, CHANG Mingwei, LIN C J. Load forecasting using support vector machines: a study on EUNITE competition 2001[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1821-1830.
- [32] HIPPERT H S, PEDREIRA C E, SOUZA R C. Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(1): 44-55.
- [33] 康重庆, 夏清, 沈瑜, 等. 电力系统负荷预测的综合模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(1): 8-11.
KANG Chongqing, XIA Qing, SHEN Yu, et al. Integrated model of power system load forecasting[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 1999, 39(1): 8-11(in Chinese).
- [34] KONG Weichong, DONG ZhaoYang, JIA Youwei, et al. Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 841-851.
- [35] HONG Tao, PINSON P, WANG Yi, et al. Energy forecasting: a review and outlook[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020, 7: 376-388.
- [36] ALAWE I, KSENTINI A, HADJADJ-AOUL Y, et al. Improving traffic forecasting for 5G core network scalability: a machine learning approach[J]. IEEE Network, 2018, 32(6): 42-49.
- [37] HUANG C W, CHIANG C T, LI Qihui. A study of deep learning networks on mobile traffic forecasting[C]//2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications(PIMRC). Montreal: IEEE, 2017: 1-6.
- [38] WANG Jing, TANG Jian, XU Zhiyuan, et al. Spatiotemporal modeling and prediction in cellular networks: a big data enabled deep learning approach[C]//IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications. Atlanta: IEEE, 2017: 1-9.
- [39] 高赐威, 梁甜甜, 李扬. 自动需求响应的理论与实践综述[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 352-359.
GAO Ciwei, LIANG Tiantian, LI Yang. A survey on theory and practice of automated demand response[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 352-359(in Chinese).
- [40] 张晶, 孙万珺, 王婷. 自动需求响应系统的需求及架构研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4070-4076.
Zhang Jing, Sun Wanjun, Wang Ting. Studies on

- requirements and architecture for automated demand response system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4070-4076(in Chinese).
- [41] 张晶, 王婷, 李彬. 电力需求响应技术标准化研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3623-3629.
ZHANG Jing, WANG Ting, LI Bin. Research on technical standardization for electric demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3623-3629(in Chinese).
- [42] 闫华光, 陈宋宋, 杜重阳, 等. 智能电网电力需求响应标准体系研究与设计[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2685-2689.
YAN Huagang, CHEN Songsong, DU Chongyang, et al. Research and design of power demand response standard system about smart grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2685-2689(in Chinese).
- [43] 祁兵, 张荣, 李彬, 等. 自动需求响应信息交换接口设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5590-5596.
QI Bing, ZHANG Rong, LI Bin, et al. Design of automated demand response information exchange interface[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5590-5596(in Chinese).
- [44] 李彬, 叶筠英, 祁兵, 等. DDS 在自动需求响应系统中的适用性分析及应用设想[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1922-1931.
LI Bin, YE Yunying, QI Bing, et al. Applicability analysis and prospect of DDS in automated demand response system[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1922-1931(in Chinese).
- [45] HOU Qingchun, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Probabilistic duck curve in high PV penetration power system: concept, modeling, and empirical analysis in China[J]. Applied Energy, 2019, 242: 205-215.
- [46] 孙辉, 沈钟浩, 周玮, 等. 电动汽车群响应的主动配电网阻塞调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5549-5559.
SUN Hui, SHEN Zhonghao, ZHOU Wei, et al. Congestion dispatch research of active distribution network with electric vehicle group response[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5549-5559 (in Chinese).
- [47] PJM. PJM Manual 11: Energy & ancillary services market operations[EB/OL]. (2020-11-19). <https://www.pjm.com/~media/documents/manuals/m11.ashx>.
- [48] ZHU Diwei, ZHANG Y A. Optimal coordinated control of multiple battery energy storage systems for primary frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 555-565.
- [49] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16, 38.
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16, 38(in Chinese).
- [50] CHENG Bolong, POWELL W B. Co-optimizing battery storage for the frequency regulation and energy arbitrage using multi-scale dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1997-2005.
- [51] SHI Yuanyuan, XU Bolun, WANG Di, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2882-2894.



雍培

在线出版日期: 2021-04-06。

收稿日期: 2021-01-26。

作者简介:

雍培(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为通信与电网融合、可再生能源、电网可靠性等, yp18@mails.tsinghua.edu.cn;

张宁(1985), 男, 副教授, 研究方向为可再生能源、多能源系统、电力系统规划及运行等, ningzhang@tsinghua.edu.cn;

慈松(1970), 男, 教授, 研究方向为信息通信系统、分布式储能及互联网能量管控等, sci@tsinghua.edu.cn;

*通信作者: 康重庆(1969), 男, 教授, 研究方向为电力规划与运行、可再生能源、负荷预测、低碳电力技术等, cqkang@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

5G Communication Base Stations Participating in Demand Response: Key Technologies and Prospects

YONG Pei, ZHANG Ning, CI Song, KANG Chongqing*

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments
(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University))

KEY WORDS: 5G communication; 5g base station; energy internet; energy management; battery energy storage; demand response

The 5th generation mobile networks (5G) is in the ascendant. The 5G development needs to deploy millions of 5G base stations, which will become considerable potential flexibility resources for power systems. Meanwhile, dispatching 5G base stations to participate in demand response can significantly reduce the 5G-power consumption cost. Therefore, 5G base station dispatch can achieve a win-win situation between communication systems and power systems. However, rare researches have discussed 5G base stations participating in demand response. It is necessary to summarize the key technologies and analyze the development prospects.

First, the basic components of 5G base stations and their corresponding power consumption characteristics are analyzed. The 5G base station components can be categorized as power supply devices, communication devices, and support devices (shown in Fig. 1). Power supply devices include the power source and the backup batteries; communication devices include the active antenna unit (AAU), the base band unit (BBU), and transmission devices; support devices have lighting devices, air conditioning devices, etc. The flexibility of 5G base stations comes from two aspects: the power consumption, which is adjustable; the backup batteries, which can provide extra capacity while maintaining the power supply reliability.

Then, the key technologies for realizing 5G base stations participating in demand response are summarized. The key technologies are shown in Fig. 2. For each technology, the importance and the function are stated. Moreover, this paper analyzes the technical

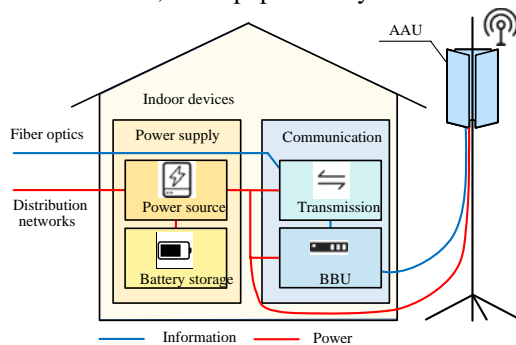


Fig. 1 Typical equipment of 5G base stations

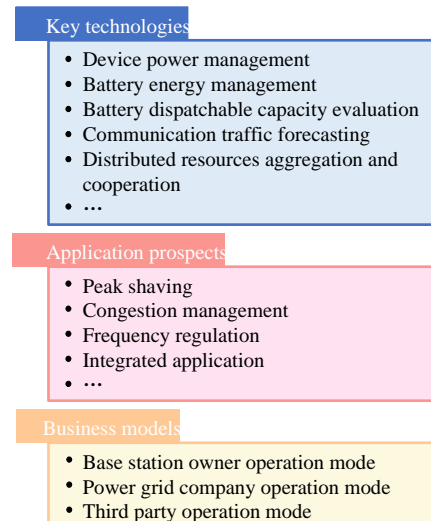


Fig. 2 Key technologies, application prospects, and business models for 5G base stations participating in demand response roadmaps and the current development status of these technologies.

Further, the potential applications are discussed. In the generalized demand response category, peak shaving, congestion management, frequency regulation, and integrated application can all utilize the flexibility resources of base station. The feasibility of each application is analyzed. How base stations participate in these applications is stated. The benefits of each application are discussed.

Finally, this paper focuses on the business models. The base station owners, power grid companies, and third-party companies can operate the demand response service. The revenue, investment, cost, benefit allocation, ownership, and operating rights are discussed for every model.

At present, the interaction between 5G base stations and power systems is still in its infancy. With the development of related technologies and the establishment of market mechanisms, 5G base stations will provide massive demand-side flexibility resources and deeply participate in power system optimization and operation. 5G base stations would play an important role in reducing power system operation cost, promoting renewable energy integration, and building energy Internet.