

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210469

# 基于并网太阳能光伏/电池系统的无线网络低功耗供电策略

向征<sup>1</sup>, 李自强<sup>2</sup>

(1. 中国大唐集团有限公司重庆分公司, 重庆 400020; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 为了实现能耗精确估计, 充分考虑用户位置信息应用, 提出了一种基于并网太阳能光伏/电池系统的无线网络供电低功耗策略。首先为了保证供电服务的连续性, 建立了一种并网太阳能光伏/电池系统。然后考虑到太阳强度和交通量的间歇性行为, 分析了基站发射功率、系统带宽对系统性能指标的影响, 评估无线网络的吞吐量、能量效率和频谱效率性能。进一步提出了一种启发式的负载均衡算法和资源块分配技术, 通过对太阳能能源的优化利用, 最大限度地提高了系统的效率和能效。仿真结果表明, 所提并网太阳能光伏/电池系统可以显著降低供电能耗, 发电效率高达 54.8%, 并通过有效的可再生能源收集模型确保显著的能源可持续性。

**关键词:** 负载均衡; 无线网络; 太阳能光伏; 低功耗

## Low power strategy of a wireless network based on a grid-connected solar photovoltaic/cell system

XIANG Zheng<sup>1</sup>, LI Ziqiang<sup>2</sup>

(1. Chongqing Branch, China Datang Corporation Ltd., Chongqing 400020, China;  
2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** In order to achieve accurate estimation, and fully consider the user location information, a low power strategy of a wireless network based on a grid-connected solar photovoltaic/cell system is proposed. First, in order to ensure the continuity of power supply, a grid-connected solar photovoltaic/cell system is established. Then, considering the intermittent behavior of solar intensity and traffic volume, the influence of base station transmitted power and system bandwidth on system performance is analyzed, and the throughput, energy efficiency and spectrum efficiency of the wireless network are evaluated. A heuristic load balancing algorithm and resource block allocation technology are proposed to maximize the efficiency and energy efficiency of the system by optimizing the use of green energy. Numerical results show that the proposed grid-connected solar photovoltaic/cell system can significantly reduce power grid energy consumption, the power generation efficiency is up to 54.8%, and significant energy sustainability is ensured through an effective renewable energy collection model.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Hebei Province (No. F2015502047).

**Key words:** load balancing; wireless network; solar photovoltaic; low power consumption

## 0 引言

火力发电厂发电会释放出大量温室气体和少量有害气体, 造成空气污染严重、气温上升和臭氧层破坏<sup>[1]</sup>。此外, 较低的供电效率以及较差的可维护性使得火力发电系统可靠性降低, 并在电网故障期间导致停机<sup>[2]</sup>。近年来, 以可持续、可靠的可再生能源为支撑的太阳能无线通信系统接入网取得了令人瞩目的成果, 引起了业界和学术界的高度关注<sup>[3]</sup>。

通过减少有害温室气体排放, 在基站使用可再

生能源为运营商提供了发展太阳能接入蜂窝网络的选择。为了降低供电能源成本, 人们进行了大量的研究。文献[4]采用 Hetnets 多层细胞网络, 提高空间重用性, 热点中的容量可以最大限度地减少死点中蜂窝网络的覆盖漏洞, 这可以节省大量能源并延长覆盖时间, 同时确保下一代蜂窝系统的无缝连接和移动性<sup>[5]</sup>。然而现代蜂窝系统需要过多的连接设备, 过多的比特率, 对于数据密集型、任务关键型和时间关键型应用程序, 延迟极高<sup>[6]</sup>。因此, 最近对路径开发更有效的蜂窝网络进行了研究<sup>[7]</sup>。文献[8]提出了一种蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制(Nonlinear Robust Fractional-Order Control,

NRFOC)方法,能够快速精准地跟踪负荷需求变化。然而上述方法设计的频谱区域可能经常无法达到所需的电池组吞吐量,以支持向用户提供无缝宽带服务。除此之外,用户远离宏基站,并经常造成严重的小区间干扰,使得资源分配存在较大的不合理性,从而产生了较大的资源浪费<sup>[9]</sup>。

在这种趋势下,负载平衡作为一种更高的资源分配、更好的系统实现和减少运营开支的优秀方法,受到了广泛的关注。在即将到来的5G网络中,负载均衡是调整负载、缓解异构网络拥塞的有效技术。文献[10]提出了一种基于分布式用户关联的负载平衡算法来平衡相邻基站之间的负载。文献[11]介绍了一种可用于优化hetnet范围的经验负载平衡算法。文献[12]提出了一种基于改进VDCOL的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复策略,有效提升了直流系统的恢复能力。文献[13]提出了一种用于现代电信网络负载均衡的用户关联和功率控制算法,以取代传统的吞吐量最大化技术。文献[14]提出了一种基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法。然而,上述方法均未考虑基站(Base Station, BS)负载功率利用率的有效调节,从而导致能耗估计的结果偏高,而且,已有算法大都忽略了用户的实际位置,无法实现实际能量的最优分配。

为了解决上述方法存在的问题,提出了一种基于并网太阳能光伏/电池系统的无线网络低功耗策略。通过一种启发式的负载均衡算法和资源块(Resource Block, RB)分配技术,通过对太阳能能源的优化利用,最大限度地提高了系统的效率和能效。数值结果证明了提出方法的有效性。

## 1 系统框架与建模

移动通信标准宏基站通常由收发器、功率放大器、射频单元、基带单元、DC-DC电源和冷却系统组成。基站由太阳能光伏和基站电网供电,备用电源由电池组提供<sup>[15]</sup>。在太阳能发电不足的情况下,基站消耗电网系统的能量。本文设置三种不同的基站配置,即macro 2/2/2、macro omni和micro。目前移动基站广泛采用分布式基站的概念,其中基带信号处理单元与远程无线电头的射频单元分离。

太阳能光伏板是由串联/并联的多个太阳能电池组成的阵列,用于将阳光转化为电能。太阳能光伏板产生的太阳能量主要受太阳能板的位置、材料/倾斜度和能量收集技术的影响。此外,基于物联网(Internet of Things, IoT)的智能监控系统可用于控制

太阳能光伏系统的发电量。太阳能光伏板每年产生的能量的计算公式如式(1)所示。

$$E_{PV} = R_{PV} \cdot PSH \cdot \eta_{PV} \quad (1)$$

式中: $R_{PV}$ 表示太阳能光伏板的额定容量; $PSH$ 表示根据平均值计算的峰值太阳时数; $\eta_{PV}$ 表示太阳能光伏板的效率。太阳辐射的月统计数据 and 清洁度指数如图1所示。

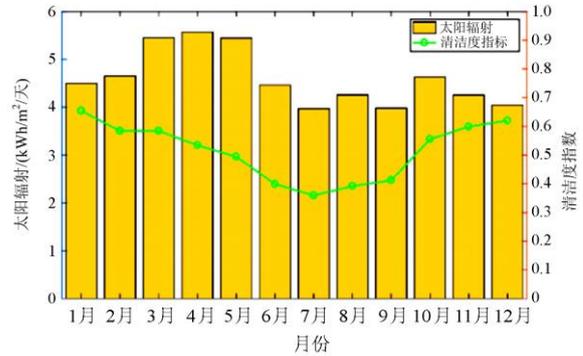


图1 太阳辐射的月统计数据 and 清洁度指数

Fig. 1 Monthly statistics of solar radiation and cleanliness index

通常电网是一个相互连接的系统,用于向负荷供电。在这项工作中,本文提出的太阳能光伏/电池系统已连接到公用电网,以共享电网的多余电力,从而通过保持服务质量(Quality of Service, QoS)来确保可再生能源的最大利用率<sup>[16]</sup>。

电池组是一种辅助装置,在发电高峰期储存剩余电力,并在能源短缺或断电时向基站供电。电池的充电状态( $B_{SOC}$ )是选择存储设备的一个重要因素。最小充电状态是电池的最小放电极限。放电深度( $B_{DOD}$ )由式(2)确定的电池组的最大能量供应限制。

$$B_{DOD} = \left( 1 - \frac{B_{SOC_{min}}}{100} \right) \quad (2)$$

然而,电池系统的自主性( $B_{aut}$ )表明,如果太阳能光伏阵列发生故障,存储设备可以提供基本电力以运行基站负载的可能周期限制。电池组自主性的表达式如式(3)所示。

$$B_{aut} = \frac{N_{batt} \cdot V_{nom} \cdot Q_{nom} \cdot B_{DOD}}{L_{BS}} \quad (3)$$

式中: $N_{batt}$ 是电池组中使用的总电池数量; $V_{nom}$ 是单个电池的理论电压值; $Q_{nom}$ 是单个电池的标称容量; $L_{BS}$ 是平均每日基站负载。电池寿命( $L_{batt}$ )与本文提出的系统更换成本直接相关,计算公式如式(4)所示。

$$L_{\text{batt}} = \min \left( \frac{N_{\text{batt}} \cdot T_{\text{batt}}}{T_a}, R_{\text{batt},f} \right) \quad (4)$$

式中:  $T_{\text{batt}}$  是单个电池的寿命;  $T_a$  是年电池吞吐量;  $R_{\text{batt},f}$  是电池寿命。

在各种转换器中, 逆变器是将交流电压变换为直流电压的一种仪器。逆变器的容量主要取决于负载的大小和逆变器的效率, 表达式如式(5)所示。

$$C_{\text{inv}} = \left( \frac{L_{\text{AC}}}{\eta_{\text{inv}}} \right) \cdot \sigma_{\text{sf}} \quad (5)$$

式中:  $L_{\text{AC}}$  为逆变器的效率;  $\eta_{\text{inv}}$  为峰值交流负载;  $\sigma_{\text{sf}}$  为安全系数。

系统的建模和优化规模与基站能耗直接相关。在实际蜂窝网络中, 业务到达率是时变的, 基站能量需求具有敏感性<sup>[17]</sup>。利用泊松分布模型可以近似预测工作模型, 如式(6)、式(7)所示。

$$\lambda(t) = \frac{p(t, \alpha)}{\max [p(t, \alpha)]} \quad (6)$$

$$p(t, \alpha) = \frac{\alpha^t}{t!} e^{-\alpha} \quad (7)$$

式中:  $\lambda(t)$  是归一化流量分布;  $p(t, \alpha)$  是特定时间点流量需求的泊松分布函数;  $\alpha$  是平均值。

基站的总功率利用率作为流量强度( $\chi$ )的函数的表达式如式(8)所示。

$$P_{\text{in}} = \begin{cases} N_{\text{TRX}} (P_1 + \Delta_p P_{\text{TX}} (\chi - 1)), & \text{if } 0 < \chi \leq 1 \\ N_{\text{TRX}} P_{\text{sleep}}, & \text{if } \chi = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P = P_0 + \Delta_p P_{\text{TX}}$  是基站的最大功耗;  $N_{\text{TRX}}$  是收发器的总数;  $\Delta_p$  是负载依赖性功率梯度, 是空闲状态下的功耗。作为不同类型损耗函数的基站的功耗表达式如式(9)、式(10)所示。

$$P_1 = \frac{P_{\text{BB}} + P_{\text{RF}} + P_{\text{PA}}}{(1 - \sigma_{\text{DC}})(1 - \sigma_{\text{MS}})(1 - \sigma_{\text{cool}})} \quad (9)$$

$$P_1 = \frac{N_{\text{TRX}} BW (P'_{\text{BB}} + P'_{\text{RF}}) + \frac{P_{\text{TX}}}{\eta_{\text{PV}}(1 - \sigma_{\text{feed}})}}{(1 - \sigma_{\text{DC}})(1 - \sigma_{\text{MS}})(1 - \sigma_{\text{cool}})} \quad (10)$$

式中:  $\sigma_{\text{DC}}$ 、 $\sigma_{\text{MS}}$  和  $\sigma_{\text{cool}}$  分别表示与 DC-DC 调节器、主电源和冷却系统相关的损耗;  $N_{\text{TRX}}$  是基站中天线的总数, 是以 W 为单位的最大传输功率;  $P'_{\text{BB}}$  和  $P'_{\text{RF}}$  分别是给定 10 MHz 传输带宽的基带和射频功率消耗。

本研究考虑到流量强度的时空变化, 对两层 LTE 蜂窝网络的吞吐量、能量效率和频谱效率性能进行了严格的评估。根据香农定理<sup>[18]</sup>, 网络可到达吞吐总量(kbps)的表达式如式(11)所示。

$$C_{\text{total}}(t) = \sum_{k=1}^U \sum_{i=1}^N \Delta \log_2(1 + \text{SINR}_{i,k}) \quad (11)$$

式中:  $\text{SINR}$  是信号与干扰加噪声比, 即基站  $B_i$  中第  $k$  个用户能量(User Energy, UE)处的接收信号与干扰脉冲之比;  $N$  是发送基站的数目;  $U$  是网络中用户能量总数。

无线网络的能量效率是衡量网络性能的重要因素之一。“能量效率”表示每焦耳能量传输的比特数。能效性能指标表示为  $\eta_{\text{EE}}$ , 表达式如式(12)所示。

$$\eta_{\text{EE}} = \frac{C_{\text{total}}}{P_{\text{net}}} \quad (12)$$

式中,  $P_{\text{net}}$  是在时间  $t$  时所有基站中消耗的总功率, 可以通过式(8)来计算。频谱效率定义为净数据速率与信道带宽之比, 衰减损耗表达式如式(13)所示。

$$\psi_{i,k} = \begin{cases} 0, & \text{SINR}_{i,k} < \text{SINR}_{\text{min}} \\ \xi \log_2(1 + \text{SINR}_{i,k}), & \text{SINR}_{\text{min}} \leq \text{SINR}_{i,k} < \text{SINR}_{\text{max}} \\ \psi_{\text{max}}, & \text{SINR}_{i,k} \geq \text{SINR}_{\text{max}} \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $0 \leq \xi \leq 1$ ;  $\psi$  为 SINR 的衰减系数。

用户能量所需资源块的数目表达式如式(14)所示。

$$\beta_{i,k}^{(j)} = \frac{R_{i,k}^{(j)}}{W_{\text{RB}} \psi_{i,k}} \quad (14)$$

式中:  $R_{i,k}^{(j)}$  是以 bps 为单位的所需数据速率;  $W_{\text{RB}}$  是以赫兹为单位的每个资源块的带宽(例如, 在 LTE 中为 180 kHz)。期望系统带宽所需的总资源块的数目表达式如式(15)所示。

$$n_{\text{RB}} = \frac{BW}{W_{\text{RB}}} \quad (15)$$

因此, 可以确定同时连接到网络的用户总数, 表达式如式(16)所示。

$$N_{\text{SU}} = \frac{n_{\text{RB}}}{R_{i,k}^{(j)}} \quad (16)$$

通过基于蒙特卡罗的 Matlab 仿真, 确定了无线网络的吞吐量、能量效率和频谱效率指标。在考虑到时变流量密度的情况下, 通过平均约 10 000 次迭代来完成模拟。

为在不降低服务质量的前提下, 可从轻负载基站向周围基站转移需求, 实现活动基站的数目最小化。根据统计数据, 低流量到达的基站将负载转移到相邻基站, 从而进入睡眠模式。注意, 处于睡眠模式下, 被包围的基站并不会因数据传输服务而降低性能, 且保留 5% 的备份资源块, 以确保在峰值期间 QoS 的鲁棒性。与单元缩放概念的关键区别在

于, 它不需要在缩放时间内依赖于输入电源。本研究首先设计了最佳供电容量的维度, 然后通过负载均衡技术测量了额外的负载承载能力。

本节说明了业务感知负载均衡和小区缩放的基本概念, 其有可能在相邻基站之间切换峰值业务需求以获得更高水平的系统性能。图 2 给出了基于流量控制的小区缩放技术的基本概念。本研究考虑了一个由 19 个基站组成的六边形布局的两层 LTE

蜂窝网络。如图 2(a)所示, 其中将一个基站放置在六边形的中心并且将另外 18 个基站部署在周围。所有基站都连接到控制服务器进行协调。控制服务器根据业务负载、接收到的信号功率和基站的能量可用性, 决定单元的放大、缩小和睡眠模式。为便于理解, 本文给出了七个基站的单元缩放原理, 如图 2 所示。

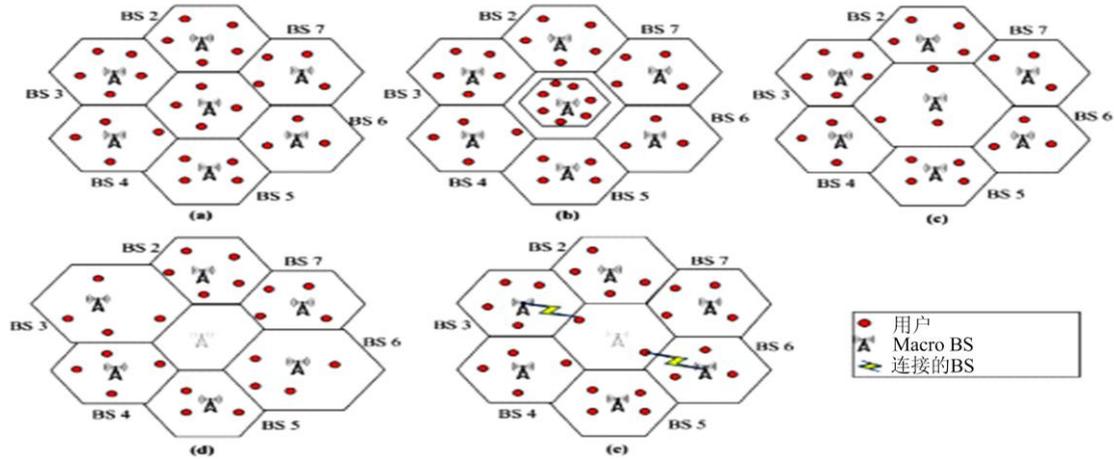


图 2 小区缩放技术

Fig. 2 Cell scaling technology

当中心基站的业务强度高于预定值时, 可通过控制服务器加强信息传输, 实现单元缩放, 如图 2(b)所示。另一方面, 如果移动用户(Mobile Users, MU)从中心基站移出并且使相邻基站拥塞, 则控制服务器广播提供必要的信息以缩小单元以避免相邻基站溢出, 如图 2(c)所示。此外, 如果中心基站的流量强度非常低并且并置的基站具有占用所有移动用户的能力, 则低密度的中心基站将进入睡眠模式以降低能耗, 如图 2(d)所示。在这种情况下, 如果相邻基站的密度较低, 则可以缩小单元, 否则通过如图 2(e)中所示的协作发射来服务于左侧移动用户。然而, 睡眠模式规定适用于非高峰时段的低交通密度区域, 低交通密度信元接收的负荷量取决于其未使用的资源块和可再生能源的可用性<sup>[19]</sup>。

在单元缩放技术中, 控制服务器收集网络中的信道状况和用户需求, 同时集中地执行资源分配和单元缩放操作。资源分配详情如下:

资源块是分配给每个用户的物理资源的最低单位, 在时域中, 资源块是一个时间段。在频域中, 资源块为 180 kHz 的带宽, 12×15 kHz 子载波或 24×7.5 kHz 子载波宽。对于大多数信道, 每个资源块相关联的子载波数目是 12。作为示例, 5 MHz 下

行链路信号可以表示为 25 个资源块宽度或 301 个子载波宽。在 LTE 网络中, 可用带宽的 10% 作为保护带, 以避免重叠。上行链路和下行链路条件下的标准带宽和相应的资源块和子载波如表 1 所示。

表 1 资源块和子载波

Table 1 Resource blocks and subcarriers

带宽/MHz	资源模块	子载波(下行)	子载波(上行)
1.4	6	73	72
3	15	181	180
5	25	301	300
10	50	601	600
15	75	901	900
20	100	1 206	1 200

基于工作带宽来确定分配给各个基站的资源块的数目。各个基站根据用户需求使用其分配的资源块。在每个时间段中, 分配算法都会做出这个决定。如果一个资源块不能满足用户能量吞吐量的目标要求, 则根据空闲资源块的可用性来分配另一个资源块。因此, 分配给单个用户的总带宽可以由分配给该用户的总资源块和单个资源块的频带宽度(Band Width, BW)的乘积来计算。

在资源块算法中,  $k = UE_1, UE_2, \dots, UE_m$  为必须

被服务的  $m$  个用户的集合,  $R_i$  为用户能量的总吞吐量目标,  $n_{RB}$  为资源块的数目,  $W_{RB}$  为单个资源块的频带宽度,  $\beta_{i,j}$  为由  $BS_i$  分配给  $UE_j$  的带宽。二进制变量  $\chi_{i,j}$  表示基站和用户能量之间的关联策略, 如式(17)所示。

$$\chi_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{用户能量 } UE_j \text{ 穿越通过基站 } BS_i \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (17)$$

两层蜂窝网络中的所有 19 个基站根据它们的到达业务速率、接收信号功率和可用能量按升序进行分类。七个单元在被相邻的基站包围的集群中充当中心基站。例如, 根据图 2, 中心基站 BS1 被相邻的基站 BS2、BS3、BS4、BS5 和 BS6 包围, 当中心基站 BS1 切换到休眠模式时, 上述相邻基站可临时承担起节能接收器的作用。在这种情况下, 接受方基站正在调整扩展覆盖区域的发射功率, 而提供方基站完全不知道新的业务到达。在高业务密度的情况下, 中心基站将搜索相邻基站以共享负载, 并根据所提出的启发式算法将一定比例的负载转移到低业务密度基站<sup>[20]</sup>。因此, 相邻基站将通过接收移位的负载而充当接收器基站, 并且中心基站将充当施主基站。在业务密度非常低的情况下, 中心基站将负载转移到相邻的低密度基站上, 并进入休眠模式以节省能量。如果业务密度再次高, 则主动基站会向中心基站发送消息进行唤醒, 以降低相邻基站的负载。注意, 该协调过程可以由控制服务器通过调整覆盖区域和传送接收器基站的功率来完成。在本文中, 网络合作的思想是由施主基站本身和受主基站的业务状态决定的。在负载平衡技术中, 相邻的基站能够在集群中相互协调。采用这种动态负载均衡方法, 通过自适应调整主动基站, 可以大大提高系统性能。

对于流量分布, 发送方基站选择能够维持期望 QoS 的候选空间的最佳组合。因此, 可以使用不同的受主基站群选择方案来选择候选空间的最佳组合。考虑一个选择方案  $C_n$ , 它意味着一个候选空间包含一组从接收器  $BSs(N_a)$  到  $N_s$  邻居基站群的候选基站组合。定义候选组合的总数为  $\sum_{c=1}^{N_a} \binom{N_s}{c}$ , 选择方案为  $C_n (N_a \leq N_s)$ 。

举例来说, 如果选择方案是中心基站 BS1 的  $C_1$ , 则基站的候选空间包含以下组合: {BS2},{BS3},{BS4},{BS5},{BS6},{BS2,BS3},{BS2,BS4},{BS2,BS5}, {BS2,BS}, {BS3,BS4},{BS3,BS5},{BS3,BS6},{BS4,BS5},{BS4,BS6},{BS5,BS6},{BS2,BS3,BS4},

{BS2,BS3,BS5},{BS2,BS3,BS6},\dots,{BS2,BS3,BS4,BS5,BS6}。

在负载平衡算法中,  $S_{i,j} = S_1, S_2, \dots, S_{z_i}$  为在运行模式下, 其通信量为共享的基站集,  $C_{i,j} = C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,M_i}$  为候选基站。  $C_{i,j}^a$  为接受方候选基站集,  $Z_{i,j}$  为其拥有的一组运营基站的流量分布。另外,  $C_{i,j}^s = \beta_i$ , 只有当它能将其流量重新分配到  $S_{i,j}$ ,  $\chi_{i,j} = \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k$  中且每个基站处于工作状态时才进入睡眠模式。  $F_{i,j} = \beta_i$  在  $C_{i,j}^a$  或  $C_{i,j}^s$  中搜索最佳组合  $BS(F_{i,j})$ 。

为了确定连接到 LTE 基站的同时用户的数量, 本文假设全速率的语音数据速率为 64 kbps, 半速率的语音数据速率为 32 kbps, 因特网速率为 256 kbps, 视频数据速率为 512 kbps。此外, 每个资源块的数据所需的带宽是 180 kHz。LTE eNodeB 的同时用户数数量的计算过程为: 所有报头的 VoLTE 数据包长度=编解码器位+RTP 报头+UDP 报头+IP 报头。

对于支持 RoHC 的系统, 在空中接口下执行 VoLTE 语音呼叫需要大约 300 位。对于长期工作状态, 通常将无线电资源的最小单位作为物理资源块 (PRB)。在 LTE 中, 一个物理资源块在 1 ms 的时间长度上具有 12 个子载波和 14 个符号, 或者  $12 \times 14 = 168$  个资源元素。一些资源元素由控制符号(PDCCH)和导频符号(RS)接合, 它们提供大约 120 个可用于数据广播的资源元素。LTE 下行链路调制为 PDSCH 提供不同的调制编码方案(MCS), 例如 QPSK、16QAM 和 64QAM, 这意味着每个资源每个符号可以分别携带 2 比特、4 比特或 6 比特信息。

如果令用户能量报告信道质量指示符(CQI)15, 那么 eNodeB(即 LTE BS)使用 64QAM 调制方案并且采用  $948/1024=0.926$  有效编码速率, 这意味着每个资源元素平均保持  $6 \times 0.926 = 5.55$  比特数据。因此, 单个 PRB 可以携带  $120 \times 5.55 = 666$  比特数据, 相当于 2 个 VoLTE 语音样本。但是 LTE 调度程序不能为每个用户分配少于一个 PRB, 所以这将计算每个 VoLTE 呼叫需要一个 PRB。在 VoLTE 中, 不需要重传, 每 20 ms 产生一次语音数据, 以确保大约 20 个 VoLTE 呼叫可以一个接一个地共享同一组 PRB。可支持 VoLTE 的最大值计算如式(18)所示。

$$N_{\text{VoLTE}} = \frac{N_{\text{PRB}}}{N_{\text{PRB}} / \text{VoLTE}} \times 20 \quad (18)$$

式中,  $N_{\text{PRB}}$  是 PRB 的可用数量,  $N_{\text{PRB}} / \text{VoLTE}$  是每个 VoLTE 调用的 PRB 的数量。

## 2 修正算法成本建模与优化

本文利用 HOMER 优化软件对不同网络条件下不同类型的成本进行了评估, 从而实现成本的最小化<sup>[21]</sup>。本文模型的净费用(NPC)是资本成本(CC)、重置成本(RC)、净现值(NPC)、运行维护成本(OMC)、燃料成本(FC)和残值(SV)的总和, 表达式如式(19)所示。

$$NPC = \frac{TAC}{CRF} = CC + RC + OMC + FC - SV \quad (19)$$

式中, 总年化成本(TAC)和资本回收系数(CRF)表达式如式(20)、式(21)所示。

$$TAC = TAC_{CC} + TAC_{RC} + TAC_{OMC} \quad (20)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (21)$$

式中:  $N$  是项目的工作周期;  $i$  是年实际利率。系统残值的表达式如式(22)所示。

$$SV = rep \left( \frac{rem}{comp} \right) \quad (22)$$

式中,  $rep$ 、 $rem$  和  $comp$  分别是组件的更换成本、剩余寿命和总共寿命。

为确保服务的连续性, 需要大量的多余电力, 可表示为

$$E_{Excess} = E_{Gem} - E_{BS} - E_1 \quad (23)$$

式中,  $E_1$  包括电池和逆变器的年度损失。本研究主要目标之一是通过最大限度地利用太阳能和电网的能源消耗来减少能源短缺, 从而减少净费用 NPC。系统的目标函数可表示为

$$\begin{aligned} & \text{minimize } NPC \\ & \text{subject to } E_{PV} + E_{EG} > 0 \\ & E_{PV} + E_{EG} > E_{BS} \\ & E_{PV} + E_{EG} + E_{batt} = E_{BS} + E_1 \\ & E_{Excess} = E_{PV} + E_{EG} - E_{BS} - E_1 \end{aligned} \quad (24)$$

式中:  $E_{BS}$  是表 3 中获得的年基站负载消耗量;  $E_{batt}$  是电池组提供的能量。

式(24)保证了由并网太阳能光伏系统产生的能量承载了年基站消耗。式(24)表示包括备用电池在内的总发电量能够满足基站的总能量需求和基站的相关损耗。在满足基站的能源需求后, 至少 10% 的额外能源存储在电池组中, 以便在临界条件下使用, 另外 90% 的能源允许共享, 如式(24)所示。

## 3 仿真性能分析

在该模拟装置中, 本项目期限为 20 年, 年利率为 6.75%。选定地点的年平均太阳辐射量为

4.59 kWh/m<sup>2</sup>/day, 设计了太阳能光伏板的双轴跟踪模式, 并预留了 10% 的反向功率以支持任何临界条件下的基站负载。然而, HOMER 优化软件根据预定义的约束条件, 在每个时间段内进行决策, 以满足净费用 NPC 的基站能量需求<sup>[22]</sup>。表 2 和表 3 分别总结了宏基站和微基站与单元缩放选项相关的技术参数。

表 2 宏基站的缩放参数

半径	400 m	600 m	800 m	1000 m
能量辐射	17 W	25 W	33 W	40 W
缩放程度	40%	60%	80%	100%

表 3 微基站的缩放参数

半径	50 m	100 m	200 m	400 m	500 m
能量辐射	5 mW	210 mW	4.1 W	8.4 W	10.25 W
缩放程度	20%	50%	100%	200%	250%

表 4 总结了考虑平均太阳辐射(4.59 kWh/m<sup>2</sup>/day)的 macro 2/2/2、macro omni 和 micro 配置的最佳系统结构。此外, 表 5 对所选位置的各种太阳强度的最佳系统结构进行了比较。按照本研究的预期, macro 2/2/2 配置需要更高的太阳能光伏板容量, 以满足更高的能源需求<sup>[23]</sup>。研究还发现, 太阳能光伏板的容量随着太阳光强度的增加而减小。这是因为较低容量的太阳能光伏板可以在较高的太阳强度时间内产生较高的能量。另一方面, 对于所有基站配置, 电网、电池和转换器的最佳尺寸保持不变, 这意味着对于不同的网络配置, 电网潮汐太阳能光伏系统可以容易地实现, 而无需改变组件的尺寸。

对于 macro 2/2/2、macro omni 和 micro-enabled 基站系统, 太阳能光伏板和电网系统在 10 MHz 带宽下贡献的功率量分别如图 3—图 5 所示。

由于所选位置的阳光强度值较高, 太阳能光伏板在所有条件下都能产生更多的可再生能源。另一方面, 由于太阳能的不足, 电网系统可以产生额外的能量。太阳能光伏板与电网系统相辅相成。在太阳能强度较高的情况下, 太阳能光伏板产生的能量也较高。此外, 在太阳能光伏和电网系统能量不足的情况下, 备用电源由电池组提供。

表 4 10 MHz 带宽下的最佳系统结构

组成结构	最佳尺寸		
	Macro 2/2/2	Macro Omni	Micro
太阳能光伏/kW	3	1	1
电网/kW	10	20	20
电池/kW	20	20	20
变频器/kW	0.1	0.1	0.1



表 5 不同太阳光强度下系统技术标准汇总表

Table 5 Summary of system technical standards under different sunlight intensities

辐射/(kWh/m <sup>2</sup> /天)	太阳能光伏/kW			电网/kW			电池/kW		
	Macro 2/2/2	Macro Omni	Micro	Macro 2/2/2	Macro Omni	Micro	Macro 2/2/2	Macro Omni	Micro
4	2.5	1	1	20	20	20	64	64	64
4.5	3	1	1	20	20	20	64	64	64
5	2.5	1	1	20	20	20	64	64	64
5.5	2.5	1	1	20	20	20	64	64	64

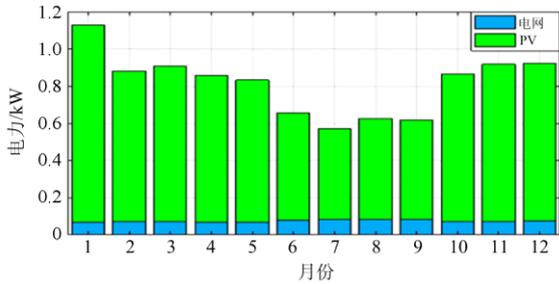


图 3 macro 2/2/2 贡献的量  
Fig. 3 Contribution of macro 2/2/2

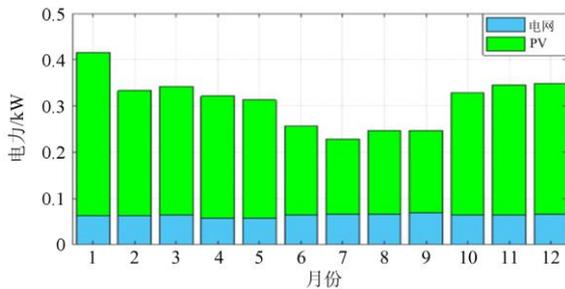


图 4 macro omni 贡献的量  
Fig. 4 Contribution of macro omni

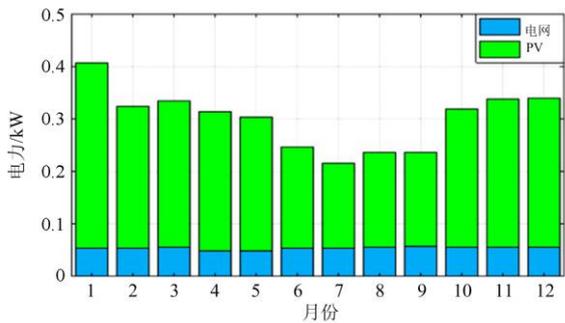


图 5 micro-enabled 贡献的量  
Fig. 5 Contribution of micro-enabled

满足基站负载要求的太阳能光伏板的最佳尺寸如表 4 和表 5 所示。如表 4 所示, 10 MHz macro2/ 2/2 配置的太阳能光伏板的最佳尺寸为 3 kW。因此, LTE macro2/2/2 BS 配置需要 12 个 Sharp ND-250QCs 太阳能模块: 4 个串联, 3 个并联。太阳能光伏电池

板收集的能量用式(1)计算:  $3 \text{ kW} \times 4.59 \times 0.90 \times 365 \text{ 天/年} = 4 \text{ 523 kWh}$ 。此外, 双轴跟踪器可将能量提升四分之一, 即  $6 \text{ 486 kWh}$ 。其他配置的太阳能光伏组件的年发电量和所需数量的计算过程相差无几。

另外, 太阳能光伏板在不同基站条件下产生的年能量如图 6 和图 7 所示。由表 5 可知, 与 macro omni 基站和 micro 基站相比, macro 2/2/2 基站需要更高的能量。因此, 对于 macro 2/2/2 基站, 太阳能光伏板每年产生的能量相对较高。为了满足基站更高的负载要求, 太阳能光伏板的发电量随着系统带宽的增加呈线性增长。

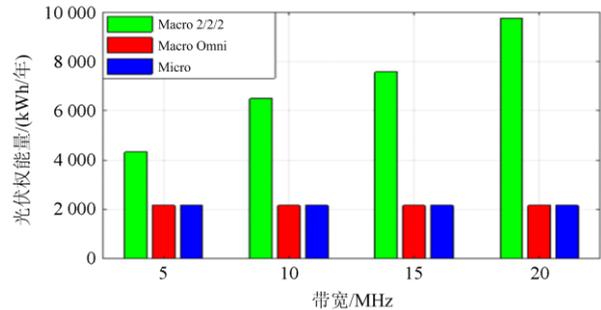


图 6 不同带宽的能量  
Fig. 6 Energy of different bandwidth

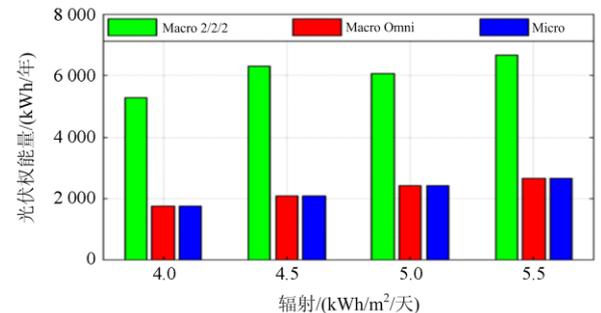


图 7 不同辐射的能量  
Fig. 7 Energy of different radiation

电网系统提供的能量如图 8 所示。所有曲线都在增加, 这说明系统频带宽度值越高, 电网能耗越高。此外, macro2/2/2 基站比其他基站消耗更多的

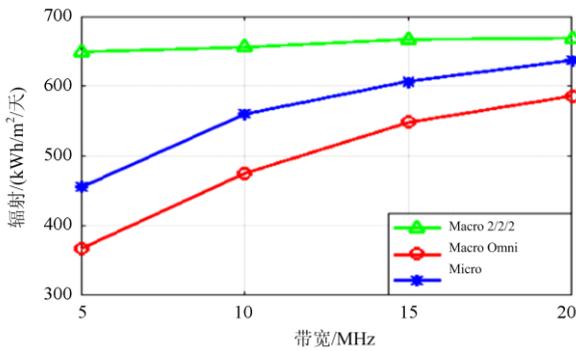


图8 电网系统提供的能量

Fig. 8 Energy provided by power grid system

电网能量, 这是因为它们需要更多的能量。

并网太阳能光伏系统的年度能量分解如图9所示。通过利用当地可获得的可再生能源, 开发一个生产更多可再生能源的系统总是可取的。与本研究的预期一致, 太阳能光伏板为各类网络配置均提供了能源。另一方面, 电网系统为保证供电的连续性贡献了少量的备用电源。HOMER 优化软件可计算出不同类型能源所贡献的总能量, 并计算得到满足基站能源需求的可再生能源的最大利用效率。然而, 基站年总能耗为 5 042 kWh, 电池和逆变器损耗分别为 376 kWh/年和 98 kWh/年。因此, 10 MHz 带宽的年过剩电量可用式(24)估算。

$$(E_{PV})6486 + (E_{EG})656 - (E_{BS})5042 - (E_I)474 = 1619 \quad (25)$$

这些值是针对 LTE macro 2/2/2 基站考虑实际业务模式和平均太阳强度而评估的。同样可以应用到计算所有其他基站的年发电量。

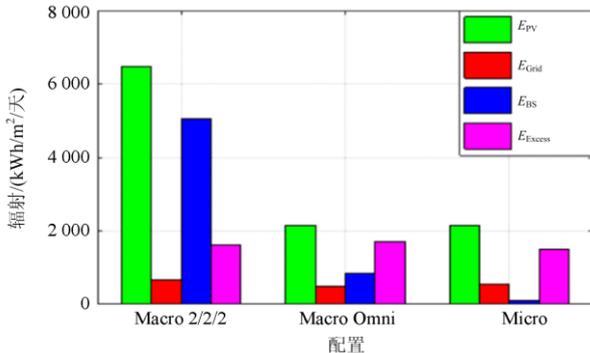


图9 年度能量分解

Fig. 9 Annual energy breakdown

Macro 2/2/2 BS 所需的电池单元数为 64: 8 个电池串联, 8 个电池并联。电池组能够独立支持基站的总时间为 166 h, 可从式(3)计算得到;  $(64 \text{ 节电池} \times V_{nom} = 6 \text{ V} \times Q_{nom} = 360 \text{ Ah} \times B_{DOD} = 0.7 \times 24 \text{ h}) / \text{BS 日均}$

负荷 13.91 kWh。此外, 电池组的标准寿命为 10 年, 根据式(4)计算可得, 年吞吐量和寿命吞吐量分别为 2 400 kWh 和 68 800 kWh。同样, HOMER 计算电池组的自主性为 759 h, 电池损耗为 22 kWh/年, 使用 Micro 配置时, 正常电池寿命为 10 年<sup>[24]</sup>。

不同网络配置的电池组自主性和吞吐量的广泛比较分别见图 10 和图 11。从图中可以发现, 电池组自主性与系统带宽成反比。然而, 电池自主性足以修复光伏故障或任何其他故障。另一方面, 电池组吞吐量与系统带宽成正比。Macro 2/2/2 配置的电池组吞吐量更高。

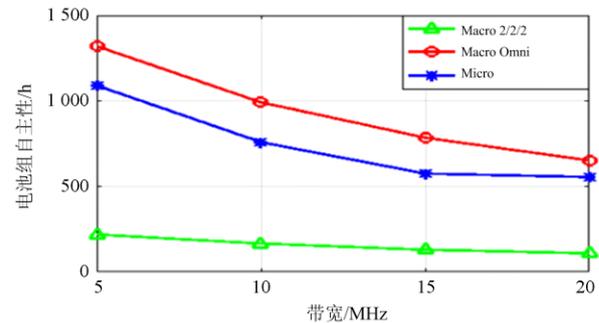


图10 电池组自主性

Fig. 10 Battery pack autonomy

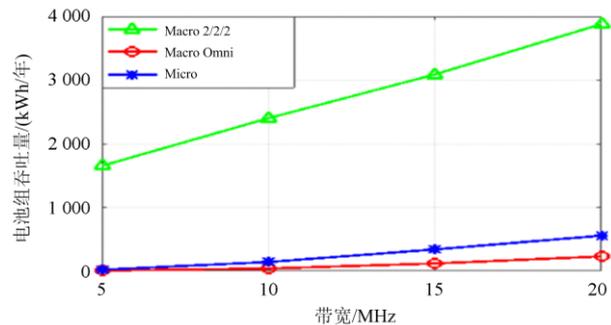


图11 电池组吞吐量

Fig. 11 Throughput of battery pack

在不同系统带宽下, 同时使用 LTE 语音 (VoLTE) 的用户数目如图 12 所示。对于 VoLTE, 同时用户的数量取决于所需的资源块的数量, 这与所使用的调制技术直接相关, 所使用的调制技术取决于用户能量的无线电条件。LTE 系统中可以应用不同类型的调制方案, 并且用户能量向 eNodeB 提供具有信道质量指示符 (CQI) 的射频状况, 并且使用该报告, eNodeB 决定特定资源块的调制情况。CQI 的取值范围为 (1-15), 其中当 CQI 取值为 15 时, 可以获得最佳信道。在最佳 CQI 下, 可以使用最佳 MCS 并且可以增加同时用户的数量。此外, 对于 eNodeB, 可通过持续增加同时用户的数目, 提升系统带宽。

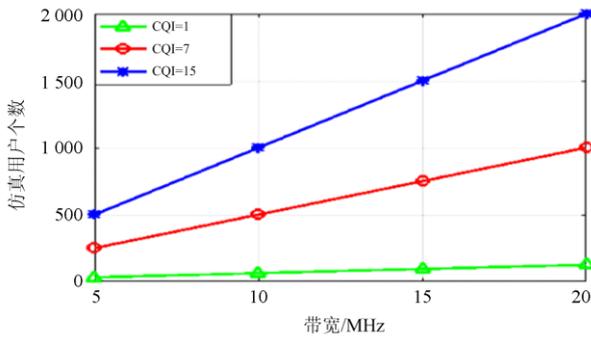


图 12 用户数目

Fig. 12 Number of users

基于系统带宽，负载因子变化对能效性能的影响如图 13 所示。其中“负荷系数”定义为最大负荷与网络中负荷实际值的比率，图 13 说明了在较低的业务密度下操作的基站提供的能量效率较低。另一方面，如果基站在高于平均流量密度的情况下运行，它将提供相对较高的能效性能。例如，在 10 MHz 带宽下，当基站不应用负载平衡算法时，能量效率变为 254.4 kbps/W。相反，如果基站通过应用负载平衡算法操作，EE 可以从 223.37 kbps/W 变化到 584.48 kbps/W，此外，负载均衡算法通过为低密度基站设置睡眠模式来节省能量。

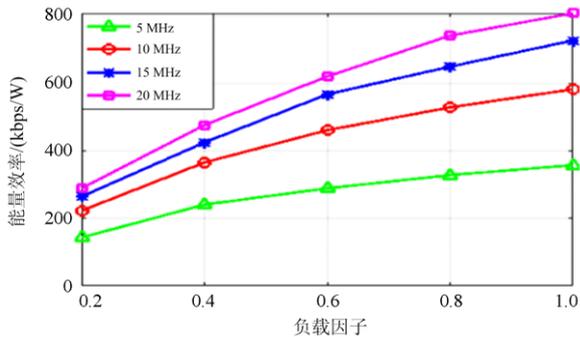


图 13 能效性能的变化

Fig. 13 Changes in energy efficiency performance

对比不同流量强度基站状态，可得出低密度基站可以通过应用负载均衡算法来关闭或发送到睡眠模式，由基站的睡眠模式提供节省的平均能量见图 14。与本研究预期一致，基站的节能曲线随着睡眠时间的增加呈线性增长。此外，更高的系统带宽表现出更高的节能量。从平均节能曲线可以看出，在 10 MHz 带宽条件下，每天睡眠 4 h，每年可节能 1 100 kWh。

眠模式，由基站的睡眠模式提供节省的平均能量见图 14。与本研究预期一致，基站的节能曲线随着睡眠时间的增加呈线性增长。此外，更高的系统带宽表现出更高的节能量。从平均节能曲线可以看出，在 10 MHz 带宽条件下，每天睡眠 4 h，每年可节能 1 100 kWh。

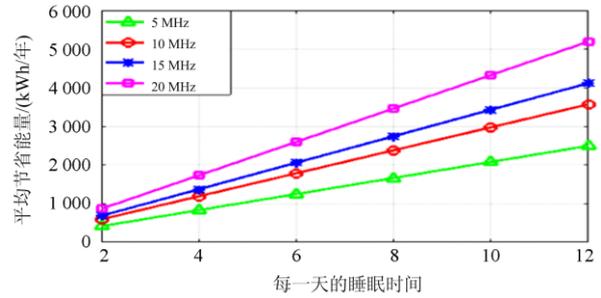


图 14 平均能量节省情况

Fig. 14 Average energy savings

本文系统在 24 h 内的吞吐量性能如图 15 所示，不同网络配置的吞吐量曲线遵循相似的流量模式。

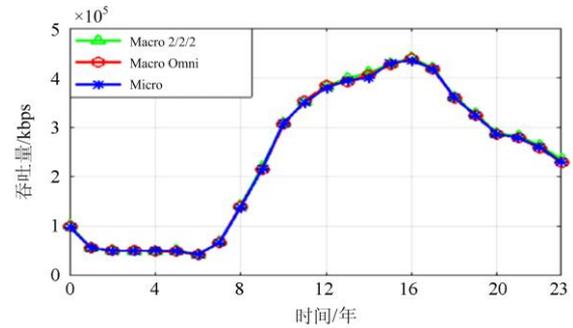


图 15 24 h 内的吞吐量

Fig. 15 Throughput in 24 hours

基于配套储能，独立太阳能光伏、独立电网、太阳能光伏-电网联合系统，三种供电方案的技术标准见表 6。结果表明，在 macro 2/2/2 配置下，太阳能光伏并网发电系统的净费用 NPC 和现金交易费用 COE 分别比单机系统节省 8.8% 和 10.43%，此外还可以节省约 88.64% 的碳排放量。

表 6 BW=10 MHz 不同供电方案的技术标准比较

Table 6 Comparison of technical standards for different power supply schemes with BW=10 MHz

供应方案	NPC/美元			COE/美元			CO <sub>2</sub> (kg/年)			额外电力(kWh/年)		
	Macro 2/2/2	Macro Omni	Micro	Macro 2/2/2	Macro Omni	Micro	Macro 2/2/2	Macro Omni	Micro	Macro 2/2/2	Macro Omni	Micro
太阳能光伏/电池	39 852	37 218	37 218	0.733	4.034	3.085	0	0	0	1 064	1 231	940
电网/电池	44 113	37 918	37 962	0.824	4.101	3.146	3 656	599	829	0	0	0
太阳能光伏/电网/电池	40 195	37 850	37 961	0.738	4.102	3.146	415	300	354	1 619	1 706	1 498

## 4 结论

为了实现无线网络能耗的精确估计, 充分考虑用户位置信息的应用, 本文提出了一种基于并网太阳能光伏/电池系统的无线网络低功耗策略。通过分析数值实验结果可得出如下结论:

(1) 为了满足基站更高的负载要求, 太阳能光伏板的发电量随着系统带宽的增加呈线性增长。基站的节能曲线随着睡眠时间的增加呈线性增长。

(2) 在较低的业务密度下操作的基站提供的能量效率较低。另一方面, 如果基站在高于平均流量密度的情况下运行, 它将提供相对较高的能效性能。

(3) 提出的并网太阳能光伏/电池系统可以显著降低电网能耗, 发电效率高达 54.8%, 并通过有效的可再生能源收集模型确保显著的能源可持续性。

所提出的算法能够在 macro 2/2/2、macro omni 和 micro 配置的最佳系统结构下进行验证, 证明了提出的方法能够在不同配置下均保证较好的性能, 后续研究重点是本文所提方法在大规模系统的验证及应用。在大规模系统中的应用主要面临数据量的急剧增大, 相应的处理能力是否能够满足要求, 如何解决计算效率问题将成为主要考虑的问题之一。

## 参考文献

- [1] 陈文彬, 徐大勇, 郭瑞鹏. 负荷预测对新能源电网多目标优化调度的影响规律研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 46-51.  
CHEN Wenbin, XU Dayong, GUO Ruipeng. Study on the influence of load forecasting on multi-objective optimal dispatching of new energy grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 46-51.
- [2] 刘伟. 电网严重故障下的电压稳定应对措施分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 163-170.  
LIU Wei. Analysis of voltage stability measures under severe grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 163-170.
- [3] 田坤鹏, 孙伟卿, 韩冬, 等. 基于两阶段鲁棒优化的可再生能源 DNE 极限评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 73-80.  
TIAN Kunpeng, SUN Weiqing, HAN Dong, et al. DNE limit assessment of renewable energy based on two-stage robust optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 73-80.
- [4] JAHID A, MONJU K, HOSSAIN H. Hybrid power supply solutions for off-grid green wireless networks[J]. International Journal of Green Energy, 2019, 16(1): 12-33.
- [5] HOSSAIN A, RAHMAN M. Hybrid solar PV/biomass powered energy efficient remote cellular base stations[J]. International Journal of Renewable Energy Resources, 2020, 10(1): 329-342.
- [6] LIU Q, HAN Q, ANSARI N, et al. On designing energy-efficient heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Transactions on Green Communication Network, 2018, 62(2): 721-734.
- [7] 刘永生, 陈俊, 李娟, 等. 基于电流暂态量的分布式直流配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 159-167.  
LIU Yongsheng, CHEN Jun, LI Juan, et al. Distributed DC distribution network protection scheme based on current transients[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 159-167.
- [8] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.  
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional order control for battery / superconducting hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [9] 肖驰, 张卫东, 辛昂倍, 等. 基于智能监控系统的分布式光伏故障自动诊断研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2021, 43(2): 248-251.  
XIAO Chi, ZHANG Weidong, XIN Angbei, et al. Research on distributed photovoltaic fault automatic diagnosis based on intelligent monitoring system[J]. Automation and Instrumentation, 2021, 43(2): 248-251.
- [10] 胡文建, 刘彦军, 孙静, 等. 基于流量感知的无线异构网络终端接入控制机制[J]. 信息技术, 2020, 44(3): 6-12.  
HU Wenjian, LIU Yanjun, SUN Jing, et al. Traffic aware terminal access control mechanism for wireless heterogeneous networks[J]. Information Technology, 2020, 44(3): 6-12.
- [11] 杜文超, 吕丹玲. 电力节能减排与资源优化配置技术研究[J]. 节能与环保, 2020(9): 43-44.  
DU Wenchao, LÜ Danling. Research on power energy saving and emission reduction and optimal allocation of resources[J]. Energy Saving and Environmental Protection, 2020(9): 43-44.
- [12] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.  
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method for hybrid HVDC transmission system based on

coordination of current limiter and circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

[13] 李向伟, 刘思言, 高昆仑. 基于双向长短时记忆网络和卷积神经网络的电力系统暂态稳定评估[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2733-2739.

LI Xiangwei, LIU Siyan, GAO Kunlun. Power system transient stability assessment based on bidirectional long short time memory network and convolutional neural network[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(7): 2733-2739.

[14] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.

ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated restoration of multi infeed DC systems based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.

[15] 周宇, 陈江兴, 付俊峰, 等. 基于云计算的电力任务调度优化策略研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 28-32, 39.

ZHOU Yu, CHEN Jiangxing, FU Junfeng, et al. Research on power task scheduling optimization strategy based on cloud computing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 28-32, 39.

[16] 邢小文, 杨文强, 米树华, 等. 电力电子技术在可再生能源制氢系统中的应用[J]. 电力电子技术, 2020, 54(12): 1-4.

XING Xiaowen, YANG Wenqiang, MI Shuhua, et al. Application of power electronic technology in renewable energy hydrogen production system[J]. Power Electronic Technology, 2020, 54(12): 1-4.

[17] 杨志, 刘识, 张帆. 智能化电力数据报表模型的研究与应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(15): 95-99.

YANG Zhi, LIU Zhi, ZHANG Fan. Research and application of intelligent power data report model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(15): 95-99.

[18] XU X, YUAN Y, CHEN W, et al. Adaptive cell zooming and sleeping for green heterogeneous ultradense networks[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2018, 67(2): 1612-1621.

[19] KYESSWAM M, MURRAY A, SCHMURR P, et al. Impact of grid partitioning algorithms on combined distributed AC optimal power flow and parallel dynamic power grid simulation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(9): 112-125.

[20] FLETSCHER L, SUAREZ A, GRACE D, et al. Energy-aware resource management in heterogeneous cellular networks with hybrid energy sources[J]. IEEE Transactions on Network Service Management, 2019, 16(1): 279-293.

[21] JAHID A, ISLAM K, HOSSAIN M, et al. Performance evaluation of cloud radio access network with hybrid power supplies[C] // Proceedings International Conference Sustainable Technology Industry (STI), 2019, Dhaka, Bangladesh: 1-5.

[22] LI Y, ZHANG H, WANG J, et al. Energy efficient deployment and adaptive sleeping in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Access, 2019, 34(7): 35838-35850.

[23] JIANG Y, ZOU Y, GUO H, et al. Joint power and bandwidth allocation for energy-efficient heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communication, 2019, 67(9): 6168-6178.

[24] CLAEYS S, DECONINCK G, GETH F. Decomposition of n-winding transformers for unbalanced optimal power flow[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(24): 5961-5969.

---

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-26

作者简介:

向征(1985—), 男, 高工, 主要研究方向为通信、网络、信息、电力工控安全; E-mail: ccc20210@163.com

李自强(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

(编辑 张爱琴)