



基于能量损耗与能源代价均衡的基站休眠机制

韩东升, 郑冰, 陈智雄

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 5G 系统中的网络密集化使得网络节点数量更加庞大, 导致无线通信系统能量损耗急剧增加, 加重了运营商的经济负担, 增加了 CO₂ 的排放。基于此, 从能量损耗和经济层面两方面着手, 综合考虑了备选基站组数量及新能源基站相对位置等因素, 建立了在智能电网环境下的综合无线系统能量损耗模型。提出了一种基于能量损耗与能源代价均衡的基站休眠算法, 该算法依据能量损耗确定备选基站组并从中选择能源代价最小的一组作为激活基站, 从而实现能量损耗与能源代价的折中。仿真结果表明, 所提算法以提高少量能源损耗为代价, 显著降低了系统的能源代价。

关键词: 5G; 节能; 绿色网络; 资源分配; 休眠机制

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017207

Base station sleep mechanism based on power consumption and energy cost balance

HAN Dongsheng, ZHENG Bing, CHEN Zhixiong

School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Abstract: Deploying dense network in 5G system increases the number of nodes, which leads to a sharp increase in power consumption of wireless communication system, aggravates the economic burden of mobile network operator and exacerbates the emission of CO₂. Therefore, considering the number of candidate base station (BS) group and the relative position of the BS supplied by new energy, a comprehensive power consumption model in wireless communication system was investigated in terms of the power consumption and economical level. A base station sleep algorithm based on power consumption and energy cost balance was proposed to achieve a tradeoff between them, which selected candidate groups according to the corresponding power consumption and then determined the active group by choosing the cheapest ones. Simulation results show that the proposed algorithm can significantly reduce energy cost of communication bases system although it leads to a negligible increase in power consumption.

Key words: 5G, energy saving, green network, resource allocation, sleep mechanism

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2017-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61601182, No.61302106); 河北省自然科学基金资助项目 (No.F2017502059, No.F2014502029); 中央高校科研业务费资助项目 (No.2016MS98)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61601182, No.61302106), Hebei Provincial Natural Science Foundation of China (No.F2017502059, No.F2014502029), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2016MS98)



1 引言

当前,移动通信已融入社会生活的每个角落,越来越多的用户加入宽带系统,渴望在移动状态下有更快的 Internet 接入。据统计表明:从 2006 年开始移动宽带有了 92% 的增长,预计在 2017 年将会有 7 万亿用户享受到无线服务,即联网连接无线设备的数量将达到世界人口的 1 000 倍^[1]。为满足用户日益膨胀的通信需求,在未来 10~15 年,网络吞吐量需提高近 1 000 倍^[2]。物联网技术和移动互联网技术的快速发展又几乎颠覆了传统的移动通信模式,对下一代移动通信系统提出了新的要求^[3,4]。然而,提高吞吐量和降低功耗是 5G 无线通信系统中看似矛盾的两个要求^[5]。网络密集化是解决该问题的有效途径之一^[6,7],该技术依赖于低价、低能量损耗基站(base station, BS)的超致密、不规则部署,使得基站密度与用户密度成正比。用户数和基站数的双重增长,导致通信系统功耗急剧增加。据运营商介绍,基站系统的能量损耗占通信系统总电费支出的 70% 以上^[8]。信息通信产业的能量损耗及其造成的污染问题已变成社会的热点问题^[9]。通信系统节能问题可从通信侧和基站侧两个方面进行考虑。而功率消耗主要集中于基站端,因此基站系统节能问题便显得尤为重要。功率控制(power control, PC)、不连续传输(discontinuous transmission, DTC)及天线自适应(antenna adaptation, AA)是 3 种主要降低基站能耗的资源管理方案^[10]。能量效率(energy efficiency, EE)定义为效益成本比,体现了通信系统中每焦耳能量可传输的比特数,被广泛应用于资源分配的相关论文中^[11-13]。其中,参考文献[14]结合关断机制,减少了运营商开销:

能量效率(EE)

$$= \frac{\text{区域频谱效率}[\text{bit}/\text{symbol}/\text{km}^2]}{\text{发射功率} + \text{区域电路能量损耗}[\text{J}/\text{symbol}/\text{km}^2]}$$

(1)

基于移动网络动态性的应用特点,用户移动性与作息规律使得网络业务负载具有空时变化特性。利用休眠机制在非高峰时段有选择性地关闭低负载基站,可以平衡发射功率和电路损耗^[15],从而进一步节约基站系统能耗^[16-18]。参考文献[19]立足于休眠机制优化资源分配,提出了一个多准则基站切换算法,使用一系列划分修正优先等级的标准选择相邻基站,得到了最佳通信量分布及基站休眠方案。然而,基站系统能量损耗造成的经济成本才是人们最为关注的问题。在智能电网的环境中,区域电价可动态变化以实现能量的有效利用。此外,基站上配置的可再生能源产能设备可从周围环境中收集能源,因此其电价通常小于智能电网供电的价格^[20],成为构建经济型通信系统的有效途径。由于传统能源的分时电价政策及可再生能源的加入,使得能源代价与能量损耗并非简单的线性关系,单纯考虑能量损耗难以体现其经济价值。参考文献[21]指出需求侧管理是智能电网的特征之一,该文通过分析分布式电网、可再生能源、储能装置的供电情况及无线通信系统的用电需求,构建了随机能量管理模型,并应用 Benders 分解优化了能量在无线基站系统中的分配。参考文献[22]进一步提出了自适应的能量管理模型,可根据能量供给情况自动调整能源供给量,从而提高能量利用率并降低能量损耗的经济成本。参考文献[23]提出了一种适用于 CoMP 系统的联合能量管理模型,并在保证 QoS 的前提下,利用拉格朗日对偶法实现了系统能源代价最小化。

通过以上分析,本文建立了在智能电网环境下的无线系统能量损耗模型,考虑了电网回购剩余可再生能源及可再生能源产能设备相对位置的影响,实现了能量域资源的优化分配。在此基础上,提出了一种基于休眠机制的能耗—代价均衡算法,该算法权衡系统能量损耗和能源代价,达到了基站系统经济节能的目的。

2 系统模型

2.1 无线通信系统模型

考虑一个采用联合处理 (joint process, JP) 方式的多基站协作系统, 如图 1 所示。该系统由固定的 N ($N>1$) 个基站组成, 记为 $\mathbf{N}=\{1,\dots,N\}$, 每个基站具有 M ($M>1$) 根发射天线, 且配置各自独立的可再生能源供给装置。基站能源供给装置的差异导致各基站可再生能源供给速率有所区别。在基站覆盖范围内随机产生 K 个用户, 记为 $\mathbf{K}=\{1,\dots,K\}$ 。

根据基站休眠机制, 使冗余基站进入休眠状态可大大降低基站系统能耗。不失一般性地, 假设该系统需要 N' ($N'=2$) 个基站处于激活状态即可满足用户需求, 分别记为 BS_1 和 BS_2 , 其余 \bar{N}' 个基站进入休眠状态。那么用户 k 的接收信号可以表示为:

$$y_k = h_k x_k + \sum_{l \neq k} h_k x_l + \sigma^2 \quad (2)$$

其中, $x_k \in C^{2M \times 1}$ 为用户 k 的发送信号, σ^2 为

高斯白噪声, $h_k \in C^{1 \times 2M}$ 为用户 k 的信道向量, 可表示为:

$$h_k = \begin{bmatrix} \sqrt{Pr_{1k}} h_{1k} & \sqrt{Pr_{2k}} h_{2k} \\ \sqrt{Pr_{1k}} h_{1k1} & \sqrt{Pr_{1k}} h_{1k2} & \dots & \sqrt{Pr_{1k}} h_{1kM} \\ \sqrt{Pr_{2k}} h_{2k1} & \sqrt{Pr_{2k}} h_{2k2} & \dots & \sqrt{Pr_{2k}} h_{2kM} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, Pr_{1k} 、 Pr_{2k} 分别为用户 k 接收来自 BS_1 和 BS_2 信号的接收功率。为保证用户服务质量, 假设用户需求速率为 $R=[r_1, r_2, \dots, r_k]$ 。根据香农公式可知:

$$r_k = B \log(1 + SNR) = B \log\left(1 + \frac{Pr_k}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

可推导出用户接收功率为:

$$Pr_k = (2^{\frac{r_k}{B}} - 1) \sigma^2 \quad (5)$$

利用功率注水算法进行功率分配, 同时考虑大尺度衰落, 可得 BS_n 对用户 k 的发射信号为:

$$Pt_{nk}(r_k) = L_{nk} Pr_{nk}(r_k) \quad (6)$$

其中, L_{nk} 为 BS_n 和用户 k 间的路径损耗, Pt_n

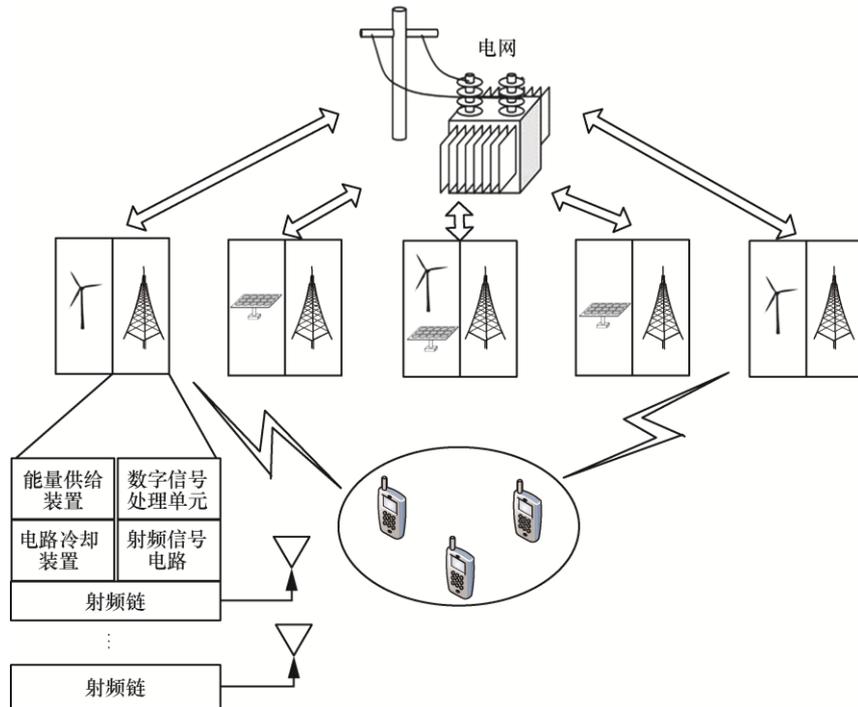


图 1 系统模型



为 BS_n 发射总功率, 有 $P_{t_n} = \sum_{k \in K} P_{t_{nk}}$ 。

2.2 能量损耗模型

基站可由电网（默认为传统能源）及可再生能源（包括风能和太阳能）为其提供电能, 并且当基站的可再生能源装置供给的电能有剩余时, 可以由电网进行回购。由于新能源的产能周期约为 15 min, 故将一天的时间划分为 $T=96$ 个时隙, 每个时隙宽度 $\omega_t=15$ min。其中, 电网采用分时电价策略, 用电价格与用电时间有关, 并将分时电价记为 a_t ; 电网回购剩余可再生能源价格固定为 a_{back} , 且 $0 < a_{back} < a_t$ 。

在一天时间内, 太阳能产能速率近似服从正态分布^[22], 如图 2 所示, 其表达式为:

$$energy_solar(t) = \mu_1 \cdot \lambda_s \exp\left(-\frac{(t-48)^2}{81}\right), \lambda_s \in \{\lambda_{s1}, \lambda_{s2}\} \quad (7)$$

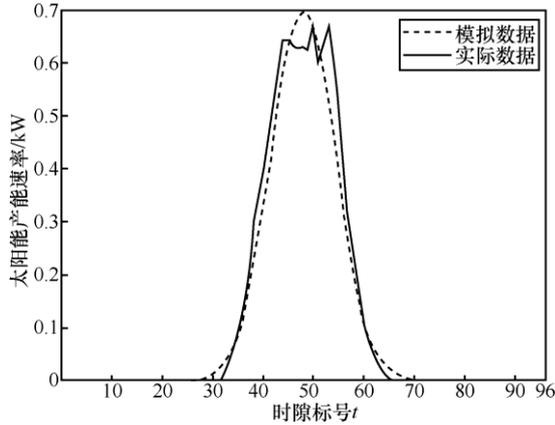


图2 太阳能产能速率

风能产能速率固定为一个常数, 如图 3 所示, 其表达式为:

$$energy_wind(t) = \mu_2 \cdot \lambda_w, \lambda_w \in \{\lambda_{w1}, \lambda_{w2}\} \quad (8)$$

其中, 太阳能转化为电能的效率 $\mu_1 = 50\%$ ^[23], 风能转化效率 $\mu_2 = 42\%$ ^[24]。同时考虑不同天气情况的概率, 根据天气状况的统计数据适当选取不同的参数 λ_s 和 λ_w 。

在蜂窝通信系统中, 基站能耗 $P_{BS,t}$ 与其所处的状态有关。激活状态功率损耗 $P_{active,t}$ 由发射功耗

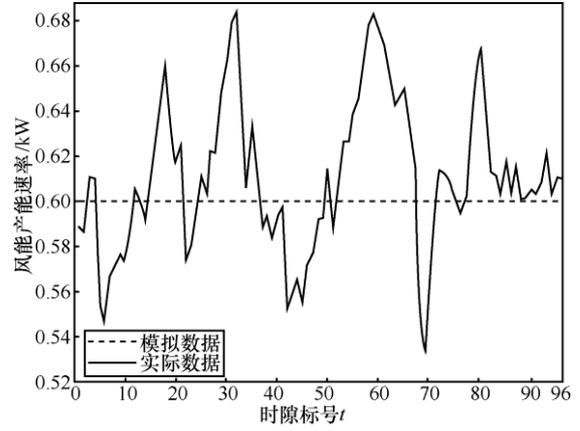


图3 风能产能速率

P_{t_i} 和固有功耗 P_{fix} 两部分组成, 其中固有损耗指的是功率放大器、冷却装置、数据处理单元等部件的损耗^[17]。休眠状态功率损耗固定为 $P_{sleep,t}$ 。那么能量损耗模型可以表示为^[25]:

$$P_{BS,t} = \begin{cases} P_{active,t} = P_{fix} + \eta P_{t_i}, & \text{BS处于激活状态} \\ P_{sleep,t}, & \text{BS处于休眠状态} \end{cases} \quad (9)$$

其中, η 为一固定常数, 表示增加单位发射功率时基站能耗的增量。

同时, 为体现基站系统由于能量损耗造成的经济成本, 定义能源代价为其相应的能量损耗与能源价格的乘积, 记为 $cost$:

$$cost = \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (x_{n,t} \cdot a_t Q1_{n,t} + \bar{x}_{n,t} \cdot a_{back} Q1_{n,t}) \quad (10)$$

$$Q2_{n,t} = energy_re_{n,t} \times \omega_t \quad (11)$$

$$Q1_{n,t} = P_{BSn,t} - Q2_{n,t} \quad (12)$$

其中, $energy_re_{n,t}$ 为基站 n 在第 t 时隙的可再生能源产能速率, $Q2_{n,t}$ 为基站 n 在第 t 时隙的可再生能源供给电量, $Q1_{n,t}$ 代表基站 n 第 t 时隙能量损耗与可再生能源供给电量之差。 $x_{n,t} \in \{0, 1\}$, 当 $Q1_{n,t} < 0$ 时, $x_{n,t} = 0$; 当 $Q1_{n,t} \geq 0$ 时, $x_{n,t} = 1$ 。

3 基站系统休眠机制

针对所提出的模型, 本文主要研究在保证用户服务质量 (quality of service, QoS) 的前提下, 优化能量域资源分配, 兼顾能量损耗与能源代价, 提出了能耗—代价均衡算法。为显示所提算法的

优越性，引入传统方案加以比较。下面对这两种情形加以分析，当不考虑智能电网回购剩余可再生能源机制时，可令 $a_{\text{back}} = 0$ 。

3.1 传统供能方式

传统供能方式采用分时电价策略，单纯利用传统能源（默认为不可再生能源）为基站系统进行能量供给，忽略了能量多样性对降低基站系统能源代价的作用；随着智能电网技术日益成熟，在基站上配置太阳能电池板、风车等设施，充分利用可再生能源等低价能源，结合传统能源为基站系统进行混合供能已成为主流趋势，电网回购剩余可再生能源可进一步降低基站系统的能源代价。

在传统供能方式中，基站系统能源代价最小等价于基站系统能量损耗最小，其目标函数为：

$$\min(\text{consumption}1) = \min \sum_{t \in \Gamma} \left(\sum_{n \in N'} (\eta P_{\text{tx},t} + P_{\text{fix}}) + \sum_{n \in N'} P_{\text{sleep}} \right) \quad (13)$$

$$\text{s.t. } r_k \geq r_l \quad (14)$$

其相应能源代价为：

$$\text{cost}1 = \sum_{t \in \Gamma} \left(a_t \cdot \left(\sum_{n \in N'} (\eta P_{\text{tx},t} + P_{\text{fix}}) + \sum_{n \in N'} P_{\text{sleep}} \right) \right) \quad (15)$$

3.2 能耗—代价均衡算法

基站系统由可再生能源和传统能源混合供能，权衡基站系统能量损耗和能源代价，并使冗余基站进入休眠状态。系统能量损耗可表示为：

$$\text{consumption}2 = \sum_{t \in \Gamma} \left(\sum_{n \in N'} (\eta P_{\text{tx},t} + P_{\text{fix}}) + \sum_{n \in N'} P_{\text{sleep}} \right) \quad (16)$$

$$\text{s.t. } r_k \geq r_l \quad (17)$$

相应能源代价为：

$$\text{cost}2 = \sum_{t \in \Gamma} \sum_{n \in N} (x_t \cdot a_t Q1_t + \bar{x}_t \cdot a_{\text{back}} Q1_t) \quad (18)$$

$$\text{s.t. } Q1_t = P_{\text{BS},t} - Q2_t \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Q2_t &= \text{energy_re}_t \times \omega \\ &= (\text{energy_solar}(t) + \text{energy_wind}(t)) \times \omega \end{aligned} \quad (20)$$

为兼顾通信系统能量损耗和能源代价，优化能量域资源分配，本文提出了一种能耗—代价均衡算法，该算法可分为两个阶段：阶段一为根据基站系统能耗选择 z 组能耗较低的组合作为备选基站组；阶段二为优先利用可再生能源，从备选基站组中确定系统能源代价最低的组合为激活基站组，其具体过程如下。

阶段一过程如下。

步骤 1 初始化。根据用户移动性特点，考虑用户随机分布情况，并依据天气状况概率确定可再生能源产能速率。

步骤 2 遍历所有可能的选取的基站组 (b_1, b_2) ，根据式 (10) 逐一计算基站系统能量损耗 $\text{power}_t(b_1, b_2)$ 。

步骤 3 选取能量损耗较小的 z 组备选基站组，其相应损耗记为 $O(1), O(2), \dots, O(z)$ 。

步骤 4 确定备选基站组对应的基站标号：

$$(x_{z1}, x_{z2}) = \text{find}(\text{power}_t(b_1, b_2) = O(z)) \quad (21)$$

阶段二过程如下。

步骤 1 优先利用可再生能源供能，根据式 (12) 计算基站系统的能源代价，逐一比较备选基站组能源代价 $\text{price}_t(x_{z1}, x_{z2})$ 。

步骤 2 确定能源代价最低的备选基站组为激活基站组 BS_1 、 BS_2 ，其对应的能量损耗及能源代价为：

$$\text{consumption}1_t = \text{power}_t(\text{BS}_1, \text{BS}_2) \quad (22)$$

$$\text{cost}1_t = \text{price}_t(\text{BS}_1, \text{BS}_2) \quad (23)$$

综上，算法流程如图 4 所示。

4 仿真结果与分析

考虑一个由 5 个基站构成的多点协作 (coordinated multi-point, CoMP) 系统，基站分别记为 $n = 1, 2, L, 5$ ，每个基站配置 $M = 4$ 根发射天线。为符合用户移动性的特点，在每个时隙内随机产生 $K = 8$ 个单天线用户，那么每时隙仅需要

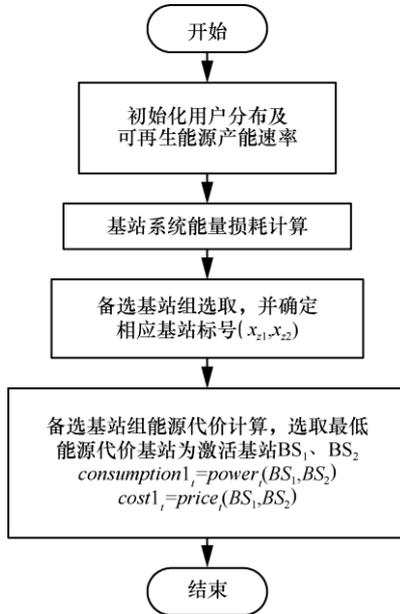


图4 能耗—代价均衡算法流程

$N' = 2$ 个基站处于激活状态, 其余基站进入休眠状态以降低基站系统的能量损耗及能源代价。具体仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

参数	数值
$\{\lambda_{s1}, \lambda_{s2}\}$	{2.0 1.5}
晴天与阴天的概率 $\{P_{\text{sunny}}, P_{\text{cloudy}}\}$	{0.6 0.4}
$\{\lambda_{w1}, \lambda_{w2}\}$	{0.5 0.1}
强风与微风概率 $\{P_{\text{gale}}, P_{\text{breeze}}\}$	{0.4 0.6}
固有损耗 P_{fix}/W	500
休眠功耗 $P_{\text{sleep},i}/W$	250
功率系数 $\eta^{[19]}$	10
用户速率需求 $r_i/(\text{bit s}^{-1})$	5×10^8

传统能源采用峰谷分时电价, 并设置电价系数为 α 。根据分电用电相关文件可知, 高峰时段 (9:00—12:00, 17:00—22:00) 电价为 $1.33\alpha/\text{kW}\cdot\text{h}$, 平段 (8:00—9:00, 12:00—17:00, 22:00—23:00) 电价为 $0.87\alpha/\text{kW}\cdot\text{h}$, 低谷时段 (23:00—次日 8:00) 电价为 $0.51\alpha/\text{kW}\cdot\text{h}$ 。电网回购可再生能源电价为 $0.2\alpha/\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

4.1 不同方案对比

图 5、图 6 和图 7 分别对比了传统供能方式与能耗—代价均衡算法的平均时隙能耗、平均时隙

代价和系统总代价, 其中能耗—代价均衡算法分为电网回购剩余可再生能源和不回购剩余可再生能源两种情况。

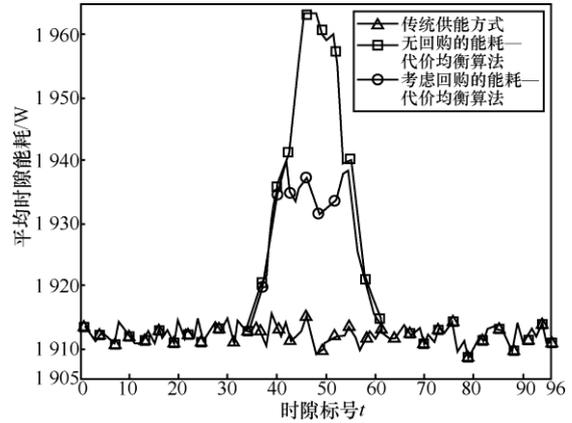


图 5 不同方案的平均时隙能耗对比

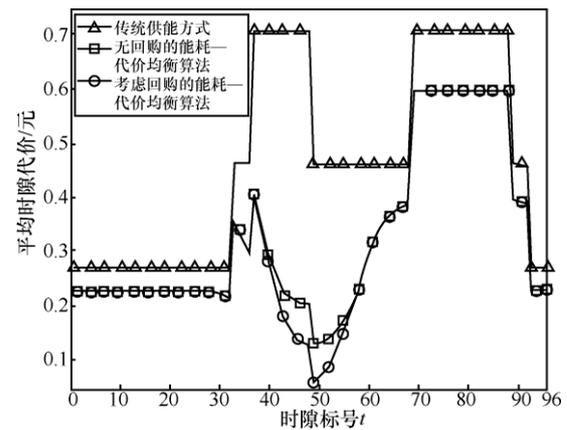


图 6 不同方案的平均时隙代价对比

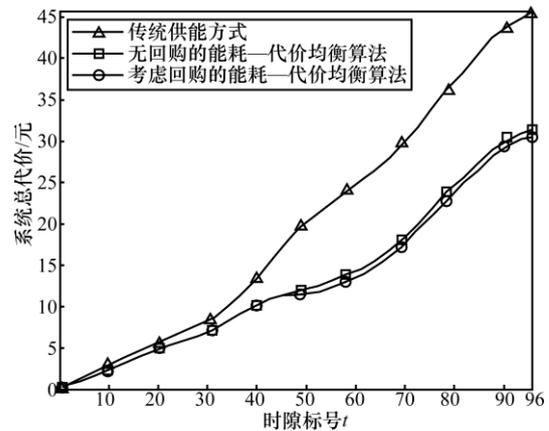


图 7 不同方案的系统总代价对比

由图 5 可知, 传统供能方式时隙能量损耗约为 1914 W , 无明显波动; 而能耗—代价均衡算法

的能耗情况与可再生能源产能速率曲线呈相同的变化趋势，尤其当时隙 t 为 32~60 时，可再生能源供给量多于系统能量损耗，电网回收剩余可再生能源可进一步降低能源代价。仿真结果显示，一天中传统供能方式消耗能量为 1.84×10^5 W，能耗—代价均衡算法平均每天多消耗能量约 700 W，提高了约 0.38%。由图 6 可知，两种算法的平均时隙代价与传统能源价格具有相似的变化趋势，且能耗—代价均衡算法的平均时隙代价远低于传统供能方式。当时隙 t 为 38~58 时，可再生能源产能速率较高，相较于电网不回购可再生能源的情况，进行剩余能源回购最高可降低时隙能源代价 86.86%。由图 7 可知，能耗—代价均衡算法相比于传统供能方式可节约能源代价 30.74% 左右，考虑电网回购剩余能源可进一步降低 2.65%。传统供能方式中，用户与基站间的距离是其能量损耗及能源代价的决定因素；而能耗—代价均衡算法中，将可再生能源产能速率也列入了考虑范围之内，其最终选定的激活基站组兼顾了系统能量损耗与能源代价，虽然系统的能量损耗稍有增加，但是显著降低了系统的能源代价。

4.2 不同备选基站组数量对比

在基于本文建立的综合能量损耗模型的基础上，通过改变能耗—代价算法阶段一中备选基站组数量，进一步研究了该因素对于能量损耗及能源代价的影响，如图 8 和图 9 所示。

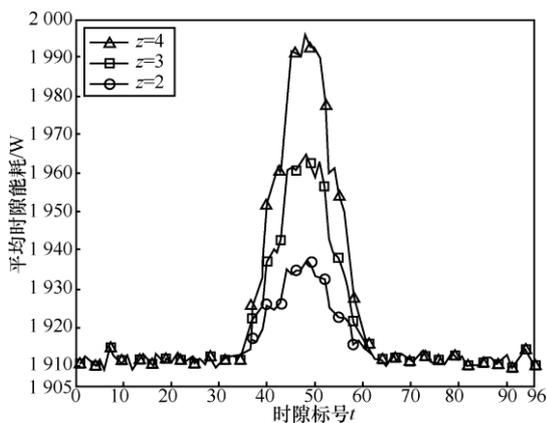


图 8 不同备选基站组数时的时隙能耗对比

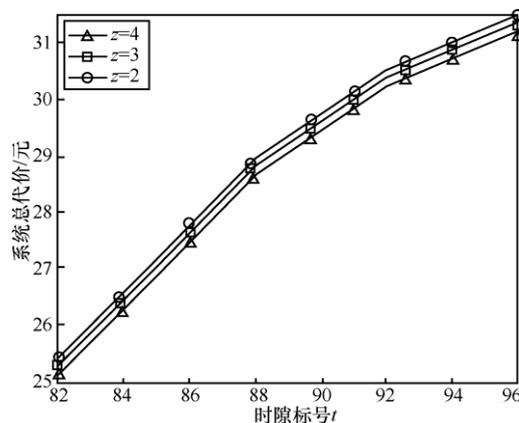


图 9 不同备选基站组数的能源代价对比

由图 8 可知，当 t 为 35~59 时，可再生能源产能速率较高，能耗—代价算法偏向于选择产能速率较高的基站作为激活基站，备选基站组数多，可选择范围大，选择到产能速率最大的基站的可能性就越大；而用户与高产能速率基站间距离的增大，使得其相应能量损耗增加，因而时隙能量损耗曲线呈现出与可再生能源产能速率相似的变化趋势，且分组数量越多，能量损耗越大。但总体而言，系统能量损耗近似为时隙标号的线性函数，即算法经过多次实现取平均值后，各时隙能量损耗近似相等。相比于备选基站组数 $z=2$ 的情形， $z=3$ 时消耗总能量增加 390 W， $z=4$ 时进一步增加了 440 W，其差距有所增大。图 9 描述了对应系统的能源代价，其曲线斜率与传统能源价格成正比。当备选基站组数量越多时，越可能选择到产能速率最高的基站，那么系统的能源代价越小，越接近最优的能量域资源分布情况。在可再生能源速率最高时，可最大程度地降低系统能源代价，尤其在 $t=47$ 时，其节约系统能源代价最高可达 72.80%。

4.3 不同新能源基站部署方案对比

为了不失结论的一般性，本文采用了 3 种不同的新能源基站部署方案，如图 10~图 12 所示。在图 10 中， BS_4 既配置有太阳能转化装置，也配置有风能转化装置。配置有太阳能转化装置的基站与 BS_4 部署在一条直线上，分别为 BS_2 和 BS_3 ，而配置有风能转化装置的基站关于这条“直线”呈轴对称分布。在图 11



中，处于中心位置的基站 BS_3 具有太阳能和风能转化装置，而配置有相同新能源转化装置的基站关于 BS_3 呈中心对称分布。在图 12 中，基站部署位置随机，不遵循任何规则。图 13 以 $z=2$ 为例说明了系统的能源代价情况。其中，图 13(a) 描述了 3 种新能源基站部署方案总代价的整体变化趋势，而图 13(b) 为更加明显地表示中心对称部署方案和轴对称部署方案的代价差距，截取图 13(a) 中部分曲线进行放大。

综合图 13(a) 和图 13(b) 可知，无论采用何种新能源基站位置，其代价曲线斜率均与传统能源价格呈正相关。当新能源基站采用轴对称位置时，系统的能源代价最低，而采用随机位置时能源代价最高，约为前者的 104.43%。从宏观角度而言，新能源基站呈轴对称分布时，相当于缩短了用户与可再生能源产能速率最高的新能源基站间的距离，使得可再生能源得到了更为充分的利用；在该情况下，适当减少备选基站组数量也可以达到较为理想的效果。该理论的提出为未来的新能源基站部署提供了依据。

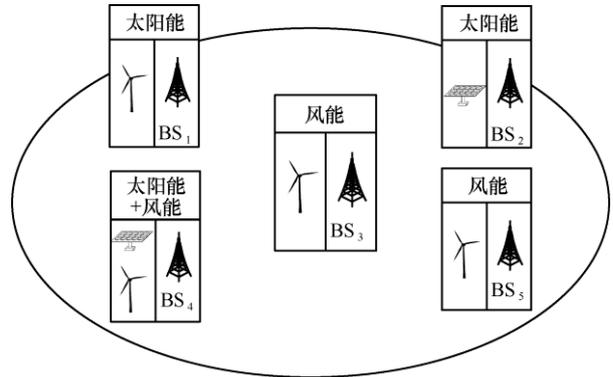


图 12 随机部署方案架构

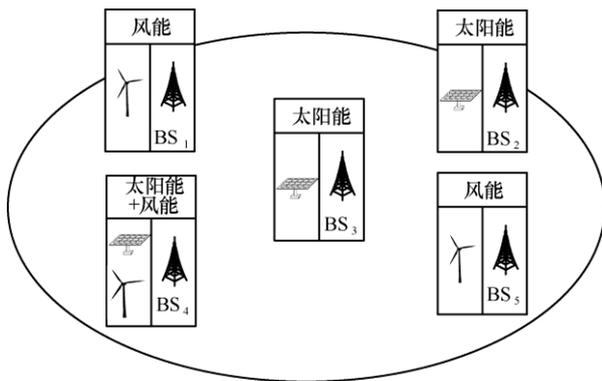


图 10 轴对称部署方案架构

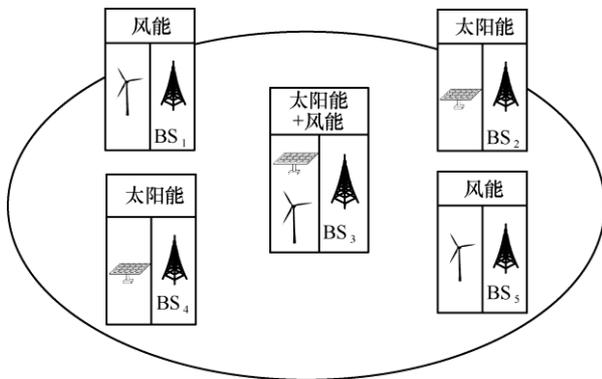
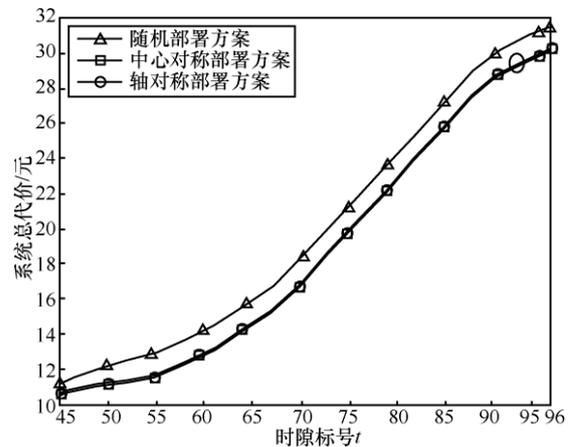
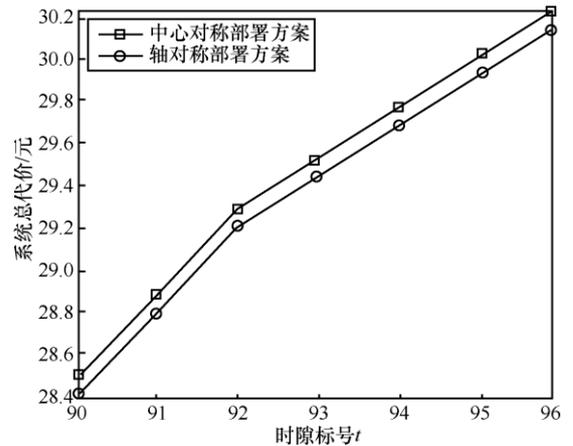


图 11 中心对称部署方案架构



(a) 不同新能源基站部署方案总体代价



(b) 部署方案总代价局部放大图

图 13 不同新能源基站部署方案的总代价

5 结束语

针对基站系统的节能问题，本文提出了能耗—代价均衡算法，该算法可在兼顾系统能量损耗的情况下，求解出最经济的基站休眠方案。仿真结果表明，相比传统供能方式，能耗—代价均衡

算法可大幅降低系统的能源代价,得到休眠基站的最佳分布。而电网回购可再生能源机制可进一步减少能源代价。此外,本文还分析了备选基站组数量及新能源基站部署情况的影响,当备选基站数越多时,算法性能越接近最优解;而当新能源基站呈轴对称分布时,即使减少备选基站组数量,也可达到一个近优的结果。

参考文献:

- [1] WANG C X, HAIDER F, GAO X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. *Communications Magazine IEEE*, 2014, 52(2): 122-130.
- [2] Qualcomm. The 1000x mobile data challenge[EB/OL]. (2013-11-04) [2017-04-25]. <https://www.qualcomm.com/invention/1000x>.
- [3] 王胡成, 徐晖, 程志密, 等. 5G 网络技术研究现状和发展趋势[J]. *电信科学*, 2015, 31(9): 149-155.
WANG H C, XU H, CHENG Z M, et al. Current research and development trend of 5G network technologies[J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(9): 149-155.
- [4] 朱浩, 项菲. 5G 网络架构设计与标准化进展[J]. *电信科学*, 2016, 32(4): 126-132.
ZHU H, XIANG F. Architecture design and standardization progress of 5G network[J]. *Telecommunications Science*, 2016, 32(4): 126-132.
- [5] BJORNSON E, JORSWIECK E A, DEBBAH M, et al. Multi-objective signal processing optimization: the way to balance conflicting metrics in 5G systems[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(6): 14-23.
- [6] BJÖRNSSON E, SANGUINETTI L, KOUNTOURIS M. Deploying dense networks for maximal energy efficiency: small cells meet massive MIMO[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(4): 832-847.
- [7] 陈山枝. 发展 5G 的分析与建议[J]. *电信科学*, 2016, 32(7): 1-10.
CHEN S Z. Analysis and suggestion of future 5G directions [J]. *Telecommunications Science*, 2016, 32(7): 1-10.
- [8] HAN C, HARROLD T, ARMOUR S, et al. Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(6): 46-54.
- [9] FEHSKE A, FETTWEIS G, MALMODIN J, et al. The global footprint of mobile communications: the ecological and economic perspective[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(8): 55-62.
- [10] HOLTkamp H, AUER G, BAZZI S, et al. Minimizing base station power consumption[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 32(2): 297-306.
- [11] HU Y, JI B, HUANG Y, et al. Energy-efficiency resource allocation of very large multi-user MIMO systems[J]. *Wireless Networks*, 2014, 20(6): 1421-1430.
- [12] SON K, KIM H, YI Y, et al. Base station operation and user association mechanisms for energy-delay tradeoffs in green cellular networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(8): 1525-1536.
- [13] MOHAMMED S K. Impact of transceiver power consumption on the energy efficiency of zero-forcing detector in massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(11): 3874-3890.
- [14] BOUSIA A, KARTSAKLI E, ANTONOPOULOS A, et al. Multiobjective auction-based switching off scheme in heterogeneous networks to bid or not to bid?[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(11): 9168-9180.
- [15] HAN S, YANG C, MOLISCH A F. Spectrum and energy efficient cooperative base station doze[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(2): 285-296.
- [16] OH E, KRISHNAMACHARI B. Energy savings through dynamic base station switching in cellular wireless access networks[C]// *Global Telecommunications Conference*, December 6-10, 2010, Miami, USA. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [17] HAN S, YANG C, WANG G, et al. On the energy efficiency of base station sleeping with multicell cooperative transmission[C]// *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, September 11-14, 2011, Toronto, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1536-1540.
- [18] SON K, KIM H, YI Y, et al. Base station operation and user association mechanisms for energy-delay tradeoffs in green cellular networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(8): 1525-1536.
- [19] SUÁREZ L, NUAYMI L, GRACE D, et al. A multi-criteria BS switching-off algorithm for 5G heterogeneous cellular networks with hybrid energy sources[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2016, 27(7): 923-938.
- [20] HAN T, ANSARI N. Powering mobile networks with green energy[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(1): 90-96.
- [21] KAEWPUANG R, NIYATO D, WANG P. Decomposition of stochastic power management for wireless base station in smart grid[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012, 1(2): 97-100.
- [22] NIYATO D, LU X, WANG P. Adaptive power management for wireless base stations in a smart grid environment[J]. *Wireless Communications IEEE*, 2014, 19(6): 44-51.
- [23] XU J, ZHANG R. Cooperative energy trading in CoMP systems powered by smart grids[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 65(4): 2142-2153.
- [24] ELIA. Power generation[EB/OL]. (2016-11-23)[2017-04-25]. <http://www.elia.be/en/grid-data/power-generation/>.
- [25] 北极星电力网. 以色列开发太阳能电池新材料 转化效率提升七成[EB/OL]. (2016-11-25)[2017-04-25]. [http://news.bjx.com.cn/SOLARSTAR. The development of new materials of solar battery in Israel the efficiency up to 70%\[EB/OL\]. \(2016-11-25\) \[2017-04-25\]. <http://news.bjx.com.cn/>.](http://news.bjx.com.cn/SOLARSTAR.The%20development%20of%20new%20materials%20of%20solar%20battery%20in%20Israel%20the%20efficiency%20up%20to%2070%20percent[EB/OL].(2016-11-25)[2017-04-25].http://news.bjx.com.cn/)
- [26] 王士荣, 沈德昌, 刘国喜. 风力提水与风力致热[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
WANG S R, SHEN D C, LIU G X. Wind water extraction and wind heating[M]. Beijing: Science Press, 2012.



- [27] 刘凯, 赵建业, 刘志敏. 基于指派模型的 LTE-A 异构网节能负载均衡算法[J]. 电信科学, 2015, 31(2): 22-28.
LIU K, ZHAO J Y, LIU Z M. Power efficient load balancing algorithm in LTE-A heterogeneous network based on assignment model[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(2): 22-28.

[作者简介]



韩东升 (1980-), 男, 博士, 华北电力大学电气与电子工程学院副教授, 主要研究方向为数字通信系统与无线通信。



郑冰 (1993-), 女, 华北电力大学电气与电子工程学院硕士生, 主要研究方向为无线通信技术。



陈智雄 (1983-), 男, 博士, 华北电力大学电气与电子工程学院副教授, 主要研究方向为信道编码与电力系统通信。