



## 基于成本与网络负载最优的智能 配电通信网络规划策略

王一蓉<sup>1</sup>, 王艳茹<sup>1</sup>, 贺艳华<sup>2</sup>, 王永惠<sup>1</sup>, 唐良瑞<sup>2</sup>

(1. 北京国电通网络技术有限公司, 北京 100070;

2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 针对配电网单个通信终端节点数据量小、通信终端节点多的特点, 在提高网络接入节点数量的基础上最大化网络的负载。在宏基站、微基站部署方式上, 将宏基站与微基站同时部署, 以提供给微基站更多的部署选择。在分析智能配电网络通信业务需求、现有网络规划的弊端的基础上, 建立了多目标优化模型, 并与单目标优化模型进行对比分析。最后, 从规划方案图以及网络性能分析上证明了本文所提策略的优越性。

**关键词:** 智能配电网; 异构无线网络; 网络规划

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2017189

## Smart distribution communication network planning strategy based on optimal cost and network load

WANG Yirong<sup>1</sup>, WANG Yanru<sup>1</sup>, HE Yanhua<sup>2</sup>, WANG Yonghui<sup>1</sup>, TANG Liangrui<sup>2</sup>

1. Beijing Guodiantong Network Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

**Abstract:** Considering of the characteristics such as small amount data of single communication terminal node and large scale distribution of terminal nodes, the strategy of network planning should increase the number of access nodes and maximize the capacity of the network. In the macro and micro base station deployment, the macro base station and the micro base station were simultaneously deployed to provide more deployment options for the micro base station. Based on the analysis of the demand of smart distribution network communication services and the drawbacks of the existing network planning, a multi-objective optimization model was established and a single objective optimization model was established for comparative analysis. Finally, the superiority of the strategy was proved from the scheme diagram and network performance analysis.

**Key words:** smart distribution network, heterogeneous wireless network, network planning

收稿日期: 2017-03-17; 修回日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51507063); 国家电网科技资助项目

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.51507063), State Grid Science and Technology Project



## 1 引言

随着我国经济的飞速发展,智能配电网通信技术取得了很大的发展。智能配电网作为智能电网的重要组成部分之一,当前通信系统单个通信节点数据量小、通信距离不够远、通信终端节点数量偏多的特点仍旧束缚着智能配电网的发展<sup>[1]</sup>。与此同时,智能配电网在高级配电运行(advanced distribution operation, ADO)、高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)、高级资产管理(advanced asset management, AAM)3个部分的需求各不相同<sup>[2]</sup>。现有配电网通信网络的解决方案是在条件允许的情况下,以光纤通信作为首选,以宽带无线通信实现广域覆盖,以载波通信作为接入补充<sup>[3]</sup>。异构融合网络融合多种通信技术,能够满足终端业务在覆盖范围、系统容量、数据传输速率和服务质量等方面的网络性能需求<sup>[4,5]</sup>。合理的网络规划是异构网络能够更好地为智能配电网网络服务的基础,也是多种无线技术有效运用的保障。

现有的无线网络规划技术多以优化算法模型入手,对于业务需求的关注较少。参考文献[6]为了降低 TD-SCDMA 网络基站建设代价,给出了一种基于免疫计算的基站选址优化方案。参考文献[7]针对已有 3G 基站选址优化算法的不足和 TD-SCDMA 网络的特点,提出了一种基于免疫算法的 TD-SCDMA 网络基站选址优化方案,建立了基站选址问题的数学模型,设计了基于反学习的种群初始化方案和精英交叉策略,给出了免疫优化算法框架。因此,现有的网络规划算法复杂度比较大,并忽略了网络综合性能以及网络需求。且传统的网络规划一般先规划宏基站站址,在宏基站规划完成的前提下再规划微基站站址<sup>[8-11]</sup>,增加了网络规划的复杂度,且重复覆盖增加了不必要的网络建设成本。

基于智能配电网的异构无线网络规划应该从以下几个方面入手。针对单个通信终端节点数

据量小、通信终端节点多的特点,提高网络接入节点的数量,最大化网络的容量。在宏基站、微基站部署方式上,将宏基站与微基站同时部署,以提供给微基站更多的部署选择。在算法方面,以算法复杂度较低的算法进行计算,同时考虑到算法的扩展性,提供扩展性较强的优化算法。

## 2 系统模型

网络规划的核心是在保证满足网络通信业务需求的条件下,灵活应对飞速增加的通信需求,减少无线接入网的投资和运维成本,减少功耗和电磁污染。无线网络规划是整个或局部网络设计、部署和管理中的一个重要过程,是根据建网目标确定基站数目及参数配置的一个过程,不仅与网络建立的初始阶段相联系,还联系到网络改造与用户业务需求的变化。主要涉及如下几个问题:确定基站的数目,一个网络需要多少个基站才能覆盖整个服务区域、满足现有的业务需求,甚至考虑到未来可能的业务需求;确定基站的位置,基站放在什么位置才能避免干扰,提供最佳服务质量(QoS),使整个网络具有最佳性能;节约成本,怎样以最小成本提供最大服务能力<sup>[12]</sup>。

本文以简单的处理方法提供网络模型,首先在配电网区域选择  $M$  个候选基站地址,此站址既可用于部署宏基站也可用于部署微基站。在  $M$  个候选站址上部署  $K$  层异构无线网络,可得基站站址候选矩阵  $A$ :

$$A = (a_{km})_{K \times M} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{K1} & a_{K2} & \cdots & a_{KM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $a_{km}$  表示基站选择部署的情况,“1”表示在位置  $m$  处部署  $k$  层基站,“0”表示在位置  $m$  处不部署  $k$  层基站。由于基站站址部署基站拥有唯一性,因此存在  $\sum_{k=1}^K a_{km} \leq 1$ 。

考虑到配电网中终端多数是固定终端,业务类型比较稳定,为实现区域内不同配电网业务的可靠、高效传输,定义业务接入基站的指示函数  $ID_{n,k,m}$  为:

$$ID_{n,k,m} = \begin{cases} 1, R_{n,k,m} \geq R_{\min,n} \\ 0, R_{n,k,m} < R_{\min,n} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $R_{\min,n}$  表示满足该配电业务  $n$  所需的最小速率。 $R_{n,k,m}$  表示业务  $n$  在接入位置  $m$  处的  $k$  层基站时所能达到的业务速率,计算式为:

$$R_{n,k,m} = BD_n \times \lg(1 + SINR_{n,k,m}) \quad (3)$$

其中,业务  $n$  所需带宽为  $BD_n$ ,信噪干扰比为  $SINR_{n,k,m}$ 。

业务  $n$  的信干噪比  $SINR_{n,k,m}$  计算式为:

$$SINR_{n,k,m} = \frac{P_{out,m} \times Loss_{n,m}}{I_{n,m} + \sigma^2} \quad (4)$$

$$Loss_{n,m} = (\sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2})^{-\alpha} \quad (5)$$

$$I_{n,m} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M P_{out,m'} \times Loss_{n,m} \quad (6)$$

其中,  $P_{out,m}$  为基站  $m$  的发射功率,  $Loss_{n,m}$  为基站  $m$  到业务  $n$  终端的路径损耗,  $(x_n, y_n)$  为业务  $n$  终端坐标,  $(x_m, y_m)$  为基站  $m$  坐标,  $\alpha$  是路径损耗系数,一般取大于 2 的数,  $\sigma^2$  为噪声功率,  $I_{n,m}$  为业务  $n$  终端受到其他基站的干扰。

如式(2)所示的指示函数包含了网络规划相关的带宽资源分配、地理环境、干扰管理等。本文将此问题简单处理为业务享用相同的带宽资源,对信号传输信道做衰落处理,主要以基站站址变化引发的业务处理速率的变化判断基站站址的业务处理速率的性能。因此由业务接入基站的指示函数和基站站址选择矩阵  $A$ , 可得业务接入矩阵  $B$  为:

$$B = \left( b_{nm} = \sum_{k=1}^K a_{km} \times ID_{n,k,m} \right)_{N \times M} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1M} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N1} & b_{N2} & \cdots & b_{NM} \end{bmatrix} \quad (7)$$

业务接入矩阵  $B$  将矩阵  $A$  中不符合业务需求的矩阵进行剔除,保留了信道较好的基站站址。

### 3 优化模型

随着智能配电网、分布式新能源和智能终端的接入,配电通信网的业务需求发生了很大变化。仅针对参考文献[2]中新能源汽车的使用每年以 2.4~2.5 倍的速度增长,就为配电网通信带来更加复杂的终端节点分布以及飞速增长的节点数目。因此智能配电网规划需要在成本低廉的情况下尽可能地提高网络接入的终端数目。由于网络能耗与宏基站、微基站的部署数目有着较强的关联性,本文对网络能耗不做考虑。

式(8)给出了网络负载量的计算式:

$$f_1(A) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N b_{nm} \times \exp(P_{th,m} - \eta_{n,k,m}) \quad (8)$$

$$\eta_{n,k,m} = \frac{\sum_{n=1}^N b_{nm}}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K ID_{n,k,m}} \quad (9)$$

其中,  $P_{th,m}$  为基站  $m$  部署时应达到的负载阻塞门限,用于限制基站接入终端数量,  $P_{th,m}$  在网络规划过程中起到调节作用,适用于变化快、扩展度大的智能配电通信网络,其在仿真过程中取 1。由于  $\eta_{n,k,m}$  表示基站  $m$  中的负载量占总需求负载的百分比,当实际负载接入比例大于门限  $P_{th,m}$  时,负载限制因素  $\exp(P_{th,m} - \eta_{n,k,m})$  能够起到降低基站负载量值的作用。

相对网络负载量而言,网络建设成本表达式较为简单,主要与异构网络规划中涉及的网络层次数  $k$ 、基站  $m$  的部署情况  $a_{km}$  以及第  $k$  层基站的建设成本  $c_k$  有关,故网络建设成本为:

$$f_2(A) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M c_k \times a_{km} \quad (10)$$

因此,网络规划的多目标优化模型如式(11)所示,并给出最大化负载的单目标优化模型(如



式 (12) 所示) 以及成本最小化的单目标优化模型 (如式 (13) 所示) 以分析网络规划后的综合网络性能:

$$\begin{aligned} \max f_1(\mathbf{A}) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N b_{nm} \times \exp(P_{th,m} - \eta_{n,k,m}) \\ \min f_2(\mathbf{A}) &= \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M c_k \times a_{km} \\ \text{s.t. (1)} f_1(\mathbf{A}) &\geq T_{\text{load}} \\ (2) f_2(\mathbf{A}) &\leq T_{\text{cost}} \\ (3) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (b_{nm} \times R_{n,k,m}) &\leq R_{\text{max},k} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \max f_1(\mathbf{A}) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N b_{nm} \times \exp(P_{th,m} - \eta_{n,k,m}) \\ \text{s.t. (1)} f_1(\mathbf{A}) &\geq T_{\text{load}} \\ (2) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (b_{nm} \times R_{n,k,m}) &\leq R_{\text{max},k} \\ \min f_2(\mathbf{A}) &= \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M c_k \times a_{km} \\ \text{s.t. (1)} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M c_k \times a_{km} &\leq T_{\text{cost}} \\ (2) \sum_{n=1}^N b_{nm} \times R_{n,k,m} &\leq R_{\text{max},k,m} \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $T_{\text{load}}$  为负载量的最低门限,  $T_{\text{cost}}$  为网络建设的总规划最高成本门限。

对于上文的优化模型, 采用多目标遗传算法对其进行求解, 得到最优非支配 Pareto (帕拉托) 解集  $P = \{A_1^*, A_2^*, A_3^*, \dots, A_J^*\}$ , 通过优选模型对解集中的解进行排序, 选择效用值最小的解作为网络规划的最优解。优选模型如下<sup>[13]</sup>:

$$A^* = \arg \min \left\{ -\frac{O_1(A_j^*)}{O_1} + \frac{O_2(A_j^*)}{O_2} \right\}, j=1, 2, \dots, J \quad (14)$$

其中,  $J$  是 Pareto 最优解集的个数,  $O_2$  是

Pareto 最优解集中的最小网络建设成本值, 即  $O_2 = \min O_2(A_j^*)$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ ,  $O_1$  是 Pareto 最优解集中的最大网络负载值, 即  $O_1 = \max O_1(A_j^*)$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ 。上述式 (14) 所描述的优选模型能够提供一种低复杂度的算法来解决多目标优化的问题, 在智能配电网业务需求日渐严格的今天, 此方法具有一定的扩展性, 适用于性能目标不断增加的配电通信网络优化模型。

#### 4 仿真结果及分析

以某一中型城市高新开发区的配用电覆盖范围为例, 构建网络仿真环境, 得到如图 1 所示的终端分布图以及可选择的 22 个基站站址。此场景为 10 km×10 km 区域, 并分散地分布着 900 个配电终端。仿真过程中设置负载量的最低门限  $T_{\text{load}}=2\ 000$ , 最高成本门限  $T_{\text{cost}}=1\ 000$  万元。

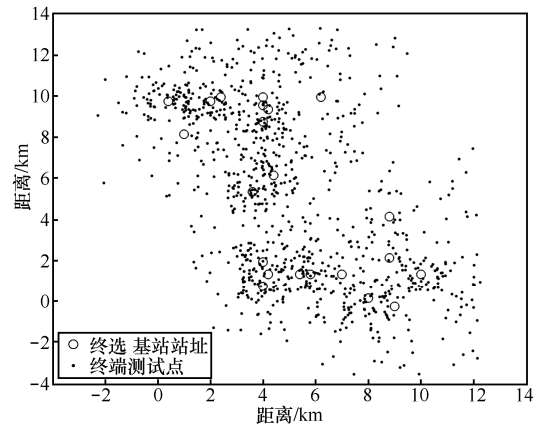


图 1 终端分布

本文在表 1 中给出了宏基站与微基站的站址选择情况。负载最大化单目标模型部署了 9 个宏基站, 而多目标优化模型部署了 5 个宏基站, 其中成本最小化模型部署了 4 个宏基站。在微基站

表 1 网络规划结果

| 基站类型  | 站址选择最终结果                |                       |                          |
|-------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|
|       | 多目标优化模型                 | 最大化负载单目标              | 最小化成本单目标                 |
| 宏基站站址 | 3、5、9、19、20             | 3、5、9、13、16、18、19、20  | 3、5、18、19                |
| 微基站站址 | 1、2、8、11、12、15、17、21、22 | 1、2、11、12、15、17、21、22 | 1、2、10、11、12、15、17、21、22 |

部署数目上,多目标优化模型与成本最小化单目标模型都部署了 9 个微基站,负载最大化单目标模型部署了 8 个微基站。同时给出了多目标优化、负载最大化单目标优化、成本最小化单目标优化的规划结果,分别如图 2、图 3、图 4 所示。

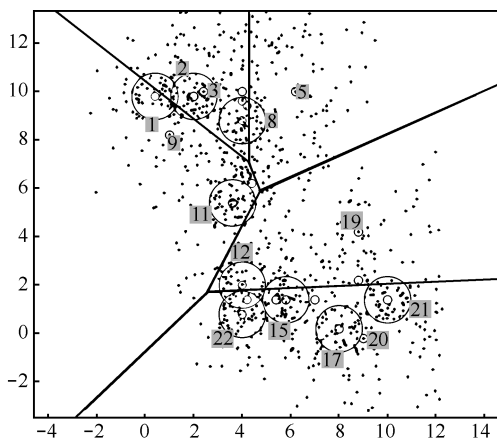


图 2 多目标优化模型

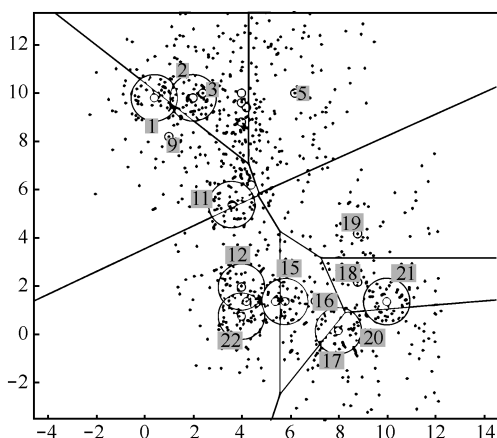


图 3 负载最大化单目标模型

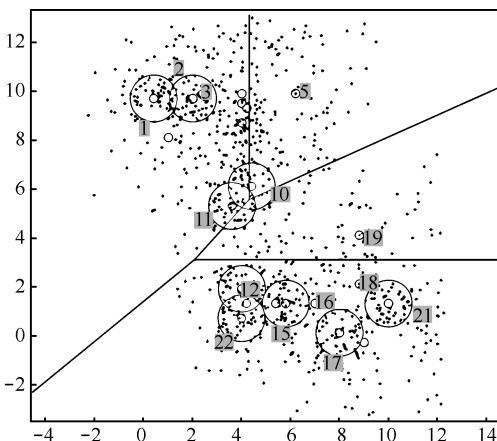


图 4 成本最小化单目标模型

通过分析图 2~图 4 的基站站址选择情况可知,在微基站站址选择上,单目标与多目标优化模型中站址 1、2、11、12、15、17、21、22 因为处于终端密集区域,始终被选择出来以分担宏基站负载,提高网络性能。而在多目标模型与成本最小化模型中又分别选择了站址 8 和站址 10,这是由于仿真过程中本文选择了终端就近接入的准则。其中,站址 8 处于宏基站 3 与宏基站 5 相邻的小区边缘地带,且站址 8 附近终端密度较大,为提高网络的负载量同时控制网络建设成本,因而被选择部署微基站。图 4 展示了站址 10 处于宏基站 5 的覆盖范围下,并位于宏基站 3、5、19 的多基站边缘地带,且站址 10 与所选择的 3 个宏基站之间距离较远,相对其他两个模型,在最小化成本单目标模型选择的宏基站数目较少,因此,处于站址 10 附近的终端接入宏基站的概率比较低,选择处于宏基站覆盖的边缘以及相对热点区域的站址 10 部署微基站,能够有效地分载宏基站的流量,接入网络内更多的终端,并降低网络建设成本。在宏基站站址的选择上,一方面满足了网络全覆盖的要求,另一方面由于网络性能优化目标不一致而造成了单目标优化负载时,部署了较多数目的宏基站,而单目标优化成本时,则部署了较少的宏基站,这是因为宏基站相对微基站的承载能力比较强,而建设成本相对微基站高很多。图 2~图 4 的规划结果直观展示了本文将宏基站与微基站不做分离处理的方法能更加灵活地发挥宏基站与微基站的效用。

网络规划后的性能如图 5 和图 6 所示。图 5 中多目标优化模型在网络终端数目低于 500 时始终与最大化负载单目标模型保持一致,在终端数目逐渐增加的过程中,多目标优化模型相较于其他两种算法负载的终端数目有所减少。这是因为在终端增加总数目不超过 500 时,网络平均负载较低,故多目标始终与最大化负载单目标模型保持一致,在终端总数目超过 500 后,多目标模型受到成本的限制,宏基站部署数目较少,故多目标模型终端负载



数目较最大化负载单目标模型低。但是在终端超过700后,可以看到多目标与最大化负载单目标模型负载增长幅度仍旧处于上升的趋势,说明其网络扩展性比较强,可以容纳更多的终端接入,最小化成本单目标模型增长幅度则处于下降的趋势,主要是因为较少的宏基站部署影响了网络负载性能。图6为3种不同方法网络建设成本的对比,将此图与表1进行比较不难发现,宏基站的部署情况主要影响网络的建设成本,部署较多宏基站的承载最大化单目标模型的建设成本最高,部署较多微基站的成本最小化单目标模型的建设成本最低。多目标模型与单目标模型相比,在两个优化目标上取折中,实现了在网络成本比较低时,能够获得较好的网络负载性能,接入更多的终端节点,故其建设成本处于中间位置。

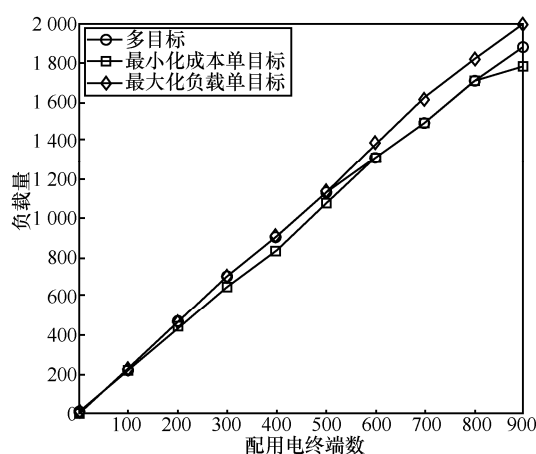


图5 网络负载量

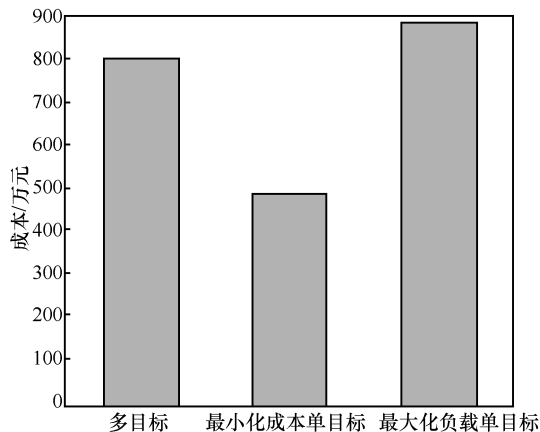


图6 3种不同方法网络建设成本的对比

## 5 结束语

针对智能配电网的发展趋势以及配电网通信网络优化现存的弊端,本文提出的网络规划策略将业务需求与基站选址结合,建立了低复杂度的优化模型,能够在成本较低的情况下保证网络接入更多的业务终端,并能够在网络性能要求更加严格的发展过程中提高网络的扩展性。随着分布式电源和电动汽车等规模化发展,电网的转变将给传统配电网带来诸如电压越限、双向潮流等问题,配电网由被动控制过渡到主动控制是未来的发展模式和方向之一,这将成为智能配电网发展的核心<sup>[14]</sup>。在下一步的工作中,应当适应传统配电网向主动配电网转换的思路,建立适应于主动配电网发展的网络规划策略。将5G、SDN、边缘计算等新兴的技术与主动配电网相融合,建立主动配电通信网络系统<sup>[15-17]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 沈大刚. 一种新型智能配电终端的设计与研究[J]. 电气工程学报, 2016, 11(6): 48-54.  
SHEN D G. Design and research of a new type of intelligent power distribution terminal[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 11 (6): 48-54.
- [2] 马钊, 安婷, 尚宇炜. 国内外配电前沿技术动态及发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1552-1567.  
MA Z, AN T, SHANG Y W. State of the art and development trends of power distribution technologies[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(6): 1552-1567.
- [3] 陆一鸣, 刘东, 柳劲松, 等. 智能配电网信息集成需求及模型分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 1-4.  
LU Y M, LIU D, LIU J S, et al. Information integration demand and model analysis for smart distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 1-4.
- [4] 盛洁, 唐良瑞, 郝建红. 智能配电环境感知融合网络的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 127-131.  
SHENG J, TANG L R, HAO J H. Research of ambient composite networks towards the smart distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 127-131.
- [5] JO H S, SANG Y J, XIA P, et al. Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: a comprehensive downlink SINR analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communica-

- tions, 2011, 11(10): 3484-3495.
- [6] 朱思峰, 刘芳, 柴争义. 基于免疫计算的 TD-SCDMA 网络基站选址优化[J]. 通信学报, 2011, 32(1): 106-110.  
ZHU S F, LIU F, CHAI Z Y. Immune computing-based base station location planning in the TD-SCDMA network[J]. Journal on Communications, 2011, 32(1): 106-110.
- [7] 张英杰, 毛赐平, 俎云霄, 等. 基于免疫算法的 TD-SCDMA 网络基站选址优化[J]. 通信学报, 2014, 35(5): 44-48.  
ZHANG Y J, MAO C P, ZU Y X, et al. Immune algorithm-based base station location optimization in the TD-SCDMA network[J]. Journal on Communications, 2014, 35(5): 44-48.
- [8] LI X, ZHANG X, WANG W. An energy-efficient cell planning strategy for heterogeneous network based on realistic traffic data[C]// 2014 International Conference on Computing, Management and Telecommunications, April 27-29, 2014, Da Nang, Vietnam. New Jersey: IEEE Press, 2014: 122-127.
- [9] WANG S, ZHAO W, WANG C. Budgeted cell planning for cellular networks with small cells[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4797-4806.
- [10] SAPPIDI R, MOSHARRAFDEHKORDI S, ROSENBERG C, et al. Planning for small cells in a cellular network: why it is worth it[C]// Wireless Communications and Networking Conference, April 6-9, 2014, Istanbul, Turkey. New Jersey: IEEE Press, 2014: 2277-2282.
- [11] ZHAO W, WANG S, WANG C, et al. Cell planning for heterogeneous networks: An approximation algorithm[C]// IEEE Conference on Computer Communications, April 17-May 2, 2014, Toronto, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1087-1095.
- [12] MAPLE C, GUO L, ZHANG J. Parallel genetic algorithms for third generation mobile network planning[C]// International Conference on Parallel Computing in Electrical Engineering, September 7-10, 2004, Dresden, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2004: 229-236.
- [13] 张连文, 夏人伟. Pareto 最优解及其优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 1997(2): 206-211.  
ZHANG L W, XIA R W. Pareto optimal solution and optimization method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1997(2): 206-211.
- [14] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.  
ZHAO B, WANG C S, ZHOU J H, et al. Present and future trend of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135.
- [15] 周逸凡, 赵志峰, 张宏纲. 基于智能 SDN 面向 5G 的异构蜂窝网络架构[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 28-35.  
SHOU Y F, ZHAO Z F, ZHANG H G. Towards 5G: heterogeneous cellular network architecture design based on intelligent SDN paradigm[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 28-35.
- [16] 张建敏, 谢伟良, 杨峰义. 5G 超密集组网网络架构及实现[J].

电信科学, 2016, 32(6): 36-43.

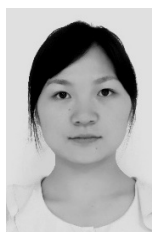
ZHANG J M, XIE W L, YANG F Y. Architecture and solutions of 5G ultra dense network[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 36-43.

- [17] 刘宜明, 李曦, 纪红. 面向 5G 超密集场景下的网络自组织关键技术[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 44-51.  
LIU Y M, LI X, JI H. Key technology of network self-organization in 5G ultra-dense scenario[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 44-51.

#### [作者简介]



王一蓉 (1979-), 女, 北京国电通网络技术有限公司教授级高级工程师, 主要从事电力信息通信、无线通信等方面研究工作。



王艳茹 (1985-), 女, 北京国电通网络技术有限公司工程师, 主要从事电力信息通信、无线通信等方面研究工作。



贺艳华 (1992-), 女, 华北电力大学电气与电子工程学院博士生, 主要从事异构无线网络资源管理、配电网通信等方面的研究工作。



王永惠 (1991-), 女, 北京国电通网络技术有限公司工程师, 主要从事电力信息通信技术方面的研究工作。



唐良瑞 (1966-), 男, 华北电力大学电气与电子工程学院教授、博士生导师, 主要从事无线通信、信息安全、电力系统通信等方面的研究工作。