

DOI: 10.7667/PSPC161747

## 区域能源供给网络热电协同规划模型与算法

白学祥<sup>1,2</sup>, 曾鸣<sup>1,2</sup>, 李源非<sup>1,2</sup>, 隆竹寒<sup>1,2</sup>

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206)

**摘要:** 能源互联网是实现我国能源革命目标的关键手段之一, 然而其多能互补的特点增加了能源供应的复杂性, 从而影响到区域范围内系统能源供应的协调有序。针对区域内能源供给网络的系统规划问题开展了研究, 建立了以考虑投资、运行、经济、环境综合成本为目标函数, 考虑电网、热网多元约束和电、热能源互补的区域能源供给网络规划模型, 运用正态分布量子粒子群算法对模型进行求解。以华北某市郊区的区域能源规划为案例进行能源供给网络的规划, 并与传统规划模式进行对比分析。结论表明, 所提出的模型能够对至少含有煤电、气电和热能的区域综合能源供给网络进行规划, 且规划方案的成本要低于传统规划方案。此外, 所应用的正态分布量子粒子群算法在解决此类规划问题时具有较强的性能, 具有较广阔的应用空间。

**关键词:** 能源互联网; 能源供给网络; 多目标规划; 正态分布量子粒子群算法

### The model and algorithm of thermoelectric collaborative planning of regional energy supply network

BAI Xuexiang<sup>1,2</sup>, ZENG Ming<sup>1,2</sup>, LI Yuanfei<sup>1,2</sup>, LONG Zhuhan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Energy Internet is one of the key means to realize the energy revolution. However, its characteristics of multiple kinds of energy complementing will increase the complexity of energy supply and thus affect the coordination and order of the system energy supply in the region. This paper carries out the research on the system planning of energy supply network in a certain region. Considering the comprehensive cost of investment, operation, economy and environment as the objective function, it establishes the planning model of regional power supply network considering multiple constraints of power grid and heat supply network and the energy complementarity of electric and heat. The model is then solved by Gaussian quantum-behaved PSO algorithm. The regional energy planning of some outskirts of a city in North China is taken as a case of energy supply network planning and compared with traditional planning model. The conclusion shows that the method proposed is able to make planning for regional energy supply network, which contains coal-fired power, pneumoelectric and thermal power at least. Besides, the G-QPSO algorithm used in this paper has a good performance in solving this kind of planning problem; therefore, it has a promising perspective of application.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China: Research on the Implementation Scheme and Support System of Electric Power Service Platform under the Situation of New Electricity Reform.

**Key words:** Energy Internet; energy supply network; multi-objective planning; Gaussian quantum-behaved PSO algorithm

## 0 引言

能源互联网是实现我国能源革命目标的关键手段之一。然而, 能源互联网具有的多能互补、能源

供应方式复杂的特点, 会使得系统规划、运行面临的问题更加复杂, 用传统规划方法进行能源互联网系统规划具有较大难度, 同时也难以保证规划方案的经济高效。因此, 在一定区域内对能源供给网络提出更优的系统规划工具和优化方法, 是当前亟待研究的问题。

目前, 国内外针对含多类型能源系统的运行控

基金项目: 国家电网公司总部科技项目:《新电改形势下公司构建电能服务平台的实施方案与支持体系研究》

制方面已经取得了一定成果,如各种调度算法和模型等。文献[1]提出了一种面向多能互补微电网的能量管理模型和控制策略,能够实现综合成本最小;文献[2]考虑了多类型分布式可再生能源和储能,提出了一种多代理系统的主动配电网多源协同调度策略;文献[3]提出了一种考虑风、光、水、气多能源联合发电的系统调控方法;文献[4]提出了一种面向含多类型分布式电源的微电网的电压控制策略;文献[5-7]提出了包含多种电源和负荷类型的能源管理和调度方案。但上述成果大多面向的是既有系统的调度问题,所涉及能源虽然包括风、光等多种类型,但其本质仍然是电力系统的调度问题。目前针对区域能源供给网络规划的相关研究仍处于起步阶段,文献[8-9]对多能源系统、区域综合能源系统的规划和分析技术进行初步研究,提出了相对完善的理论框架。具体的系统规划方面,文献[10]提出了一种考虑环境效益的分布式微网规划方法;文献[11]提出了一种针对含有分布式能源微网的动态规划方案。而目前热电协同规划的相关研究主要针对的是单台机组的选址定容,尚未发展到系统级层面<sup>[12-14]</sup>。文献[15]与本文的研究思路相似,但该文的主要研究是电-气系统的协同规划。综上所述,从目前国内外研究内容来看,对于区域能源供给网络中多类型能源协同规划方面的研究成果还相对有限,而系统级的热电协同规划研究则未见报道。

针对上述问题,本文研究区域能源供给网络的基本架构特性,以热电协同为切入点,提出以总成本函数为目标函数,系统热电负荷、系统安全性为主要约束的能源供给网络规划模型;利用正态分布量子粒子群算法对模型进行求解,得到对区域能源供给网络的系统规划方案;以华北某市郊区的区域为案例进行能源供给网络的规划分析。结论表明,本文所提出的规划模型具有在保障可行性的基础上,具有比传统规划方案更优的经济性能。此外,所采用的算法具有较强的优化和收敛性能。

## 1 区域能源供给网络

在一定的区域内,用户所需要的能源供给由区域内各类能源生产商来满足,能源生产商之间也存在着能源供需关系。用户和能源生产商作为能量流的结点,通过包括电网、热网等多种能量输送通道交错连接,形成了一个多层次的复合网状结构,即能源供给网络。

目前,用户可能需要包括供电、供热在内的多种形式的能源供应。但是随着我国电能替代工作的深入,能源供给网络将转为以电能作为核心,将大

多数一次能源转化为电能输送给用户,一次能源的直接输送更可能发生在能源生产商之间。就具体的能源服务而言,未来可能出现类型丰富的综合能源服务和更为复杂的能量网络耦合<sup>[16]</sup>。但目前相关研究仅处在理论摸索阶段,距离规划应用还有一定距离。考虑到现实意义,目前本模型以我国目前的情况为基础,重点考虑电能和热能的生产 and 供应,其网络耦合主要通过热电联产和电转热设施来实现。

## 2 区域能源供给网络规划模型

### 2.1 基本问题描述

该模型要解决的问题与主要条件可定性描述为下述3条要素:第一,在给定的地区内,存在给定的系列用户及其相应需求;第二,模型的优化计算受电网和供热规格边界条件限制;第三,基于以上两个方面,提出满足用户需求、技术约束且综合成本最低的规划方案。能源供给网络的一大特征是考虑多能流之间的耦合互补关系,在本文中主要考虑电负荷对热负荷的替代作用,即在模型设计中考虑电加热这一能量转化形式,以提升系统综合能效。而目前国内外相关的文献大多只考虑因机组特性造成的热电联产机组的出力耦合,未计及热电协同。

### 2.2 考虑多能互补的能源供给网络规划模型

在能源供给网络建设的优化决策中,本文模型构建的思路是在满足需求和能量网络安全性要求的约束下实现建设和运营的总成本的最小化。

建设成本主要包括3个方面,即供能机组建造成本、供能系统扩容成本和供能网络搭建成本。其中,供能机组建造成本包括火电、燃气、热电联产等多种机组的成本,如式(1)所示。

$$C_1 = \sum_{i=1}^n \alpha_i U_i + \sum_{j=1}^m \beta_j N_j \quad (1)$$

式中: $n$ 表示需要建造的发电机组的种类数; $\alpha_i$ 表示第 $i$ 种发电机组的单位容量建造成本; $U_i$ 表示第 $i$ 种发电机组的容量; $m$ 表示需要建造的发电机组的种类数; $\beta_j$ 表示第 $j$ 种供热机组的单位容量建造成本; $N_j$ 表示第 $j$ 种供热机组的容量。

供能系统扩容成本主要指变电站的建造或扩容成本、用户的负荷变化对输电线路扩容成本影响并不明显。变电站的建造成本用式(2)表示。

$$C_2 = \chi S \quad (2)$$

式中: $\chi$ 表示变电站的单位容量建造成本; $S$ 表示变电站容量。

能源输送成本主要包括铺设电网、热网的成本,如式(3)所示。

$$C_3 = \sum_{i=1}^n \gamma_i D_i \quad (3)$$

式中:  $n$  表示需要搭建的供能线路的种类数;  $\gamma_i$  表示第  $i$  种供能线路的单位建造成本;  $D_i$  表示第  $i$  种供能线路的长度。

综上, 建设成本可用式(4)表示。

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (4)$$

运营成本主要包括发电/供热成本和环境成本两方面。其中发电/供热成本如式(5)所示。

$$O_1 = \sum_t \sum_{i=1}^n p P_{i,t} \eta_{i,t} + \sum_t \sum_{j=1}^m q Q_{j,t} \gamma_{j,t} \quad (5)$$

式中:  $n$  和  $m$  分别为供电机组和供热机组的数量;  $p$  和  $q$  分别为单位供电成本和供热成本;  $P_{i,t}$  和  $Q_{j,t}$  分别为第  $i$  台供电机组和第  $j$  台供热机组在  $t$  时的出力;  $\eta_i$  和  $\gamma_j$  为(0,1)变量, 分别表征供电机组在第  $x$  个时段和供热机组在第  $y$  个时段的启停状态。其中, 由于热电联产等机组存在单独产热、单独产电和同时产热产电等工况, 故将热电联产机组试作供热机组和供电机组的叠加, 将其(0,1)变量分开给出。目前单位发电成本、供热成本在不同工况下发生的变化暂时不考虑。

系统环境成本是另一个运营目标函数, 以排污费或环境治理费的形式将环境成本反映在运营成本中, 二氧化碳的环境成本则参考国外的碳税进行折算。目前主要考虑的排放物包括二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物和烟尘。综上分析, 环境成本如式(6)所示。

$$O_2 = \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} \varphi_g E_{s,g} \mu_s \quad (6)$$

式中:  $s \in S = \{\text{方案中的全部排放源}\}$ ;  $g \in G = \{\text{二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、烟尘}\}$ ;  $\varphi_g$  表示第  $g$  种排放物的单位排污费、环境治理费或税率;  $E_{s,g}$  表示第  $s$  个排放源第  $g$  种排放物的排放量;  $\mu_s$  是(0,1)变量, 表征机组的启停状态。

综上, 运营成本可以用式(7)表示。

$$O = O_1 + O_2 \quad (7)$$

从而, 总成本最小的目标函数如式(8)所示。

$$\min \left\{ C + \sum_{t=1}^T \left[ O \times \frac{1}{(1+k)^t} \right] - 5\% \times C \times \frac{1}{(1+k)^T} \right\} \quad (8)$$

式中: 第一项为固定资产投资成本, 直接取现值; 第二项为系统运行成本, 需要用现值公式将规划期  $T$  年每一年的运行费用贴现后逐年累加,  $k$  为贴现率; 第三项为规划期末的固定资产残值, 需要折算为现值之后回收, 因此需要在成本中扣除, 取固定资产残值率为 5%。

约束条件主要包括以下 6 个方面。

1) 节点电压约束: 各节点电压必须在要求的范围内。约束关系用式(9)表示。

$$V_{\min} \leq V_{k,t} \leq V_{\max} \quad (9)$$

式中:  $V_{\min}$  和  $V_{\max}$  分别为节点电压的下限和上限;  $V_{k,t}$  表示节点  $k$  的实时电压。

2) 支路容量约束: 各条线路上的电流不应高于支路容量上限。目前暂时仅考虑电网的支路容量约束, 忽略热网的支路容量约束。约束关系用式(10)表示。

$$I_l \leq I_{l\max} \quad l=1, 2, \dots, L \quad (10)$$

式中:  $I_l$  为线路  $l$  上的实时电流;  $I_{l\max}$  为线路  $l$  的功率上限;  $L$  为支路总数。

在实际仿真计算中, 各节点和支路的电压和电流可通过将网络拓扑和电源、负荷配置情况输入 Matlab 软件中的 Matpower 平台, 经由潮流仿真得到。

3) 考虑多能互补的节点热负荷约束: 本文对热网中的能量流动进行简化处理。假设热量离开热源后依次沿热网向下游传播, 流经一个负荷点后, 扣除该点的热负荷, 继续向下游传播。若传播中遇到热网分支, 则每一支路都分到一半的热量; 若遇到交汇, 则直接将热量进行相加。热负荷约束要求热流流经任意节点时剩余的热量不低于额定负荷的 10%。

电加热的特性允许用多余的电力负荷经过一定的能量转化后代替热网用于满足热负荷需求。本文要求所有热负荷节点低于负荷要求的总量不大于实时供电机组出力大于电负荷的部分经转化后的值, 用式(11)表示。

$$\sum_{\forall k,t} \Delta R_{k,t} \leq \sum_{i=1}^n P_{i,t} - \sum_{\forall k,t} U_{n,t} I_{l,t} \quad (11)$$

式中:  $\Delta R_{k,t}$  为节点  $k$  在  $t$  时刻由热网获得的能量低于负荷要求的值; 其余变量定义与前文相同。

4) 热电耦合约束: 本文中的热电耦合约束有两方面。一是热电联产机组的热、电出力状态点受机组的边界限制; 二是受到国家对热电联产机组的相关要求, 每一台机组的年均热电比必须大于基准值, 用式(12)表示。

$$\frac{\sum_{j=1}^m Q_j}{\sum_{i=1}^n P_i} \geq \tau \quad (12)$$

式中,  $\tau$  为热电联产机组的年均热电比, 通常取 50%。

5) 输出功率范围约束: 供能机组必须满足最小

负荷率要求,也不能超过机组容量上限。约束关系用式(13)表示。

$$\begin{cases} wU_i \leq P_{i,t} \leq U_i \\ rN_j \leq Q_{j,t} \leq N_j \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{i,t}$  为供电机组  $i$  在  $t$  时刻的输出;  $U_i$  为  $i$  的机组供电容量;  $w$  为机组的最小供电负荷率;  $Q_{j,t}$  为供热机组  $j$  在  $t$  时刻的输出;  $N_j$  为  $j$  的供热容量;  $r$  为机组的最小供热负荷率。

6) 变电容量约束: 变电站的变电容量应大于实时机组出力之和,且为符合可靠性要求,应留有 10% 以上的备用容量。约束关系用式(14)表示。

$$S \geq 110\% \times \sum_{i=1}^n P_i \eta_i \quad (14)$$

7) 机组爬坡约束: 燃煤、燃气机组的输出功率在单位时间内的向上、向下变化速率存在限制,这将影响系统对负荷变化的响应能力。约束关系用式(15)表示。

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{i,asc} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq P_{i,dsc} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $P_{i,asc}$  和  $P_{i,dsc}$  分别为机组  $i$  在固定时段内出力的最大升、降值。

8) (0,1)变量约束

$$\eta_i, \gamma_j \in \{0, 1\} \quad (16)$$

### 3 模型求解

#### 3.1 粒子群优化算法及其量子改进

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是从随机解出发,通过迭代寻找最优解的一类启发式遗传算法,具有算法实现简单,收敛速度快的优势,在解决工程规划问题中获得广泛应用。传统粒子群优化算法的流程本文不再赘述。

PSO 算法在实际应用中也存在许多待改进的问题,如全局寻优性能较差,早熟现象明显等。国内外相关研究从不同角度对 PSO 算法进行了改进。其中,量子粒子群优化算法(Quantum-behaved Particle Swarm Optimization, QPSO)属于有代表性的一类。在量子空间中,粒子的移动不再遵循宏观空间的速度-位移方式, QPSO 算法利用量子力学的方法,把粒子的运动状态用概率波函数来表示,并通过求解薛定谔方程得到粒子在空间内某一点出现的概率密度函数,进而通过蒙特卡洛方法得到粒子的位置,改进后的粒子位置更新公式见文献[17]。

理论和实践研究表明, QPSO 算法具有比 PSO 算法更优的收敛速度和精度。但在求解目标函数和

约束条件较复杂的规划问题时,其性能仍有提升空间。

#### 3.2 正态分布量子粒子群算法

为进一步提升算法性能,本文运用正态分布量子粒子群算法(Gaussian Quantum-behaved PSO, G-QPSO),对 QPSO 算法进行进一步优化<sup>[18]</sup>: 在生成算法中的随机数  $\mu$  和  $\varphi$  时,运用标准正态分布  $N(0, 1)$  代替原算法中使用的均匀分布  $U[0, 1]$ , 并将其生成数的绝对值作为  $\mu$  和  $\varphi$  的取值。

这一改进能够让粒子在当前位置有较大概率获得较小的振幅,从而对优化结果进行微调;同时又有较小概率获得较大的振幅,从而能够摆脱局部最优,避免算法早熟。综上,正态分布量子粒子群算法的流程如图 1 所示。

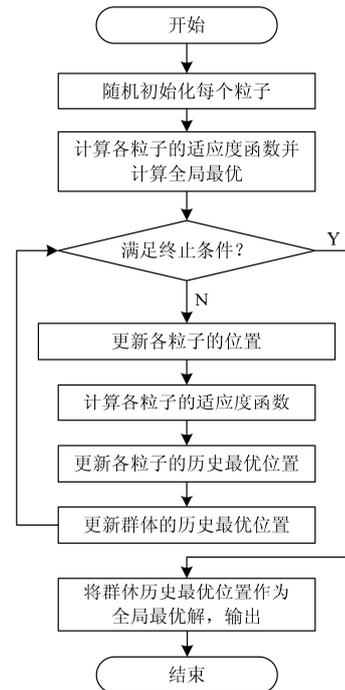


图 1 正态分布量子粒子群算法流程图

Fig. 1 Flow chart of Gaussian quantum-behaved PSO algorithm

### 4 案例分析

#### 4.1 算例基本参数

将一年分为 8760 个小时,根据该地区的热电负荷平均情况,得到该地的逐时热、电负荷标幺曲线如图 2 所示。

该地区的初始电网结构如图 3 所示。

图中实线部分为已有电网,虚线部分为电网规划中允许搭设的线路;该区域尚未埋布热网,本案例中假设图中的实线和虚线部分都允许埋布热网。图中的字母表示新增供能设施的站址,其中 A 点处已经建有带一台 20 MVA 主变的 110 kV 变电站,并

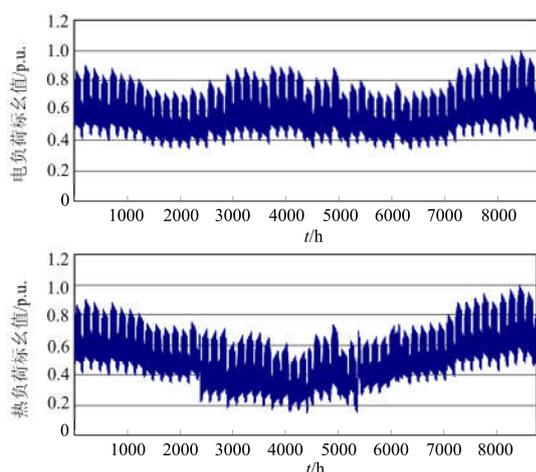


图 2 华北某郊区的年热电负荷逐时标幺曲线

Fig. 2 Hour-traced power and heat load curve of a suburb in North China (per unit value)

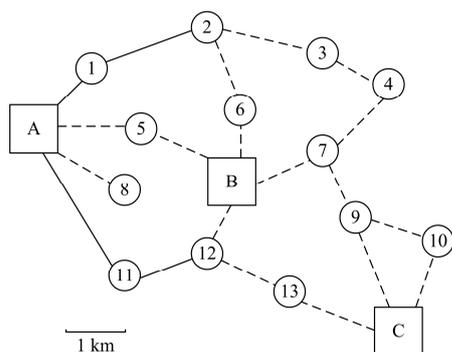


图 3 规划区初始电网结构图

Fig. 3 Structure of initial grid in planning area

且已经和城区电网相连; B 点和 C 点尚无任何设施。要求若 B 点和 C 点新建供能设施, 则变电站也建在同一位置。图中的数字为负荷点, 受资料限制, 算例假设每一负荷点的逐时电、热负荷曲线形状都与图 2 保持一致, 通过设置不同的负荷峰值得到各负荷点的逐时负荷。此外, 本算例要求规划结果必须能适应规划区快速发展带来的负荷增长, 即能源供给网络必须满足 10 年规划期内的热电负荷增长。各负荷点热、电负荷峰值和增长率见表 1。

算例相关的成本数据如表 2 所示。

从主网购电的电价取该地区的季节电价。见表 3。

各类机组的污染物排放水平参照文献[19], 热电联产机组的热电特性限制和最低供电、供热负荷率参照文献[20], 算例所需的其他数据见表 4。

此外, 算例还做如下假设:

1) 暂不考虑电网和热网的损耗;

2) 对于从主网购电的情况, 只考虑购电的直接成本, 不考虑环境成本;

表 1 A, B, C 三地的地理位置和网络配置情况

Table 1 Location and network configuration of place A, B, C

负荷点	热峰值 负荷/MW	电峰值 负荷/MW	热、电负荷 年均增长率(%)
1	1.2	1.1	3
2	1.1	1.2	4
3	1.3	1.1	2.5
4	1.3	1.1	3
5	1.2	1.2	4
6	1.7	1.8	3.3
7	2.1	1.6	2.7
8	1.9	1.3	2.5
9	2.2	2.0	3.8
10	1.7	1.3	4.1
11	0.9	2.7	4.7
12	1.3	1.5	5.2
13	1.9	1.7	1.9

算例相关的成本数据如表 2 所示。

表 2 能源服务供给网络建设运营成本表

Table 2 Construction &amp; operation cost of energy service supply network

项目	成本	项目	成本
燃煤热电机组	430 万元/MW	CO <sub>2</sub> 环境成本	0.01 元/kg
燃气热电机组	510 万元/MW	SO <sub>2</sub> 环境成本	0.42 元/kg
变电容量扩建	23 万元/MVA	NO <sub>x</sub> 环境成本	0.63 元/kg
电网铺设成本	251.7 万元/km	粉尘环境成本	0.15 元/kg
热网铺设成本	21 万元/km	燃煤发电成本	0.22 元/kWh
供热成本	50.8 元/GJ	燃气发电成本	0.75 元/kWh

表 3 主郊区向城区主网买电的季节电价表

Table 3 Seasonal price that the main suburbs buying electricity from the main grid

月份	电价/(元/kWh)	月份	电价/(元/kWh)
1 月	0.7	7 月	0.88
2 月	0.7	8 月	0.88
3 月	0.55	9 月	0.75
4 月	0.55	10 月	0.55
5 月	0.55	11 月	0.55
6 月	0.75	12 月	0.7

表 4 算例所需的其他数据

Table 4 Other data used in case study

参数	数值	参数	数值
燃气机组爬坡率	20%/min	燃煤机组爬坡率	10%/min
电加热效率	90%	支路容量	250 A
节点电压上限	311.1 V	节点电压下限	155.6 V

3) 规划只在涉及站址处的 110 kV 配变, 暂不考虑负荷点处 10 kV 低压配变的规划;

4) 假设各类供能设备的容量可以任意选择整数, 出现小数点时直接进位处理。

### 4.2 计算结果及分析

算例具体设计 3 种待比选的方案, 如下所示。

方案一: 纯主网供电。按照辐射式供电原则<sup>[21]</sup>, 按 A-1-2-3-4; A-1-2-6; A-5-7-9-10; A-8; A-11-12-13 进行电网规划。电力需求完全由主网满足, 热力需求由负荷点采用电加热设备满足。将该方案作为基准方案。

方案二: 纯燃煤热电联产。电网规划同方案一, 热网规划与电网线路一致; 在 A 点燃煤热电站以满足规划区的热电负荷, 燃煤电站的运行方式是以热定电。这一方案是在过去常用的一种粗放式的规划思路下的一种有代表性的规划方案<sup>[22]</sup>。

方案三: 本文所建模型提出的规划方案。

将算例中的相关参数代入模型, 运用 Matlab 软件进行编程, 用 G-QPSO 算法进行求解, 设终止条件为迭代次数达到 100。重复运行程序十次, 取十次输出中的最优输出作为优化结果, 如下所示。

1) 能源服务网络规划如图 4 所示。

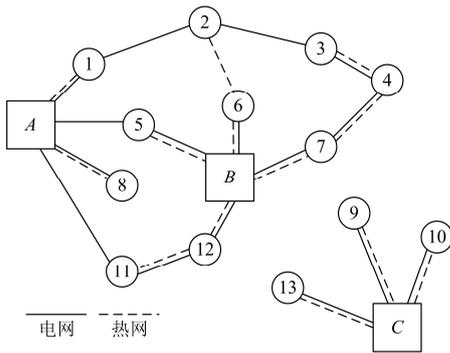


图 4 能源服务网络规划图

Fig. 4 Planning of energy supply service grid

2) 各站址的机组和变电容量规划如下。

A 点: 新建 8 MW 燃气热电机组; 变压器不扩容;

B 点: 新建 12 MW 燃煤热电机组; 新建 12 MW 容量的 110 kV 配变;

C 点: 新建 7 MW 燃气热电机组; 新建容量为 7 MW 的 110 kV 配变。

得到各方案的经济性对比见表 5。

表 5 不同系统规划方案的经济性比较

Table 5 Economic comparison of different system planning

方案	初始投资/亿元	规划期 平均年值/亿元	费用现值/亿元
方案一	0.4279	14.8136	13.7617
方案二	1.6246	12.4921	12.8721
方案三	2.0839	9.6013	10.7201

由表 5 可见, 在财务折现后, 本文提出的规划方法能使该区域满足用户热、电需求的成本出现较为明显的下降。相较于基准方案(方案一)下降了 22%; 相较于常用方案(方案二)下降了 16.71%。此外, 方案一和方案二的计算过程以估算为主, 并未考虑约束条件, 因此在实际应用中其成本还会更高。因此可认为, 本文所提出的模型和算法能够对区域能源供给网络进行有效规划, 且相比现有的规划, 能够在满足系统约束的同时显著降低规划成本。

### 4.3 算法性能对比分析

为了测试本文所提出的正态分布量子粒子群算法的性能, 本节运用量子粒子群算法和传统粒子群算法分别对算例进行规划。重复运行程序十次, 计算结果最优时的算法的收敛情况如图 5 所示。

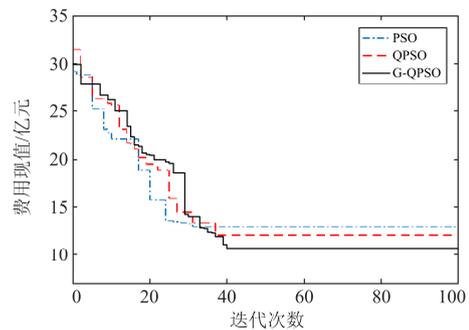


图 5 各算法迭代图

Fig. 5 Iteration figures of different algorithms

由图 5 可知, PSO 算法、QPSO 算法和 G-QPSO 算法的收敛次数分别为 31、37 和 40 次。直观来看, G-QPSO 的收敛速度差于另外两种算法, 但是其在迭代到 31 次时的优化结果(12.8435 亿元)要优于 PSO 算法的优化结果(12.9936 亿元), 此时 PSO 已经收敛, 而 G-QPSO 算法还在继续迭代优化。同理, G-QPSO 在第 37 次迭代时的结果也要优于 QPSO 算法, 并在之后继续优化。可见 G-QPSO 算法在迭代后期的高效寻优能够有效弥补其在收敛速度上的不足。从最终收敛结果来看, G-QPSO 算法的费用现值 10.7201 亿元较 QPSO 算法的 12.1225 亿元低 11.57%; 较 PSO 算法的 12.9936 亿元低 17.50%。因此可认为, 相较于 QPSO 算法和 PSO 算法而言, G-QPSO 算法以较少的收敛次数增加作为代价, 获得了显著更优的优化结果, 表现出了强大的优化能力。

## 5 结论

本文构建了考虑煤电、气电、热等 3 种能源供应的区域能源供给网络系统规划优化模型, 并提出了相应的求解算法。通过算例分析, 证明本文所提

出的模型能在满足区域热、电负荷的基础上, 通过考虑热电负荷的耦合和替代关系, 能够显著降低系统总成本, 所得规划方案与传统规划相比具有较高的综合效益。

需要指出, 本文目前的规划模型只考虑了燃煤、燃气两种热电联产机组以及热负荷和电负荷两类负荷的协调规划, 是一种相对简化的系统形态。未来有必要从负荷类型、能源供给类型和管路系统类型 3 个方面对本文的研究进行进一步拓展和深化, 支撑我国能源互联网战略的发展。

### 参考文献

- [1] 马喜平, 谢永涛, 董开松, 等. 多能互补微电网的能量管理研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 108-114.  
MA Xiping, XIE Yongtao, DONG Kaisong, et al. Research on energy management of complementary microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 108-114.
- [2] 蒲天骄, 李焱, 陈乃仕, 等. 基于 MAS 的主动配电网多源协调优化调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 67-75.  
PU Tianjiao, LI Ye, CHEN Naishi, et al. Multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network based on multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 65-75.
- [3] 陈天穹. 风光水气多能源发电联合优化调度方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.  
CHEN Tianqiong. A joint optimal dispatching method of wind-photovoltaic-hydro-gas generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [4] 张继红, 李华, 杨培宏, 等. 分布式多能互补微电网协调控制策略[J]. 可再生能源, 2015, 33(1): 11-15.  
ZHANG Jihong, LI Hua, YANG Peihong, et al. Study on coordination control strategy of distributed hybrid power in microgrid[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(1): 11-15.
- [5] CANDY T. A distributed generation control architecture for islanded ac microgrids[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2015, 23(5): 1717-1735.
- [6] VALENCIA F, COLLADO J, SAEZ D, et al. Robust energy management system for a microgrid based on a fuzzy prediction interval model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1486-1494.
- [7] 曾鸣, 彭丽霖, 王丽华, 等. 主动配电网下分布式能源系统双层双阶段调度优化模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 108-115.  
ZENG Ming, PENG Lilin, WANG Lihua, et al. Two-stage dual-level dispatch optimization model of distributed energy system in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 108-115.
- [8] 邵程程, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3818.  
SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3818.
- [9] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.  
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [10] MASOUD A, NIMA A. Optimal dynamic expansion planning of distribution systems considering non-renewable distributed generation using a new heuristic double-stage optimization solution approach[J]. Applied Energy, 2015, 13(156): 655-665.
- [11] GIORGOS T, NIKOLAOS S, CHRISTOPHER K. Integration of the environmental management aspect in the optimization of the design and planning of energy systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 12(106): 576-593.
- [12] 江翔铄. 基于多能源互补的分布式冷热联供系统的数学建模及优化运行研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
JIANG Xushuo. Modelling and operation optimization of a multi-energy complementary distributed heating and cooling system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [13] 马少寅, 刘晓立, 薛松, 等. 考虑能源可持续发展的电力系统多目标扩展规划[J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1945-1950.  
MA Shaoyin, LIU Xiaoli, XUE Song, et al. Multi-objective expansion planning of electric power system considering energy sustainable development[J]. East China Electric Power, 2013, 41(9): 1945-1950.
- [14] KROPOSKI B, GARRETT B, MACMILLAN S. Energy systems integration: a convergence of ideas[R]. National Renewable Energy Laboratory (NREL) of the U. S. Department of Energy, 2012.
- [15] 黄国日, 刘伟佳, 文福拴, 等. 具有电转气装置的电气混联综合能源系统的协同规划[J]. 电力建设, 2016, 37(9): 1-13.  
HUANG Guori, LIU Weijia, WEN Fushuan, et al.

- Collaborative planning of integrated electricity and natural GAS energy systems with power-to GAS stations[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9): 1-13.
- [16] 黎静华, 桑川川. 能源综合系统优化规划与运行框架[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 41-48.  
LI Jinghua, SANG Chuanchuan. Discussion on optimal planning and operation framework for integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 41-48.
- [17] 黄泽霞, 俞攸红, 黄德才. 惯性权自适应调整的量子粒子群优化算法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 26(2): 221-232.  
HUANG Zexia, YU Youhong, HUANG Decai. Quantum-behaved particle swarm algorithm with self-adapting adjustment of inertia weight[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 26(2): 221-232.
- [18] 文娟, 谭阳红, 雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 73-78.  
WEN Juan, TAN Yanghong, LEI Kejun. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 73-78.
- [19] 黄元生, 陈娟, 鲁斌, 等. 并网模式下的微网环保经济调度协同优化方法研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(3): 1-5.  
HUANG Yuansheng, CHEN Juan, LU Bin, et al. Research on collaborative optimization method for environmental and economic dispatch of microgrid under grid-connected mode[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(3): 1-5.
- [20] 孟安波, 梅鹏, 卢海明. 基于纵横交叉算法的热电联产经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 90-97.  
MENG Anbo, MEI Peng, LU Haiming. Crisscross optimization algorithm for combined heat and power economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 90-97.
- [21] 王威, 黄大为. 含可调度分布式电源的配电网综合优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 429-433.  
WANG Wei, HUANG Dawei. The coordination optimization of distribution networks with dispatched distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 429-433.
- [22] 孙严冬. 邯郸东郊热电联产项目综合评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
SUN Yandong. The comprehensive assessment study on co-generation of heat and power project in Handan eastern outskirts[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

---

收稿日期: 2016-10-20; 修回日期: 2016-11-16

作者简介:

白学祥(1972-), 男, 博士研究生, 研究方向为配电网规划; E-mail: 409969850@qq.com

曾鸣(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为能源互联网, 电力技术经济; E-mail: hdzengming@163.com

李源非(1993-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力技术经济。E-mail: yuanfeilee@foxmail.com

(编辑 周金梅)