

# 基于 PSO-Newton 法的电-气综合能源系统能流计算

闵庆久, 马兆兴, 马英姿

(青岛理工大学信息与控制工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:**在全球能源形势日趋严峻的情况下,传统单一的电力系统能源结构已经无法满足发展的需求。随着电解制取天然气(P2G)技术及燃气轮机技术的迅速发展,电力系统与天然气系统的联系变得紧密起来。能流计算作为电-气系统耦合分析的基础与关键,对其研究显得尤为重要。文中首先分析了电力系统与天然气系统数学模型,针对牛顿(Newton)法中较难解决天然气系统对压力初值的选取问题,提出利用粒子群(PSO)算法对压力初值进行优选;然后利用 Newton 法顺序求解电-气综合能源系统(IES)的能流;最后由 IEEE 14 节点配电系统和 14 节点天然气系统组成的电-气耦合系统中验证了所提方法的可行性和准确性。

**关键词:**综合能源系统(IES);电转气;气转电;粒子群-牛顿(PSO-Newton)法;能流计算

**中图分类号:**TM744

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2021)01-0033-07

## 0 引言

能源是社会经济发展的重要支撑。近几年随着煤炭、石油等传统能源的日益枯竭以及人们对发展绿色经济的要求,探索清洁无污染的能源与提高能源的综合利用效率成为了当今社会研究的热点<sup>[1-3]</sup>,于是综合能源系统(integrated energy system, IES)的概念应运而生。

IES 加强了以往各自独立的电力系统、天然气系统和供热系统之间的耦合,并对各种能源的生产、运输和消费等环节进行了集成与优化,大大提高了能源的利用效率<sup>[4-7]</sup>,是未来能源发展的主要方向。天然气与其他化石燃料相比,具有储量丰富、低碳环保等特点,并且随着电解制取天然气(power to gas, P2G)技术的发展与燃气机组的并入电网<sup>[8]</sup>,电-气 2 个系统之间的耦合成为了 IES 研究的一个重要方面。

能流计算作为电-气 IES 研究的基础与核心,国内外相关学者对其进行了大量的研究。文献[9]在分析天然气系统中压缩机不同控制模式的基础上,提出实用化的改进方法,并建立 IES 的能流计算模型;文献[10]考虑了电-气 IES 中的不确定因素,提出 IES 概率能流的概念;文献[11-15]研究了电-气系统的一体化问题,为能使 IES 运行在最优的状态下,将天然气系统中的暂态气流与电力系统中的稳态潮流相结合,提出最优能流计算方法,得到电-气一体化系统的最优动态能流;文献[16]介绍了电-气-热 3 个系统之间的耦合单元以及各个系统间物

理特性的不同,并基于此给出了 2 种新型交替迭代的能流计算方法;文献[17]基于天然气系统的暂态模型,对电-气 IES 进行多时段的能流仿真;文献[18]考虑了温度对整个电-气系统能流计算结果的影响;文献[19-20]通过研究不同的能源设备及能源供应条件,提出 4 种不同模式下的 IES 能流计算方法。目前关于牛顿(Newton)法中对天然气系统节点压力初值选取问题的研究尚浅,文献[21]利用工程经验来确定压力初值,但这样误差较大;文献[22]在求解时考虑将未知的节点压力设为 0,但在求解过程中可能会出现雅可比矩阵奇异的情况。

文中利用粒子群(partical swarm optimization, PSO)算法的全局搜索能力解决了天然气系统 Newton 法压力初值选取困难的问题,并采用顺序求解法在 IEEE 14 节点配电系统和 14 节点的天然气系统中分 2 种耦合模式验证了所提方法的可行性。

## 1 电-气 IES 数学模型

### 1.1 电力系统数学模型

电力系统中节点电压的表达方式分为直角坐标和极坐标 2 种<sup>[23-24]</sup>,文中采用的是极坐标方式,其表达式为:

$$\dot{U}_i = U_i(\cos \delta_i + j\sin \delta_i) \quad (1)$$

节点的功率表达式为:

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j(G_{ij}\cos \delta_{ij} + B_{ij}\sin \delta_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j(G_{ij}\sin \delta_{ij} - B_{ij}\cos \delta_{ij}) \quad (3)$$

式中: $\dot{U}_i$ 为节点电压; $U_i$ 为节点电压幅值; $P_i, Q_i$ 分别为节点的有功和无功功率; $\delta_{ij}$ 为 2 个节点间的

相角差;  $G_{ij}$ ,  $B_{ij}$  分别为节点导纳矩阵中的实部与虚部;  $n$  为电力系统中的节点个数。

### 1.2 天然气系统数学模型

在天然气系统中, 2 个节点间的管道流量可以表示成与节点压力有关的函数, 其具体形式为:

$$f_{ij} = k_{ij} s_{ij} \sqrt{s_{ij} (p_i^2 - p_j^2)} \quad (4)$$

式中:  $f_{ij}$  为管道  $ij$  间的天然气流量;  $p_i$ ,  $p_j$  分别为节点  $i, j$  的压力;  $k_{ij}$  为与天然气管道的直径、摩擦系数、长度、温度等因素有关的常数;  $s_{ij}$  为天然气管道中的天然气流动方向, 如式(5)所示:

$$s_{ij} = \begin{cases} 1 & p_i - p_j \geq 0 \\ -1 & p_i - p_j < 0 \end{cases} \quad (5)$$

由于摩擦阻力的存在, 天然气在管道运输的过程中必然会有有一定的压力损失, 所以需要利用压缩机来提升管道中的压力以弥补这些损失。压缩机分燃气驱动和电驱动 2 种方式, 文中采用燃气驱动的压缩机, 其简易模型如图 1 所示。

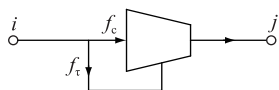


图 1 简易压缩机模型

Fig.1 Simple compressor model

燃气压缩机消耗的等效功率与出入口侧的压力比、流过压缩机的天然气流量的关系可以表示为:

$$P_c = B_c f_c \left[ \left( \frac{p_j}{p_i} \right)^{Z_c(r-1)/r} - 1 \right] \quad (6)$$

式中:  $P_c$  为压缩机的功率;  $B_c$ ,  $Z_c$  为压缩机参数;  $r$  为气体绝热指数, 取 1.3<sup>[25-26]</sup>;  $f_c$  为流过压缩机的天然气流量。

压缩机消耗的天然气流量与功率间的关系为:

$$f_\tau = \alpha + \beta P_c + \lambda P_c^2 \quad (7)$$

式中:  $f_\tau$  为压缩机消耗的天然气流量;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$  为能量转换效率常数, 文中取  $\alpha = \lambda = 0$ ,  $\beta = 0.2 \times 10^{-3}$ 。

天然气系统中的节点满足流量平衡, 即任一节点流入的天然气流量等于流出该节点的流量, 用方程表示为:

$$f_{igs} = \sum_{j \in i} f_{ij} + \sum_{j \in i} s_c f_{c,ij} + \sum_{j \in i} \gamma f_\tau + f_{igl} \quad (8)$$

式中:  $f_{igs}$  为节点  $i$  的天然气注入量;  $f_{igl}$  为节点  $i$  的天然气负荷;  $\sum_{j \in i} f_{ij}$  为所有与节点  $i$  相连的管道流量;  $\sum_{j \in i} s_c f_{c,ij}$  为所有与节点  $i$  相连的压缩机流过的流量, 当节点  $i$  位于压缩机的入口侧时  $s_c$  为 1, 位于出口侧时  $s_c$  为 -1;  $\sum_{j \in i} \gamma f_\tau$  为所有与节点  $i$  相连的压缩机消耗的流量, 当节点  $i$  位于压缩机的入口侧时  $\gamma$

为 1, 位于出口侧时  $\gamma$  为 -1。

### 1.3 电-气互转数学模型

气转电指的是燃气轮发电机以天然气作为燃料进行发电, 其消耗的天然气量与发电功率的关系为:

$$f_{G2P} = \frac{\Phi + \varphi P_{G2P} + \mu P_{G2P}^2}{f_{GHV}} \quad (9)$$

式中:  $P_{G2P}$  为燃气轮机的发电功率;  $f_{G2P}$  为燃气轮机消耗的天然气量;  $\Phi$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  为天然气驱动燃气轮机的能量转换系数;  $f_{GHV}$  为天然气高热值。

电转气指的是电解制取天然气, 制取天然气的过程可以分为 2 个步骤。首先是电解水产生氢气, 然后通过 Sabatier 反应将氢气与二氧化碳转化为甲烷, 即天然气的主要成分<sup>[27]</sup>, 电解制取天然气消耗的电能与输出天然气量关系为:

$$f_{P2G} = \eta_{P2G} P_e \quad (10)$$

式中:  $f_{P2G}$  为电转天然气设备输出的天然气量;  $\eta_{P2G}$  为电转天然气设备的效率;  $P_e$  为电转天然气设备功率。

## 2 电-气能流计算模型

### 2.1 Newton 法

Newton 法是一种给定初值, 然后通过一步步迭代寻找最优值的方法。其中电力系统的迭代方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - P_i \\ \Delta Q_i = Q_{is} - Q_i \\ P_{i,k+1} = P_{i,k} + \Delta P_{i,k} \\ Q_{i,k+1} = Q_{i,k} + \Delta Q_{i,k} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = -J_e \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ U_{D2}^{-1} \Delta U \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $P_{is}$ ,  $Q_{is}$  分别为节点  $i$  给定的有功和无功功率;  $J_e$  为电力系统中的雅可比矩阵, 其具体形式可以参考文献[23];  $U_{D2}^{-1}$  为节点电压的对角矩阵。

根据式(4)得到天然气系统中的管道流量可以表示成与节点压力有关的函数, 因此天然气系统的迭代方程为:

$$\begin{cases} \Delta f_i = f_{igs} - f_i \\ f_{i,k+1} = f_{i,k} + \Delta f_{i,k} \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta f = -J_g \Delta p \quad (14)$$

其中:

$$f_i = \sum_{j \in i} f_{ij} + \sum_{j \in i} s_c f_{c,ij} + \sum_{j \in i} \gamma f_\tau + f_{igl} \quad (15)$$

式中:  $J_g$  为天然气系统的雅可比矩阵, 如式(16)所示。

$$J_g = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta f_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial \Delta f_1}{\partial p_i} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \Delta f_i}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial \Delta f_i}{\partial p_i} \end{pmatrix} \quad (16)$$

## 2.2 PSO 算法

PSO 算法是在受到鸟群觅食的启发后发展起来的一种智能优化算法,粒子群中的每个粒子通过跟踪比较目前自己找到的最优值和整个种群找到的最优值来更新自己。每个粒子的位置与速度更新方程为:

$$\begin{cases} v_{id} = wv_{id} + c_1r_1(\xi_{id} - x_{id}) + c_2r_2(\xi_{gd} - x_{id}) \\ x_{id,k+1} = x_{id,k} + v_{id,k} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $v_{id}$ ,  $x_{id}$  分别为粒子的速度与位置;  $w$  为惯性因子,取 0.6;  $c_1, c_2$  为学习因子,取 2;  $\xi_{id}$  为第  $i$  个粒子本身找到的最佳位置;  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  间的随机数;  $\xi_{gd}$  为整个种群找到的最佳位置。

## 2.3 电-气能流计算流程

文中在气转电和电转气技术的基础上提出“以气定电”和“以电定气”2种耦合模式以验证所提方法,2种模式下的计算流程分别如图 2 和图 3 所示,其中模式一为“以气定电”模式,模式二为“以电定气”模式。

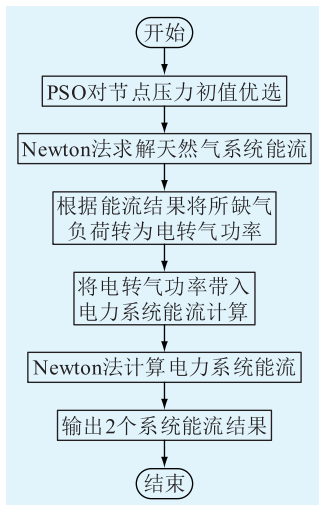


图 2 模式一能流计算流程

Fig.2 Energy flow calculation process of model 1

## 3 算例分析

文中所提方法利用 Matlab 在 IEEE 14 节点配电系统和 14 节点天然气系统上进行了验证,使用的计算机 CPU 配置为 Intel(R) Core(TM) i5-5200U,主频为 2.2 GHz,其中所使用的天然气系统气负荷

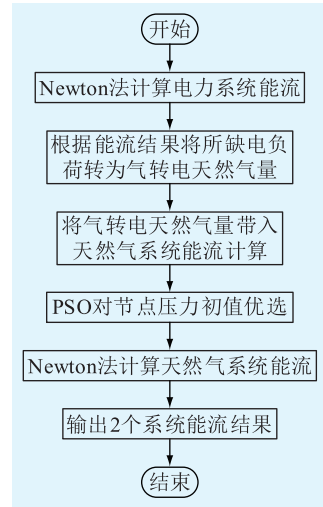


图 3 模式二能流计算流程

Fig.3 Energy flow calculation process of model 2  
见表 1,其余具体参数可以参考文献[10]。配电系统与天然气系统的结构示意图分别见图 4 和图 5。

表 1 天然气系统气负荷

Table 1 Gas loads of natural gas system

节点	气负荷 $\times 10^6 / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	节点	气负荷 $\times 10^6 / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$
2	0.28	12	2.26
3	1.13	13	0.85
5	0.57	14	0.85

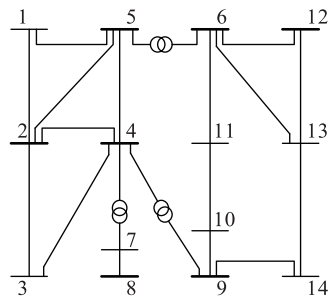


图 4 IEEE 14 节点配电系统

Fig.4 IEEE 14-bus power distribution system

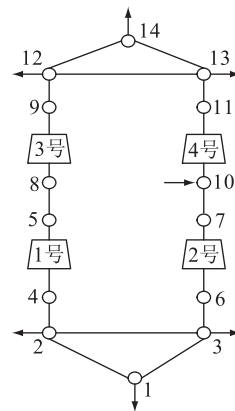


图 5 14 节点天然气系统

Fig.5 14-node natural gas system

关于天然气系统中压缩机的控制方式有定升压比、定出口压力、定入口压力 3 种,在文中所使用的 4 台压缩机中,使用定升压比控制的压缩机为 1 号和 2 号,3 号与 4 号压缩机控制方式分别为定入口压力和定出口压力,其详细数据见文献[10]。鉴于天然气系统中压力初值难以选取的问题,首先将节点流量的不平衡量转化为一个最值问题,即:

$$\psi(p) = \left( \sum_{i=1}^n |\Delta f_i| \right) / n \quad (18)$$

式中:  $\psi(p)$  为所有节点天然气流量不平衡量的均值。将  $\psi(p)$  作为目标函数带入到 PSO 迭代程序中求得最小值,此时的节点压力即为 Newton 法中的初值。文中分别研究迭代次数和种群规模 2 个方面对最终目标函数值的影响,首先种群规模定为 50,迭代次数分别为 50,100,500,1 000,  $\psi(p)$  的数值与迭代次数的关系如图 6 所示。

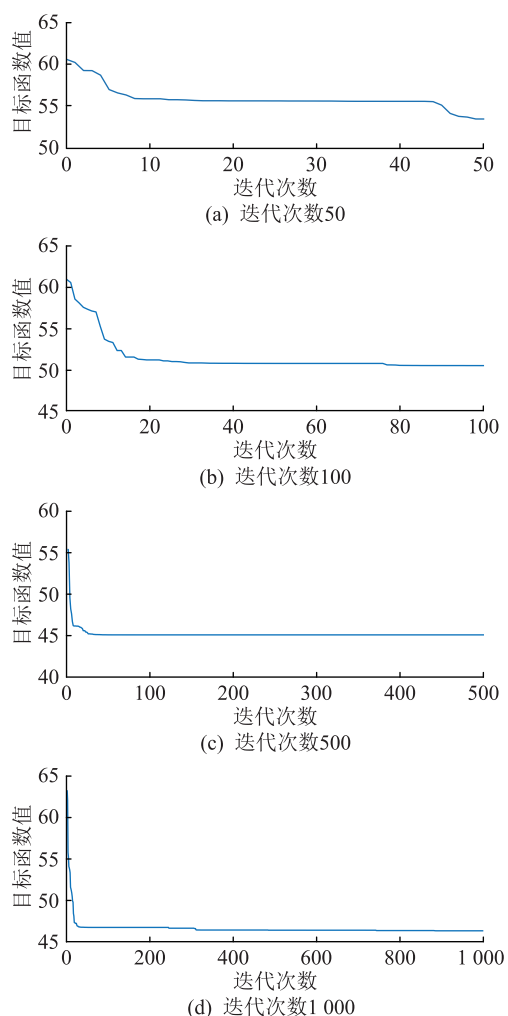


图 6 目标函数值与迭代次数

Fig.6 Objective function and iteration times

PSO 算法作为一种随机最优算法,在迭代伊始每个粒子的速度与位置都是随机的,并且每个粒子

都具有记忆特性,所以每次迭代的结果不一定完全相同,这与图 6 中的结果相吻合。由图 6 可以看出,在迭代的初始阶段,目标函数值随着迭代次数的增加而迅速减少,但在经过一定的迭代次数后目标函数值的取值趋于平缓,500 次的迭代结果与 1 000 次的迭代结果相差很小,因此文中迭代次数定为 500 次,在此基础上更改粒子群的种群规模,分别为 20, 100,  $\psi(p)$  的数值与种群规模的关系如图 7 所示。

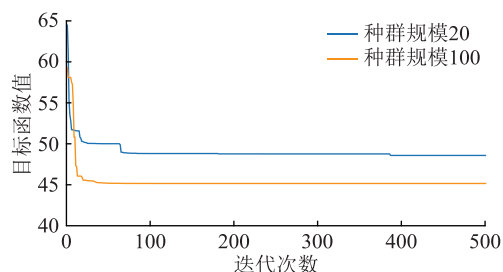


图 7 目标函数值与种群规模

Fig.7 Objective function and population size

由图 7 可见,与迭代次数相比,种群规模的大小对最终目标函数值的影响并不大。根据图 6 与图 7 可知,天然气系统流量的不平衡量经过 PSO 程序明显减少,此时得到的节点压力更接近 Newton 法需要的初值。因此文中采用 PSO 程序中迭代次数为 500,种群规模为 50 的结果作为 Newton 法迭代中的初值。

“以气定电”模式是利用 P2G 设备补足天然气系统所缺天然气负荷,“以电定气”模式是利用燃气轮机补足配电系统所缺电力负荷。“以气定电”模式中 P2G 设备位于天然气系统的 13 号节点与电力系统的 12 节点,“以电定气”模式中燃气轮机位于配电系统的 14 号节点与天然气系统的 3 号节点,其耦合示意如图 8 所示。

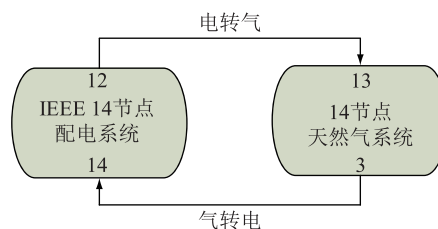


图 8 电-气耦合示意

Fig.8 Schematic diagram of power-gas coupling

在 IEEE 14 节点配电系统中,1 号节点为平衡节点,2,3,6,8 号节点为 PV 节点,其余节点为 PQ 节点,除耦合节点外 2 个系统的其他节点负荷均不作改变。2 种模式下的电力系统节点电压、天然气系统节点压力与管道流量分别见图 9、图 10 和表 2。

文中 Newton 法中的收敛精度为  $10^{-4}$ ,在“以气

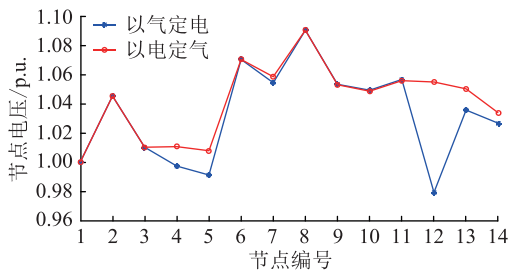


图9 电力系统节点电压

Fig.9 Power system nodes voltage

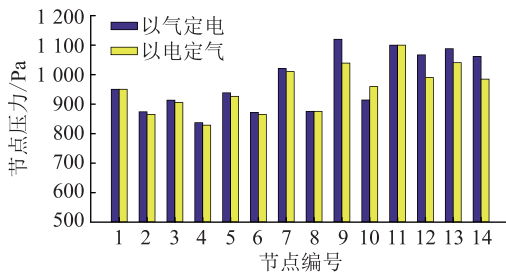


图10 天然气系统节点压力

Fig.10 Gas system nodes pressure

表2 天然气管道流量

Table 2 Natural gas flows at pipelines

管道	以气定电 $\times 10^6 / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	以电定气 $\times 10^6 / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$
1—2	4.18	4.37
1—3	2.43	2.68
2—3	-2.98	-2.99
2—4	2.68	2.63
3—6	2.83	2.77
5—8	3.03	-4.42
7—10	4.77	3.35
9—12	4.15	3.72
11—13	1.68	3.67
12—13	-1.66	-2.45
12—14	0.74	0.71
13—14	1.70	2.34

定电”模式下,将在 PSO 中得到的压力初值代入 Newton 法中计算经过 8 次迭代达到了收敛要求,所用时间为 2.942 s;“以电定气”模式下的迭代次数为 6 次,所用时间为 2.399 s。由图 9 可知,在“以气定电”模式下的部分节点电压要低于“以电定气”模式下的电压,特别是在耦合节点处下降的尤为明显,这是因为“以气定电”模式下为了满足天然系统的用气需求增加了配电系统的负荷,所以导致了部分节点的电压有所下降。在图 10 中,“以电定气”模式下的天然气系统节点压力普遍略低于“以气定电”模式下的压力,这与配电系统中节点电压的情况类似,“以电定气”模式下为了满足配电系统中的电力需求增加了天然气系统的气负荷,天然气消耗

量增大,从而导致节点压力下降。

分析图 9 和图 10 的能流结果可知,这 2 种模式所适用的场合并不相同,须因地制宜。“以气定电”模式适用于电力资源较丰富的地区或时段,例如,风能作为一种非常理想的可再生能源,发展前景十分广阔,但受风力的影响较大,在某一段时间内风力充足时<sup>[28—29]</sup>,弃风现象严重,若这段时间内风力发电所产生的富余电能加上天然气储气装置就能够很好地实现配电系统的“削峰填谷”;“以电定气”模式适用于天然气资源较为丰富的地区,天然气作为一种清洁能源,能够有效缓解煤炭资源紧张及环境污染问题。

## 4 结论

文中以电-气 IES 能流计算 Newton 法中天然气系统的初值难以选取为切入点,提出先利用 PSO 法对天然气系统初值进行优选,然后结合 Newton 法进行能流计算,可以得到以下 2 个结论:

(1) 文中基于电转气和气转电技术分“以气定电”和“以电定气”2 种模式提出 PSO-Newton 法,根据算例结果验证了所提方法在小规模天然气系统中的有效性,计算速度较快,并且具有良好的收敛特性。

(2) 这 2 种耦合模式可以根据所在地区与时段不同视情况选取,具有很强的灵活性,若 2 个系统间配有一定的储能设备则可以有效提高不同能源之间的利用效率,减少传统化石能源对环境的破坏。

然而在大规模气网中有的管道流向复杂,在能流计算前难以确定,今后将研究该方法对更大规模、管道流向未知时天然气网络的适用性。

## 参考文献:

- [1] 赵军,王妍,王丹,等. 能源互联网研究进展:定义、指标与研究方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(10):1-14. ZHAO Jun, WANG Yan, WANG Dan, et al. Research progress in energy Internet: definition, indicator and research method [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2018, 30(10): 1-14.
- [2] 孙秋野. 能源互联网[M]. 北京:科学出版社,2015:28-40. SUN Qiuye. Energy Internet[M]. Beijing: Science Press, 2015: 28-40.
- [3] 孙可,张全明,郑朝明,等. 能源互联网视角下的未来配电网发展[J]. 浙江电力,2020,39(1):1-8. SUN Ke, ZHANG Quanming, ZHENG Zhao ming, et al. Development of distribution network in the future from the perspective of energy internet [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(1): 1-8.
- [4] 王毅,张宁,康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2015,35(22):5669-5681.

- WANG Yi,ZHANG Ning,KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22):5669-5681.
- [5] 邵乔乐,张程翔,贺军. 微电网系统综合能源示范工程综述[J]. 浙江电力,2020,39(5):55-60.
- SHAO Qiaoyue,ZHANG Chengxiang,HE Jun. The study of microgrid system demonstration application of integrated energy project[J]. Zhejiang Electric Power,2020,39(5):55-60.
- [6] 华丽云,孙坚栋,王振,等. 基于多能互补的综合能源控制系统研究及应用[J]. 浙江电力,2020,39(7):108-114.
- HUA Liyun,SUN Jiandong,WANG Zhen, et al. Research and application of an integrated energy control system based on multi-energy complement [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(7):108-114.
- [7] 周伏秋,蒋焱,邓良辰,等. 能源变革新时代综合能源服务市场机遇[J]. 电力需求侧管理,2019,21(4):3-6.
- ZHOU Fuqiu,JIANG Yan,DENG Liangchen, et al. Comprehensive energy service market opportunities in the context of energy transformation[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4):3-6.
- [8] GUANDALINI G,CAMPANANRI S,ROMAN-O M C. Power-to-gas plants and gas tur-bines for improved wind energy dispatch ability:energy andeconomic assessment [J]. Applied Energy, 2015,147:117-130.
- [9] 王英瑞,曾博,郭经,等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术,2016,40(10):2942-2951.
- WANG Yingrui,ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity,heat and gas [J]. Power System Technology, 2016, 40(10):2942-2951.
- [10] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气混联综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6331-6340.
- CHEN Sheng,WEI Zhinong,SUN Guoqiang, et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24):6331-6340.
- [11] FANG Jiakun,ZENG Qing, AI Xiaomeng, et al. Dynamic optimal energyflow in the integratednatural gas and electrical power systems [J]. IEEE Transactionson Sustainable Enegy, 2018,9(1):188-198.
- [12] CHAUDRY M,JENKINS N,QADR DAN M, et al. Combined gas and electricity network expansionplanning[J]. Applied Energy,2014,113:1171-1187.
- [13] XU X,JIA H,CHIANG H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas andelectricity supply system in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3):1212-1221.
- [14] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDUL-WAHAB A, et al. Optimal expansion planningof energy hub with multiple energy infrastructures [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015,6(5):2302-2311.
- [15] 林威,靳小龙,穆云飞,等. 区域综合能源系统多目标最优混合潮流算法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20):5829-5839.
- LIN Wei,JIN Xiaolong,MU Yunfei, et al. Multiobjective optimal hybrid power flow algorithm for integrated local area energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20):5829-5839.
- [16] 于潇涵,赵晋泉. 含 P2H、P2G 电-气-热综合能源系统多能流算法[J]. 电力建设,2018,39(12):13-21.
- YU Xiaohan,ZHAO Jinqun. Heat-gas-power flow calculation method for integrated energy system containing P2H and P2G [J]. Electric Power Construction,2018,39(12):13-21.
- [17] 卫志农,梅建春,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):41-47.
- WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation ofintegrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(6):41-47.
- [18] ALBERTO M M,CLAUDIO R. FUERTEE. A unified gas and power flow analysis innatural gas and electricity coupled networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4):2156-2166.
- [19] 吴桂联,张林垚,林婷婷,等. 不同运行模式下区域综合能源系统多能潮流计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(7):95-104.
- WU Guilian,ZHANG Linyao, LIN Tingting, et al. Calculation method for multi-energy powerflow in district-level integrated energy systemin different operation modes[J]. Proceedings of the CSU-EPSC,2019,31(7):95-104.
- [20] 陈宇沁,曹晓冬,王俊,等. 综合能源系统综合需求响应行为研究[J]. 电力工程技术,2020,39(6):89-97.
- CHEN Yuqin,CAO Xiaodong,WANG Jun, et al. Integrated demand response behavior of integrated energy system [J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(6):89-97.
- [21] LI Qing,AN Seungwon,GEDRA T W. Solving natural gas load-flow problems using electric loadflow techniques [C]//Proceedings of the North American Power Symposium. Rolla, USA,2003:1-7.
- [22] ZENG Qing,FANG Jiakun,LI Jinghua, et al. Steady-state analysis of the integrated natural gas and electric power system with bidirectional energy conversion. 2016,184:1483-1492.
- [23] 何仰赞,温增银. 电力系统分析(下) [M]. 4版. 武汉:华中科技大学出版社,2016:49-52.
- HE Yangzan,WEN Zengyin. Power system analysis(2) [M]. 4th ed. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology Press,2016:49-52.
- [24] 黄曙,何桦,卫志农,等. 基于改进牛顿法的 VSC-HVDC 潮流计算[J]. 江苏电机工程,2013,32(1):18-22.
- HUANG Shu,HE Hua,WEI Zhinong, et al. Power flow calculation of VSC-HVDC based on improved Newton method [J].

- Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(1): 18-22.
- [25] 董彦君, 张惠智, 马富齐, 等. 区域综合能源系统潮流计算[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 197-204.  
DONG Yanjun, ZHANG Huizhi, MA Fuqi, et al. Power flow calculation of community integrated energy system[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 197-204.
- [26] 盛超群, 刘念, 周长城. 工业园区综合能源系统的运营模式综合评估方法[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(4): 12-16.  
SHENG Chaoqun, LIU Nian, ZHOU Changcheng. Comprehensive evaluation method for the operation mode of integrated energy system in industrial park[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4): 12-16.
- [27] 孟冰冰, 郭丰慧, 胡林猷, 等. 考虑天然气-电力耦合的多能源系统风电消纳分析[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 2-8.  
MENG Bingbing, GUO Fenghui, HU Linxian, et al. Wind abandonment analysis of multi-energy systems considering gas-electricity coupling[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 2-8.
- [28] 陈昊, 万秋兰, 王玉荣. 基于厚尾均值广义自回归条件异方差族模型的短期风电功率预测[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 91-98.  
CHEN Hao, WAN Qiulan, WANG Yurong. Short-term wind power forecast based on fattailed generalized autoregressive conditional heteroscedasticity-in-mean type models[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 91-98.
- [29] CHEN Hao, LI Fangxing, WANG Yurong. Wind power forecasting based on outlier smoothtransition autoregressive GARCH model[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2018, 6(3): 532-539.

作者简介:



闵庆久

闵庆久(1993),男,硕士在读,研究方向为综合能源微网能流计算与恢复控制(E-mail: 1026034983@qq.com);

马兆兴(1982),男,博士,讲师,研究方向为电力系统运行、分析与控制,综合能源系统;

马英姿(1997),女,硕士在读,研究方向为电动汽车并网技术。

## Energy flow calculation of integrated power-gas energy system based on PSO-Newton method

MIN Qingjiu, MA Zhaoxing, MA Yingzi

(School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** Under the increasingly severe global energy situation, the traditional single power system energy structure has been unable to meet the needs of development. With the rapid development of power-to-gas (P2G) and gas turbine technology, the connection between the power system and natural gas system becomes closer. As the basis and key of coupling analysis of the power-gas system, the study of energy flow calculation is of great importance. Firstly, the mathematical models of power system and natural gas system are analyzed. Aiming at the problem of choosing initial pressure value in natural gas system which is difficult to be solved in Newton method, the particle swarm optimization (PSO) is proposed to optimize the initial pressure value, and then Newton method is used to solve the energy flow of the power-gas integrated energy system (IES). Finally, the feasibility and accuracy of the proposed method are verified in the power-gas coupling system composed of IEEE 14-bus power distribution system and 14-node natural gas system.

**Keywords:** integrated energy system (IES); power to gas; gas to power; PSO-Newton method; energy flow calculation

(编辑 钱悦)