

# 基于遗传算法的区域电力和供热系统优化

葛海麟, 陈皓勇, 刘飞  
(华南理工大学 电力学院, 广州 510641)

**摘要:** 电力系统与供热、天然气等系统之间的互联及耦合越切紧密, 从区域电力和供热系统的协调优化角度出发, 通过建立电力系统与供热系统的数学模型, 以总能量损失最小为目标, 结合系统的等式及不等式约束, 构建了基于遗传算法的区域电力和供热系统优化模型。以某区域电力和供热系统为研究对象, 利用上述优化模型进行建模和分析, 验证了基于遗传算法的区域电力和供热系统优化模型的实用性及有效性。研究内容为区域电力和供热系统运行优化奠定了基础。

**关键词:** 电力; 区域供热; 优化; 遗传算法

**中图分类号:** TM715

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2017)01-0025-06

## Optimization of District Electricity and Heating System Based on Genetic Algorithm

GE Hailin, CHEN Haoyong, LIU Fei

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Interconnection and coupling between electric power system and heating, natural gas system have become increasingly close. From the point of view of coordinated optimization of district electricity and heating system, through the establishment of mathematical model of power system and heating system, with the goal of total energy loss reaches the minimum, with equality and inequality constraint system, the optimization model of district electricity and heating system based on genetic algorithm is constructed in this paper. Taking a district electricity and heating system as the research object, using the above optimization model to model and analyze, the practicability and validity of the optimization model of district electricity and heating system based on genetic algorithm are verified. In this paper, the research content lays the foundation for the operation optimization of district electricity and heating system.

**Key words:** electric power; district heating; optimization; genetic algorithm

能源危机和环境危机不断加剧, 极大地推动了分布式供能系统、能源互联网等技术的发展<sup>[1-2]</sup>。与智能电网只传输电能相比, 能源互联网实现多种形式能量的传输与转化, 其核心内涵是实现可再生能源, 尤其是分布式可再生能源的大规模利用和共享, 电力系统与供热、天然气等系统之间耦合将越切紧密<sup>[3]</sup>。区域电力和供热系统有着巨大的潜力,

其不仅能提高电力系统的灵活性以适应更多的可再生能源, 也能增加系统备用提高供能安全<sup>[4]</sup>。

近年来, 针对区域电力和供热系统的研究不断深入。文献[5]从能量的本质出发, 根据能量公理及传递公理建立了能量网络方程, 为区域电力和供热系统进行能量分析奠定了重要的理论基础。文献[6]对含电、气、热的区域综合能源系统提出了混合潮流计算方法。文献[7]针对区域电力和供热系统, 分别提出了分解的与联立的潮流分析方法。以上模型的建立, 为区域电力和供热系统的分析、运行、优化提供了重要依据。

在过去的研究中, 电力系统与供热系统的运行优化通常是独立的<sup>[8-9]</sup>, 这种处理方法已不能满足

**收稿日期:** 2016-12-06

**基金项目:** 国家优秀青年科学基金资助项目(51322702); 国家自然科学基金资助项目(51177049)

**作者简介:** 葛海麟(1990), 男, 广东茂名, 硕士研究生, 主要从事能源互联网优化的研究工作(e-mail)epgodspeed.cool@mail.scut.edu.cn。

区域电力和供热系统联立优化及调度的需求。文献[4]分析了在满足风电消纳的条件下,区域电力和供热系统的最佳运行状态。文献[10]针对分布式冷热电联产系统提出了多目标热力学优化的研究方法。文献[11]在考虑供热网络约束的条件下,针对电热能源集成系统提出了综合的运行优化方法。

电力与供热系统的优化问题通常是离散的、非线性的,其常规的解决方法主要有线性规划、非线性规划、二次规划法等,这些算法需假设各控制变量是连续的,而且要求目标函数可微,同时只能保证局部最优<sup>[12-15]</sup>。为克服这些算法的局限性,电力系统与供热系统优化中均引入了遗传算法,并均取得了很好的效果<sup>[16-19]</sup>。遗传算法比传统非线性规划法收敛性好,适应性强,可以达到全局最优,在处理非连续的和非平滑的函数寻优方面优于传统的寻优方法,具备全局寻优的能力。

本文将从区域电力和供热系统建模、优化模型的构建与遗传算法应用三个方面进行研究,。结合系统已知条件,分别对电力系统与供热系统进行建模,并给出区域电力和供热系统联立潮流分析方法的计算流程。在上述模型基础上,以总能量损失最小为目标,结合系统的等式及不等式约束,构建基于遗传算法的区域电力和供热系统的优化模型。以某区域电力和供热系统为研究对象,利用上述优化模型进行分析,对本文所提模型及理论的实用性及有效性进行探讨。

### 1 区域电力和供热系统

区域电力和供热系统的示意图如图1所示,其可分为三大部分:电力系统、供热系统与耦合的能量转换设备(如热电联产机组,热泵,锅炉及循环泵等)。

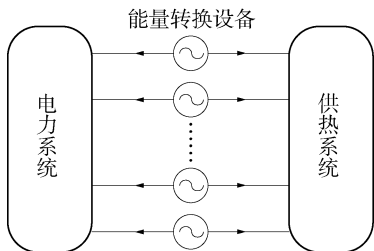


图1 区域电力和供热系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of district electricity and heating system

通过能量转换设备,可控制能量流动的方向与

速率,实现能量在两个系统之间的传递及转化。而不同能量转换设备的组合,能增加区域电力和供热系统的灵活性,且便于间歇性可再生能源的整合。

#### 1.1 电力系统模型

电力系统功率平衡方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} P_{is} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{is} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{is}$  与  $Q_{is}$  分别代表节点注入有功及无功功率;  $N$  代表节点总数,  $i$  和  $j$  为节点编号;  $V$  为节点电压幅值,  $\theta$  为节点电压相角,  $G$  与  $B$  分别为节点导纳矩阵元素的实部及虚部。

#### 1.2 供热系统模型

供热系统的示意图如图2所示,图中共有2个热源、4个热用户。其中红色实线代表供热网络,蓝色虚线代表回热网络;图中的  $T_s$ 、 $T_o$ 、 $T_r$  分别代表节点的热水供应温度,出口温度及返回温度(即出口热水混合后温度)。

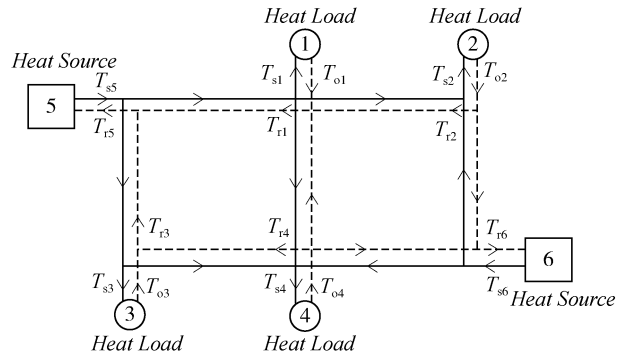


图2 供热系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heating system

供热系统可通过式(2)来描述,式中各项依次为供热系统的热量平衡方程、压力回路方程、热水供应温度及返回温度方程<sup>[7]</sup>。

$$\begin{cases} C_p \sum_{j=1}^{nhl} A h_{ij} q_{mj} (T_{si} - T_{oi}) = Q_{hi} \\ \sum_{j=1}^{nhloop} R_{mj} q_{mj} = 0 \\ \sum_{j=1}^{nhload} A_{sij} (T_{sj} - T_a) = b_{si} \\ \sum_{j=1}^{nhload} A_{rij} (T_{rj} - T_a) = b_{ri} \end{cases} \quad (2)$$

热量平衡方程中:  $i$  与  $j$  分别为热负荷节点编号和

管路编号;  $nhl$  为管道总数;  $G_p$  为热水比热容;  $A_h$  为供热网络的关联矩阵;  $q_{mj}$  为管道  $j$  的质量流量;  $Q_h$  为热负荷; 压力回路方程中  $j$  为环路编号,  $nhloop$  为环路总数;  $R_{mj}$  为管道  $j$  的质量流阻。

热水供应温度及返回温度方程中:  $i$  和  $j$  均为热负荷节点编号;  $T_a$  是环境温度;  $A_s$ 、 $A_r$ 、 $b_s$  和  $b_r$  分别是热负荷节点供应及返回温度系数矩阵;  $A_s$  和  $A_r$  为常数矩阵; 矩阵  $b_s$  和  $b_r$  的元素分别为热源节点供应温度及热负荷节点出口温度的函数。

### 1.3 区域电力和供热系统潮流计算

在电力系统中, 根据系统的实际运行方式, 按给定变量的不同, 节点可分为  $PQ$  节点、 $PV$  节点及  $V\theta$  节点三类。结合已给定变量和功率平衡方程, 求解即可确定系统的运行状态。而在供热系统中, 管道的流阻、热源节点的供应温度、热负荷及出口温度通常是已知的, 式(2)的方程数与待求的变量数量相等, 求解同样能够确定供热系统的运行状态。

文献[7]基于牛顿迭代法, 在区域电力和供热系统的分析中提出了联立潮流分析方法。在联立潮流分析方法中, 对电力系统及供热系统待求变量进行统一处理, 利用增广不平衡量  $\Delta F_{Aug}$  及增广雅克比矩阵  $J_{Aug}$  不断修正。联立潮流分析方法的程序流程如图3所示, 其中  $\varepsilon$  是误差精度。

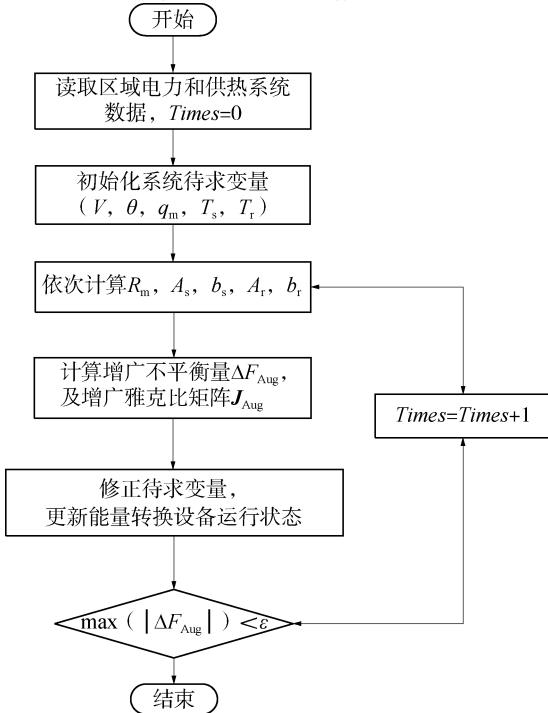


图3 联立潮流计算流程图

Fig. 3 Flow chart of power flow calculation

## 2 区域电力和供热系统的优化模型

本文接下来将进一步建立与区域电力和供热系统对应的优化模型, 该模型在数学上是一个大规模非线性优化问题<sup>[4]</sup>。该优化模型的目标函数是系统的能量损失, 包括电力系统的线路电能损失与供热系统的压能、热能损失。该优化模型是以上节建立的等效模型为基础的, 式(1)及式(2)即该优化模型的等式约束。在区域电力和供热系统中, 除了满足以上等式约束, 还应避免控制变量(如发电机电压、变压器变比、热水供应温度等)及状态变量(如负荷电压、热水出口温度等)在运行过程中出现越限, 此为该优化模型的不等式约束。

### 2.1 目标函数

以区域电力和供热系统的总能量损失最小为目标, 该系统的总能量损失为:

$$\begin{aligned}
 Enloss &= Eloss + Ploss + Hloss \\
 \begin{cases}
 Eloss &= \sum_{i,j \in S_{el}} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \\
 Ploss &= 2 * \sum_{l \in S_{hl}} R_{ml} q_{ml}^2 / \rho \\
 Hloss &= \sum Qh_{in} - \sum Qh_{out}
 \end{cases}
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $Enloss$  代表电力系统的有功损耗;  $S_{el}$  为电力系统支路集合;  $i$  和  $j$  均为支路两端节点编号;  $Ploss$  代表供热系统的压能损失(包括供水及回水)<sup>[5]</sup>;  $S_{hl}$  为供热系统管路集合;  $\rho$  为热水密度;  $Hloss$  代表供热系统的热能损失, 其大小等于输入热能  $Qh_{in}$  总和与输出热能  $Qh_{out}$  总和之差。

考虑到优化过程中电力或者供热系统状态变量可能会越限, 可以在目标函数中将这此情况以罚函数的形式进行处理<sup>[15]</sup>。因此, 最终目标函数将具有如式(4)所示的形式

$$\min F = Enloss + \sum \lambda_i \sum \left( \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right)^2 \quad (4)$$

式中:  $x$  为状态变量;  $V$  为负荷节点电压幅值;  $Q_G$  为发电机无功功率;  $q_m$  为质量流量;  $T_s$  为负荷的热水供应温度;  $\lambda$  是状态变量  $x$  越限时对应的罚因子。

### 2) 等式约束方程

如上所述, 电力系统的功率平衡方程、供热系统的热量平衡方程、压力回路方程、热水供应温度及回水温度方程, 均是区域电力和供热系统优化问

题的重要基础。在此,将上节的式(1)、式(2)的方程写成矩阵的形式,如式(5)所示。

### 3) 控制变量不等式约束

在电力系统的控制变量主要包括发电机端的电压幅值  $V_G$ 、线路投切补偿电容器组  $C$ 、变压器分接头位置  $T_{ap}$ , 供热系统的控制变量主要是供热点的热水供应温度  $T_{GS}$ , 因此区域电力和供热系统的控制变量不等式约束如式(6)所示。

$$\begin{cases} S_{is} - V(YV)^* = 0 \\ C_p A_h q_m (T_s - T_o) - Q_h = 0 \\ B_h R_m q_m = 0 \\ A_s (T_s - T_a) - b_s = 0 \\ A_r (T_r - T_a) - b_r = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $S_{is}$  是电力系统复功率矩阵。

$$\begin{cases} V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max}, i \in S_G \\ C_i^{\min} \leq C_i \leq C_i^{\max}, i \in S_C \\ Tap_i^{\min} \leq Tap_i \leq Tap_i^{\max}, i \in S_{Tap} \\ T_{Gsi}^{\min} \leq T_{Gsi} \leq T_{Gsi}^{\max}, i \in S_{hsource} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\max$  为控制变量调节范围的上限;  $\min$  为控制变量调节范围的下限;  $S_G$  为发电机组集合;  $S_C$  为线路投切补偿电容器集合;  $S_{Tap}$  为变压器分接头集合;  $S_{hsource}$  为供热点集合。

### 4) 状态变量不等式约束

电力系统的状态变量主要包括负荷节点电压幅值  $V$ 、发电机无功功率  $Q_G$ 。供热系统的状态变量主要管道质量流量,  $q_m$ , 负荷的热热水供应温度  $T_s$ 。因此区域电力和供热系统的状态变量不等式约束为:

$$\begin{cases} V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, i \in S_{PQ} \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, i \in S_G \\ q_{mi}^{\min} \leq q_{mi} \leq q_{mi}^{\max}, i \in S_{hl} \\ T_{si}^{\min} \leq T_{si} \leq T_{si}^{\max}, i \in S_{hload} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $S_{PQ}$  为  $PQ$  节点集合;  $S_G$  为发电机组集合;  $S_{hl}$  为供热系统管路集合;  $S_{hload}$  为热负荷集合。

此外,电力系统中线路传输功率也要满足必要的条件,以保证线路传递的有功功率不超过该线路安全的有功容量,如式(8)所示。

$$P_{ij}^{\min} \leq V_i^2 G_{ij} + V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \leq P_{ij}^{\max} \quad (8)$$

## 3 遗传算法在优化模型中的应用

遗传算法是一种建立在自然选择和自然遗传机

制上的随机搜索算法,其在每次迭代过程中都保留一组候选解,通过个体的评价与比较从候选解中选择相对优秀的个体,利用选择、交叉和变异等遗传操作对这些个体进行组合,以产生新的候选解群,以上过程在收敛前不断重复<sup>[20]</sup>。

遗传算法由于其众多优点,如收敛性好、适应性强、可以达到全局最优等,在电力系统与供热系统领域得到了广泛的应用<sup>[15-19,21]</sup>。本文上节建立的区域电力和供热系统优化模型,实质上即是一个大规模非线性优化问题,遗传算法在该优化模型的应用流程如图4所示。在图4中  $Gen$  代表遗传算法的迭代次数,区域电力和供热系统联立潮流分析方法的计算步骤可参见图3。

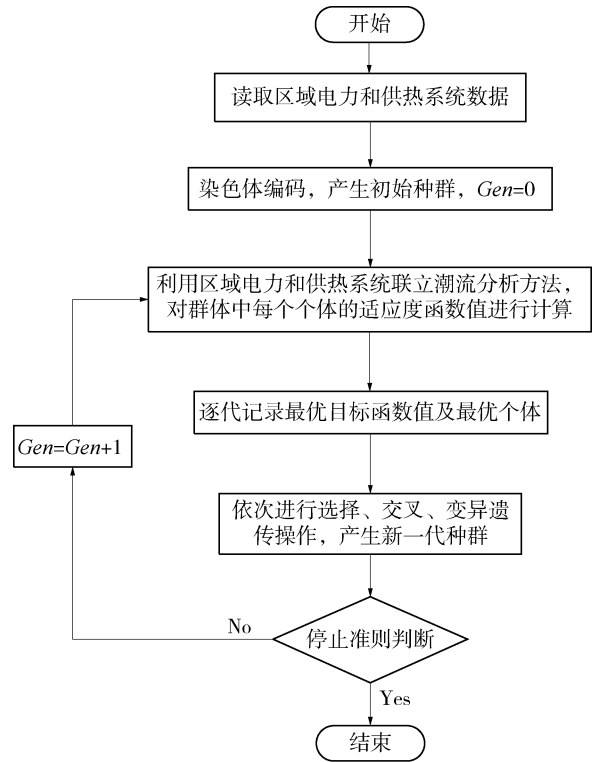


图4 遗传算法应用流程图

Fig. 4 Flow chart of application of genetic algorithm

## 4 算例分析

本章将以某个工程实践上的区域电力和供热系统为研究对象,利用区域电力和供热系统优化模型和遗传算法进行建模和分析,本文的程序均在MATLAB软件平台上实现。

该区域电力和供热系统位于巴里岛上,该系统的示意图如图5所示<sup>[7]</sup>。

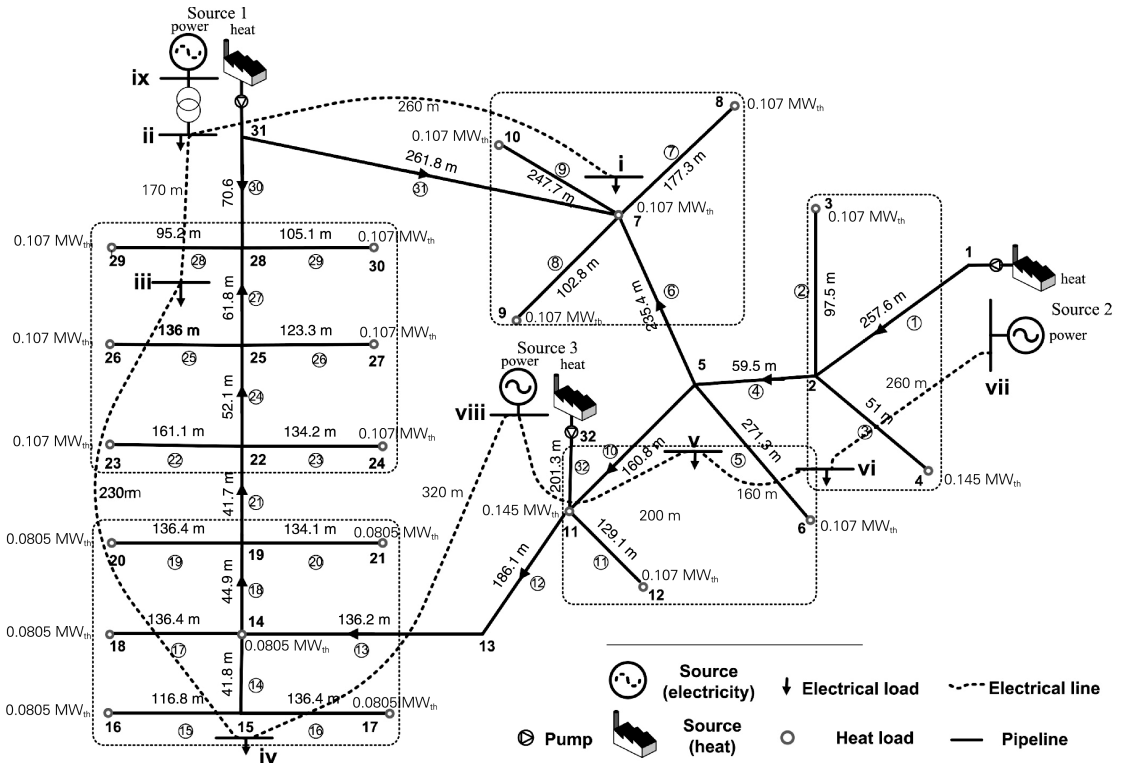


图 5 某区域电力和供热系统

Fig. 5 A district electricity and heating system of Barry Island

电力系统包括有 9 条母线和 5 个集中负荷; 在供热系统中, 共有 32 个节点与 32 条供热管道; 区域电力和供热系统通过三台热电联产机组耦合在一起。区域电力和供热系统的综合分析中须要选定两个节点作为松弛节点, 算例中选定机组 1 (燃气轮机热电联产机组) 与机组 2 (抽汽式汽轮机热电联产机组) 分别作为电力和供热的松弛节点。

如图 5 所示系统的控制变量包括变压器分接头位置及机组 1-3 的机端电压、热水供应温度, 共 7 个。待求变量包括电力系统负荷节点电压幅值和除电力松弛节点外所有节点电压相角, 供热系统所有管道的质量流量和所有负荷节点的热热水供应温度、返回温度, 共 104 个。在本文算例中遗传算法的总遗传代数  $T=60$ , 每代中群体规模  $Popsiz=40$ 。

### 1) 平均收敛特性

对于依次优化计算而言, 可以用逐代得到的最优个体对应的目标函数值得变化情况表示其收敛特性, 图 6 为遗传算法 100 次计算的平均收敛特性。

由图 6 可知, 遗传算法在该优化问题的计算中在迭代 20 次左右后即达到最优, 具有较强的收敛

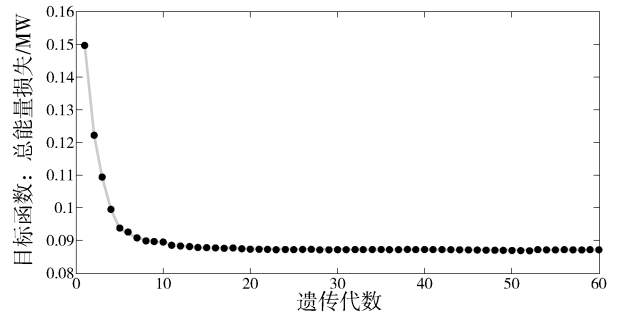


图 6 平均收敛特性

Fig. 6 Average convergence characteristics

能力和较快的收敛速度。

### 2) 优化结果分析

通过上述实验可获得使目标函数最小的最优个体。在该最优个体控制下, 系统的电压、质量流量及温度优化前后变化分别如图 7~图 9 所示。其中实线代表优化前参数, 实点代表优化后参数。

由图 7 可知, 通过对区域电力和供热系统进行协调优化, 优化后电力系统中每个节点的电压相位角趋近于 0, 节点电压幅度趋近于 1, 这显然更有利于电力系统的稳定运行。由图 8 及图 9 可知, 经

协调优化后供热系统的管道内的质量流量有所增加,热水供应温度有所降低,在满足热负荷需求的前提下有效地减少热水流经管道时的热损失。

由以上对比可知,优化后的参数值与系统优化前稳态运行时的参数值相差不到5%,优化后系统的安全裕度增加,更有利于系统的安全稳定运行。而在系统参数的变化不大的条件下,与区域电力和供热系统的原能量损失0.095 1 MW相比,经优化后能量损失减少至0.083 3 MW,能量损失下降幅值达到12.41%,有效地提高了系统的能量利用效率。

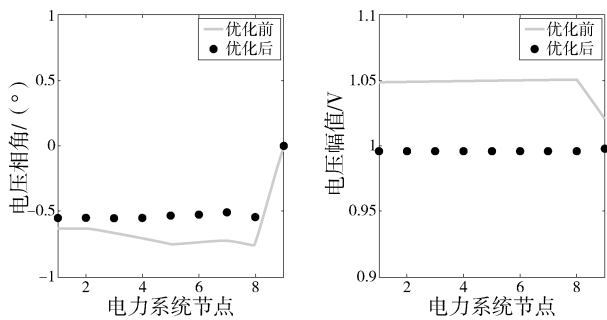


图7 电压优化前后对比

Fig. 7 Comparison of voltages before and after optimization

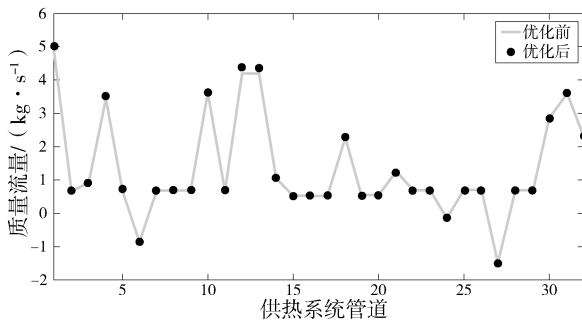


图8 质量流量优化前后对比

Fig. 8 Comparison of mass flows before and after optimization

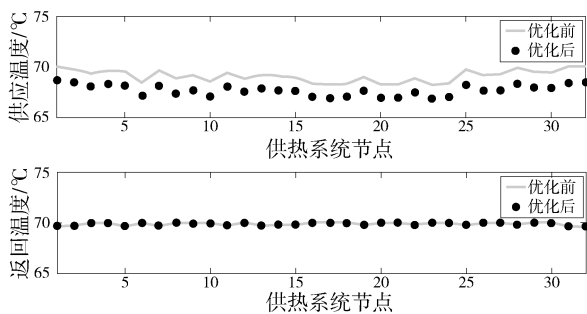


图9 温度优化前后对比

Fig. 9 Comparison of temperatures before and after optimization

## 5 结论

本文通过建立电力系统与供热系统的数学模型,以总能量损失最小为目标,结合系统的等式及不等式约束,构建了基于遗传算法的区域电力和供热系统优化模型。本文最后的算例的结果表明,本文构建的基于遗传算法的区域电力和供热系统优化模型是正确的,优化后系统安全稳定裕度增加,且有效地减少运行中的能量损失,在实际系统的运行优化中具有实用性及有效性。本文为区域电力和供热系统运行优化的研究奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] 翁一武,翁史烈,苏明.以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统[J].中国电力,2003,36(3):1-4.  
WENG Y W, WENG S L, SU M. Distributed power system based on micro gas turbine [J]. Electric Power, 2003, 36 (3): 1-4.
- [2] 田世明,栾文鹏,张东霞.能源互联网技术形态与关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.  
TIAN S M, LUAN W P, ZHANG D X. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [3] 董朝阳,赵俊华,文福控.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.  
DONG Z Y, ZHAO J H, WEN F S. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [4] LI J, FANG J, ZENG Q. Optimal operation of the integrated electrical and heating systems to accommodate the intermittent renewable sources [J]. Applied Energy, 2016, 167: 244-254.
- [5] 陈皓勇,文俊中,王增煜.能量网络的传递规律与网络方程[J].西安交通大学学报,2014,48(10):66-76.  
CHEN H Y, WEN J Z, WANG Z Y. Transfer laws and equations of energy networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10): 66-76.
- [6] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等.区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3634-3642.  
XU X D, JIA H J, JIN X L, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [7] LIU X, JENKINS N, BAGDANAVICIUS A. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Energy Procedia, 2013 (61): 155-159.
- [8] 尹娟.城市集中供热管网优化[D].天津:河北工业大学,2005.

- impact on distribution networks [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1999, 12(2): 22-28.
- [5] PUTTGEN H, MAC GREGOR P, LAMBERT F. Distributed generation: semantic hype of the dawn of a new era [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2003, 1(1): 22-29.
- [6] DRIESEN J, BELMANS R. Distributed generation: challenges and possible solutions [C]. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada: IEEE, 2006.
- [7] 胡骅, 吴汕, 夏翔, 等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源源入功率计算 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 13-17.
- HU H, WU S, XIA X, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-17.
- [8] 张丽. 季风风向变化研究及其在季风模拟评估中的应用 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [9] 任双雪. 风电功率陡坡特性与预测问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] 刘兴杰. 风电输出功率预测方法与系统 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [11] 范荣奇, 陈金富, 段献忠, 等. 风速相关性对概率潮流计算的影响分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 18-22, 76.
- FAN R Q, CHEN J F, DUAN X Z, et al. Impact of wind speed correlation on probabilistic load flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 18-22, 76.
- [12] 郑文书. 基于时空相关性的区域风电场群风速预测研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- (责任编辑 高春萌)
- 
- (上接第 30 页 Continued from Page 30)
- [9] 谢磊, 张聪, 陈皓勇. 含风电系统的无功优化调度 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 76-81.
- XIE L, ZHANG C, CHEN H Y. Optimal reactive power dispatch considering wind turbine systems [J]. South Power System technology, 2015, 9(5): 76-81.
- [10] 吴大为. 分布式冷热电联产系统的多目标热力学优化理论与应用研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [11] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596-3604.
- GU Z P, KANG C Q, CHEN X Y. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [12] 赵允新, 徐国禹. 用敏感度方法分析计算电力系统无功和电压最优控制问题 [J]. 重庆大学学报, 1985(4): 7-17.
- ZHAO Y X, XU G Y. Calculation and analysis of optimal control of system voltage and reactive power by sensitivity method [J]. Journal of Chongqing University, 1985(4): 7-17.
- [13] 李林川, 夏道止, 杨振平. 电力系统电压和网损优化计算 [J]. 电力系统自动化, 1995(7): 30-33.
- LI L C, XIA D Z, YANG Z P. An optimal calculation of voltage and loss in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995(7): 30-33.
- [14] 沈如刚. 电力系统无功功率综合优化——二次规划法 [J]. 中国电机工程学报, 1986(5): 42-50.
- SHEN R G. Reactive power optimization in power system quadratic programming method [J]. Proceedings of the CSEE, 1986(5): 42-50.
- [15] 周双喜, 杨彬. 实现无功优化的新算法——遗传算法 [J]. 电力系统自动化, 1995, 19(11): 19-23.
- ZHOU S X, YANG B. A new algorithm for reactive power optimization-genetic algorithms [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(11): 19-23.
- [16] 马晋骏, 杨以涵. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 1995(5): 347-353.
- MA J T, YANG Y H. Application of genetic algorithms in reactive power optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 1995(5): 347-353.
- [17] 陈皓勇, 王锡凡. 电力系统无功优化的退火选择遗传算法 [J]. 中国电力, 1998, 31(2): 3-6.
- CHEN H Y, WANG X F. A genetic algorithm with annealing selection for reactive power optimization [J]. Electric Power, 1998, 31(2): 3-6.
- [18] 秦绪忠, 江亿. 基于遗传算法的环形供热网可及性分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(6): 1-95.
- QIN X Z, JIANG Y. Accessibility analysis of district heating loop-networks based on genetic algorithms [J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 1999, 39(6): 1-95.
- [19] 胡学芹. 基于遗传算法的集中供热网热量分配的研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012.
- [20] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence [M]. Oxford: U Michigan Press, 1975.
- [21] 熊信银, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2002.
- (责任编辑 郑文棠)