

基于时间序列与耦合分析的区域综合能源系统 多能潮流计算方法

方 鑫,袁晓冬,杨景刚,孙天奎

(国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院,南京 210007)

Multi-energy power flow calculation method for regional integrated energy system based on time series and coupling analysis

FANG Xin, YUAN Xiaodong, YANG Jinggang, SUN Tiankui

(Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210007, China)

摘要:由于区域综合能源系统中存在电、热等难以耦合分析的多种能源潮流,提出基于时间序列与耦合分析的区域综合能源系统多能潮流计算方法。首先,利用时间序列分析该系统的调频特性,获取该系统的运行频率,并构建区域综合能源系统稳态网络模型。然后,分别计算电力系统与热力系统潮流,并通过电热耦合分析,得到该系统多能潮流计算结果。最后经验证:该方法可以精确计算热力系统中不同管道的供热温度与回热温度,还能够计算得出电力系统运行时的电压、有功功率与无功功率,实现较为全面的多能潮流计算。

关键词:时间序列;耦合分析;多能潮流;电热耦合

Abstract: Due to the existence of power and thermal energy in regional integrated energy system, it is difficult to couple and analyze multiple energy flows. A multi-energy flow calculation method of regional integrated energy system based on time series and coupling analysis is proposed. Firstly, the frequency modulation characteristics of the system are analyzed by using time series to obtain the operation frequency of the system. Steady-state network model of regional integrated energy system is constructed. Secondly, power flow of power system and thermal system is calculated respectively and through electrothermal coupling analysis, multi-energy power flow calculation results of the system are obtained. Finally, experimental results show that this method can accurately calculate the heating temperature and regenerative temperature of different pipelines in the thermal system, and can also calculate the voltage, active power and reactive power during the operation of the power system, so as to realize a more comprehensive multi-energy power flow calculation.

Key words: time series; coupling analysis; multi-energy power flow; electric and thermal coupling

0 引言

由于能源转换设备应用范围的逐渐扩张,较多能源系统开始通过耦合实现互相连接^[1-2]。区域综合能源系统能够集中电力系统与热力系统的耦合系统,通过多能源耦合,改善能源的利用率^[3-4],在系统的运行过程中,可以合理协调各种类别的能源,还能够对能源进行转化、存储与分配。

在传统能源系统中,电、热系统的潮流计算往往效果较差,为此,构建合理的潮流计算方法,可以分析多种能源的潮流。有较多学者对此进行研究,文献[5]研究通过电气结合情况下的潮流计算。以经济性最优为目标建立电-气互联综合能源系统最优多能潮流模型;考虑交流潮流约束与气压气流约

束,利用二阶锥松弛转换模型为综合能源系统最优能流凸优化模型;基于自适应步长交替方向乘子法实现能源系统最优能流计算。但该方法仅针对最优能源的潮流进行计算,对于多种能源问题分析并不完善;文献[6]研究电动汽车中的多能源情况的潮流计算。考虑充电负荷的随机性和波动性,通过蒙特卡洛抽样法建立电气/热网络和耦合元件模型;分析发电机阀点效应下机组负荷效应和节点平衡性,实现综合能源系统概率潮流计算。但该方法并未考虑接入大电网时的潮流变化情况,且未分析存在热力系统时的潮流变化情况。

为此,本文研究基于时间序列与耦合分析的区域综合能源系统多能潮流计算方法,利用时间序列与多种能源耦合分析实现潮流计算。实验结果证明本文方法的优势在于可有效计算不同耦合电网系统中的潮流,且计算结果较为精准,计算效

收稿日期:2023-05-10;修回日期:2023-06-02

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2021095)

率较高。

1 区域综合能源系统多能潮流计算

1.1 基于时间序列线性大数据的区域综合能源系统调频特征分析

在区域综合能源系统中,频率是评价电能质量的关键指标之一。因此,分析系统的调频特征,可以为潮流计算提供有利依据。区域综合能源系统发电机组与负荷大数据较多,难以从海量大数据中挖掘系统调频特征。为了获得系统的调频特征,本文利用大数据技术中的时间序列线性分析将系统大数据按照时间线性关系排列处理,计算特性曲线的斜率,获得频率变化量,进一步通过分析获取区域综合能源系统的调频特征。

通常情况下,若系统频率出现变化,发电机输出功率也会改变^[7-9]。因此,通过调速器,修改原电机的输入,改变发电机的出力情况。

假设发电机组的额定频率为 f_M ,并设其有功功率为 Q_k ;若区域综合能源系统的频率下调至 f_a ,此时通过调速器,修改出力为 Q_{ka} ,利用式(1)可以计算其特性曲线的斜率

$$G_k = -\Delta Q_k / (\Delta f_k Q_{ka}) \quad (1)$$

式中: Δf_k 为发电频率; ΔQ_k 为机组的输出有功增量。

可将部分线路损耗作为负荷中的一部分,同时可以将区域综合能源系统内的发电机组与负荷进行简化。因此,可进行系统的调频,当实现调频后,系统的频率变化量需满足式(2)

$$\Delta f = f_B - f_M < 0 \quad (2)$$

式中: f_B 为区域综合能源系统频率的延迟算子; f_M 为频率的梯度算子。

若区域综合能源系统中的实际变化量为负值,则可通过式(3)表示该系统负荷功率的实际变化量

$$\Delta Q_{k0} + \Delta Q_K = \Delta Q_{k0} + G_K \Delta f \quad (3)$$

当区域综合能源系统实现调频后,与调频前相比,系统的发电机功率 ΔQ_K 与实际负荷功率变化量 $G_K \Delta f$ 完全一致,由此,可依据式(3),得出

$$\Delta Q_{k0} = \Delta Q_{ka} - \Delta Q_K = -G_s \Delta f \quad (4)$$

式中: Δf 为频率变化量; G_s 为区域综合能源系统的功率,即当系统负荷 ΔQ_{k0} 出现改变时,利用调速器,系统的频率改变情况。通过以上计算可知,当 G_s 数值增大,负荷扰动对系统频率造成的影响会逐渐下降,表示系统频率越稳定。

由此获取区域综合能源系统的调频特征,依据

该结果,可构建区域综合能源系统潮流模型。

1.2 区域综合能源系统稳态网络模型设计

本文构建的区域综合能源系统主要通过电力系统、热力系统以及电热耦合元件构成。在本文系统中,电力系统通过燃气轮机组、热电联产(combined heat and power,CHP)机组等设备完成供电^[10],当处于并网运行时,通过大电网供电;而热力系统采用CHP机组、电热锅炉等设备供热。

1.2.1 区域电力系统模型设计

可以通过交流潮流模型搭建电力系统模型,其属于一个非线性模型,通过式(5)表示系统内各节点功率平衡情况

$$\begin{cases} \max G_s \\ P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ \Delta P_i = P_i^* - P_i \\ \Delta Q_i = Q_i^* - Q_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为线路消耗的有功、无功功率; θ_{ij} 为电压相角差; U_i 为节点*i*的电压幅值; P_i^* 、 Q_i^* 分别为机组发生的有功、无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵第*i*行、第*j*列元素的实部与虚部。

1.2.2 区域热力系统模型设计

在构建热力系统模型时,主要分为热力、水力模型。在水力模型中,主要阐述了管网内管道压降与质流量的关联^[11-12]。通过式(6)表示水力模型

$$\begin{cases} \max G_s \\ A_{IH} m_H = m_q \\ R_H h_f = 0 \\ h_f = K_H |m_H| m_H \end{cases} \quad (6)$$

式中: A_{IH} 为降阶节点-支路关联矩阵; R_H 为环路-支路关联矩阵; m_H 为管道质流量; m_q 为源节点与负荷节点内注入质流量; h_f 为管道压力损失; K_H 为管道阻力系数,该值与管道内径、粗糙度以及长度等参数存在关联; $|m_H|$ 为元素的绝对值。

在热力模型中,主要阐述了系统中每个节点供水、出水以及回水流量与水温的关系。供水、出水以及回水温度分别由 W_s 、 W_o 、 W_r 表示。开始供水时,通过式(7)的第一个公式计算负荷节点的热功率;当管道中流入热水,会出现部分热力损失,该损失可通过式(7)的第二个公式计算;当大量管道热水流入同一节点时,通过每个管道的热水温度与流量可以确定该节点的温度,即采用式(7)中的第三个公式计算

$$\begin{cases} \Phi = m_q C_p (W_s - W_o) \\ W_{\text{end}} = (W_{\text{start}} - W_a) e^{-\frac{\lambda L_H}{C_p P^{\text{eff}}}} + W_a \\ \sum_{j \in i} m_j W_i = \sum_{j \in i} m_j W_{j,\text{end}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P^{eff} 为电出力系数; H 为环路和支路的关联系数; Φ 为节点功率; C_p 为水的比热容; W_s 、 W_o 分别为节点的供水、回水温度; W_{start} 、 W_{end} 分别为某一管道起始节点、末节点水温; λ 为该管道长度下的总传热系数; W_a 为外围环境温度; L_H 为管道长度; m_j 为节点 i 与相连管道 j 之间的质流量; 热水混合后, W_i 为混合节点 i 的温度; $W_{j,\text{end}}$ 为管道 j 末端温度。

1.2.3 电热耦合元件建模

利用电热耦合元件实现电力、热力系统之间的耦合^[13-15]。电热耦合的核心单元即为CHP, 在进行供电时, 利用余热传输热能, 完成能量的重复使用, 提高能源利用率。CHP的耦合模型为式(8)所示

$$P_{\text{CHP}} = a\Phi_{\text{CHP}} + bW_{ss} + d \quad (8)$$

式中: Φ_{CHP} 为CHP的热出力; P_{CHP} 为电出力; a 、 b 、 d 为CHP常数。

采用往复内燃机与燃气轮机时, CHP内的热电比维持原状, 属于定热电比机组; 当采用抽气式汽轮机组时, 由于冷凝情况不同, 会导致热电比发生改变, 成为变热点比机组。由此, 分析定热点比机组中, 热、电出力之间的关联, 如式(9)所示

$$C_m = \Phi_{\text{CHP}} / P_{\text{CHP}} \quad (9)$$

同时, 可将变热电机组中, 产电与产热之间的关联通过式(10)表示

$$V = \frac{\Delta\Phi_{\text{CHP}}}{\Delta P_{\text{CHP}}} = \Phi_{\text{CHP}} (P_{\text{con}} - P_{\text{CHP}}) \quad (10)$$

式中: $\Delta\Phi_{\text{CHP}}$ 为热出力的增量; ΔP_{CHP} 为电出力的减量; P_{con} 为当处于全冷凝情况时 CHP 的电出力; V 为电出力转换量与热出力改变量的比率, 其值属于可调值。

1.3 区域综合能源系统多能潮流求解

由于区域综合能源系统潮流模型^[16]存在非线性特点, 常用算法求解模型容易因非线性关系, 降低收敛性能, 因此, 本文创新性地通过牛顿—拉夫逊法对该模型潮流进行求解。该方法的收敛性能较高, 是当前应用较广的潮流计算方法。并采用修正方程重复迭代获得最优结果。为防止出现雅克比矩阵维数增大现象, 增加计算难度, 创新性地通过电热顺序法, 求解电热耦合节点的潮流。

1.3.1 热力—水力联合潮流求解

通过牛顿—拉夫逊法, 计算热力、水力模型, 并

得出热力系统修正结果, 如式(11)—式(13)所示

$$\mathbf{F}_h(X^{(i)}) = -\mathbf{J}_h^{(i)} \Delta X^{(i)} \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_h = \begin{bmatrix} c_p A m (W_s - W_o) - \Phi^{\text{sp}} & BKm[m] \\ \mathbf{C}_s W_s' - b_s & \mathbf{C}_r W_r' - b_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{J}_h = \begin{bmatrix} \frac{\partial[\Delta\Phi; \Delta h]}{\partial m} & \frac{\partial[\Delta\Phi; \Delta h]}{\partial W_s'} & \frac{\partial[\Delta\Phi; \Delta h]}{\partial W_r'} \\ \frac{\Delta W_s'}{\partial m} & \frac{\Delta W_s'}{\partial W_s'} & \frac{\Delta W_s'}{\partial W_r'} \\ \frac{\Delta W_r'}{\partial m} & \frac{\Delta W_r'}{\partial W_s'} & \frac{\Delta W_r'}{\partial W_r'} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: i 为迭代次数; \mathbf{J}_h 为雅克比矩阵; \mathbf{F}_h 为误差向量; W_s' 、 W_r' 分别为 W_s 、 W_r 与环境温度之间的差向量; Φ^{sp} 为已设定的热负荷向量; \mathbf{C}_s 、 \mathbf{C}_r 为系数矩阵; b_s 、 b_r 为解向量。

赋予热力系统中的自变量 m 、 W_s 、 W_r 初始值, 并采用修正方程重复迭代直到结果满足收敛要求, 即实现热力系统潮流的求解。

1.3.2 电力系统潮流求解

在求解电力系统潮流时, 本文依旧通过牛顿—拉夫逊法^[17], 通过电力潮流模型, 获取系统修正方程, 并通过式(14)—式(15)表示

$$\mathbf{F}_e(X^{(i)}) = -\mathbf{J}_e^{(i)} \Delta X^{(i)} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(i)} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta^{(i)}} & \frac{\partial P}{\partial U^{(i)}} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta^{(i)}} & \frac{\partial Q}{\partial U^{(i)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(i)} \\ \Delta U^{(i)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: \mathbf{J}_e 为雅克比矩阵; \mathbf{F}_e 为误差; ΔP 、 ΔQ 分别为有功、无功功率的偏差; $\Delta \delta$ 、 ΔU 分别为电压相角与幅值的偏差。

向电力系统自变量 δ 、 U 赋予初始值, 并通过修正方程进行迭代计算直至完成收敛, 实现电力系统潮流求解。

在以上针对潮流计算的基础上, 为防止出现雅克比矩阵维数增大现象, 导致计算变得复杂, 本文通过顺序法, 对电热耦合潮流进行求解。通过电热顺序求解算法, 计算 2 个 CHP 耦合节点的潮流。通过图 1 表示 2 个 CHP 耦合节点的潮流计算过程。

在图 1 中, CHP1、CHP2 依次表示电、热平衡。向 CHP1 热出力赋初值, 并计算得到热出力值, 以此为基础, 通过式(9)计算得到 CHP2 的电出力, 通过该结果计算得到 CHP1 的电、热出力, 对 CHP1 热出力误差进行反复迭代, 直至达到收敛, 得出电热联合潮流。

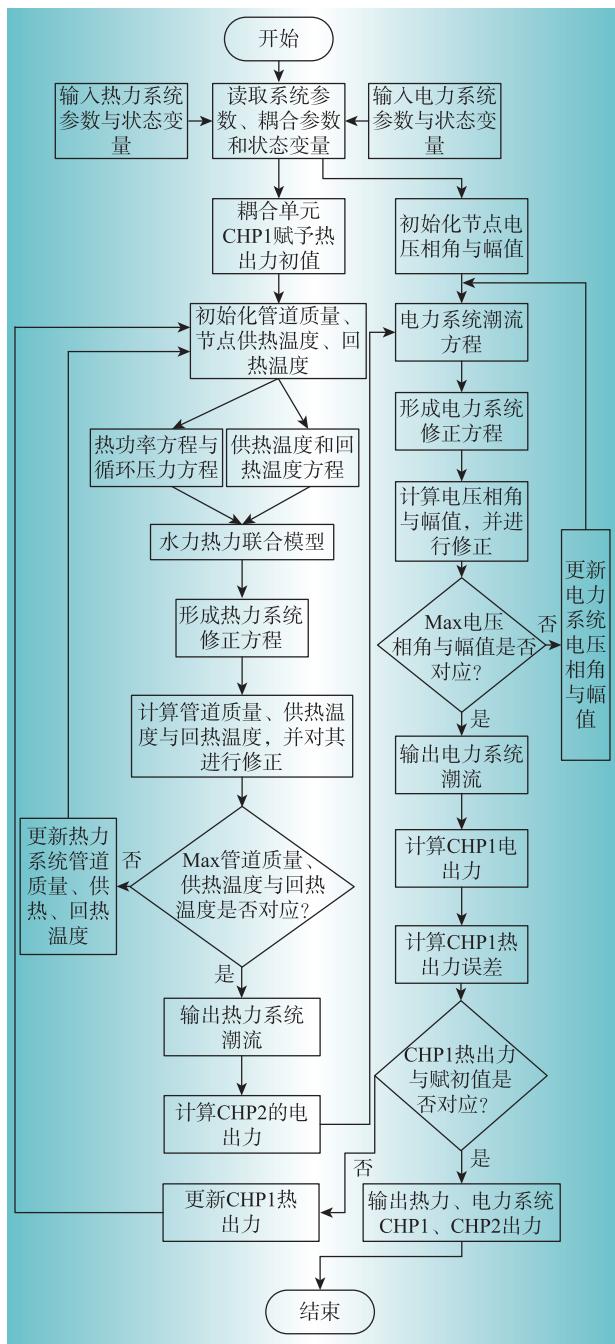


图1 电热联合潮流计算

Fig. 1 Calculation of electric heating combined power flow

2 实验分析

本文构建实验系统中,电力系统通过IEEE33节点搭建,而热力系统通过32节点单环路构建,热力、电力网络构成本文系统。同时,对该系统设置两种模式,一种为并网模式,该模式电力系统中的平衡节点直接与大电网连接;另一种为孤岛模式,该模式并不连接大电网,相较于第一种模式增加了大量的耦合设备与节点,对这两种模式进行详细实验分析。

应用本文方法计算热力系统管网潮流,分析不同管道下的管道供热温度与回热温度变化,并针对不同系统模式进行详细分析,分析结果如表1所示。

表1 热力系统管网潮流计算

Table 1 Calculation of power flow in thermal system pipeline network

管道编号	供热温度		回热温度	
	并网模式	孤岛模式	并网模式	孤岛模式
1	70.0	70.0	29.5	29.5
2	69.7	69.1	29.6	29.4
3	69.2	68.6	29.4	29.4
4	68.8	68.2	29.5	29.6
5	68.6	68.1	29.6	29.6
6	68.7	68.7	29.7	29.8
7	69.2	67.9	29.6	29.6
8	69.6	68.5	29.8	29.7
9	69.8	69.3	29.6	29.6
10	70.0	70.0	29.8	29.8

根据表1可知,通过本文方法,可有效计算各个管道下两种模式的供热温度与回热温度,经计算可以看出,并网模式下每条管道的供热温度要略高于孤岛模式,而回热温度在两种模式下并未存在较大差距,因此,本文方法所计算得到的供热与回热温度十分清晰。

对电力系统运行过程中的潮流进行计算,分析在不同母线节点下,两种运行模式的电压变化情况,分析结果如图2所示。

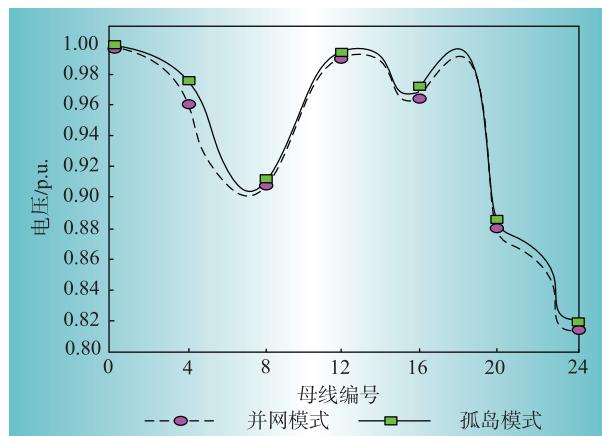


图2 节点电压变化情况分析

Fig. 2 Analysis of node voltage changes

根据图2可知,在不同母线编号下,两种模式运行时的电压变化幅度也随之波动,但是,两种模式运行时的电压变化情况十分接近,说明电网系统的电压并未受到是否与大电网连接的影响,在初始母线上,两种运行模式的电压均为1.0 p.u.,当处于24号母线时,两者的电压均下降至0.80~0.82 p.u.之间。

应用本文方法计算两种运行模式下电力系统中不同支路的有功功率与无功功率变化情况,分析结果如图3所示。

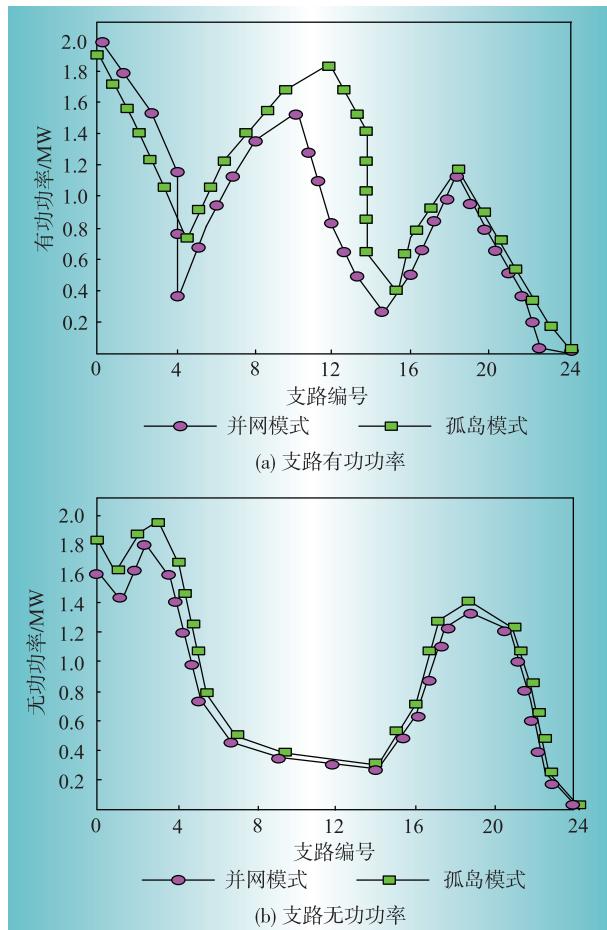


图3 有功、无功功率变化情况分析

Fig. 3 Analysis of changes in active and reactive power

根据图3可以看出,两种模式下的有功功率与无功功率均呈现波动趋势,而孤岛模式的有功、无功功率要略高于并网模式,说明在不接入大电网情况下,有功功率与无功功率相对高一些,但并未出现较大差距,应用本文方法,可有效计算电网系统中的潮流,且计算结果较为精准。

应用文献[5]方法和文献[6]方法同样计算节点复杂的孤岛模式下电力系统中不同支路的有功功率变化情况,比较3种方法的计算效率,如图4所示。

由图4可知,本文方法的计算时间小于1.2 ms,而其他方法的计算时间较高,说明本文方法的计算效率较高。这是引文本文方法应用的牛顿—拉夫逊法简化了计算过程,提高了计算效率。

3 结束语

本文研究基于时间序列与耦合分析的区域综合能

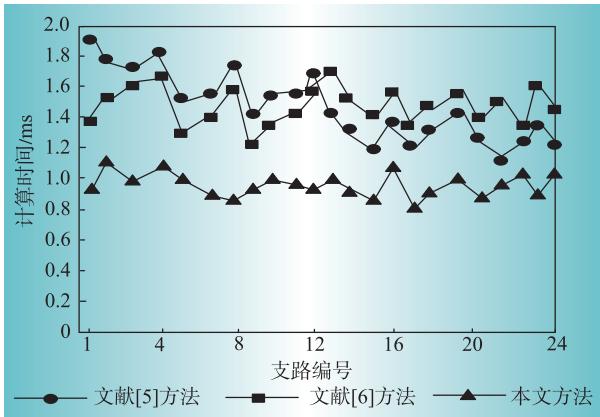


图4 计算效率对比

Fig. 4 Calculation of efficiency comparison

源系统多能潮流计算方法,依据区域综合能源系统的时间序列变化情况,构建热力与电力模型以及两者的耦合形式,并对其潮流进行求解,获取最佳区域综合能源系统潮流,利用该计算方法,通过详细的实验验证其计算性能,得到精确的热力系统、电力系统潮流。D

参考文献:

- [1] 施云辉,郭创新. 基于分散协同多阶段鲁棒调度的电热联合系统灵活性增强方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6):10-19.
SHI Yunhui, GUO Chuangxin. Flexibility reinforcement method for integrated electricity and heat system based on decentralized and coordinated multi-stage robust dispatching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6):10-19.
- [2] 吕忠麟,顾洁,孟璐. 基于耦合特征与多任务学习的综合能源系统短期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11):58-66.
LYU Zhonglin, GU Jie, MENG Lu. Short-term load forecasting for integrated energy system based on coupling features and multi-task learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11):58-66.
- [3] 张亚超,谢仕炜,朱蜀. 多区域互联电-气耦合系统分散协调分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19):31-42.
ZHANG Yachao, XIE Shiwei, ZHU Shu. Decentralized coordinated distributionally robust optimal scheduling of multi-area interconnected electricity-gas coupling system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19):31-42.
- [4] 杨德昌,王雅宁,李朝霞,等. 基于改进粒子滤波的综合能源系统预测辅助状态估计[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6):172-181.
YANG Dechang, WANG Yaning, LI Zhaoxia, et al. Forecasting-aided state estimation of integrated energy sys-

- tems based on improved particle filter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6):172–181.
- [5] 郑重,苗世洪,赵海彭,等.一种新的电-气互联多区域综合能源系统最优能流计算方法[J].电力建设,2021,42(11):117–124.
ZHENG Zhong, MIAO Shihong, ZHAO Haipeng, et al. A new calculation method for optimal energy flow of multi-regional electricity-gas integrated energy system [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11):117–124.
- [6] 葛维春,梁毅,潘霄,等.计及电动汽车的综合能源系统概率潮流计算[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2020,39(3):265–272.
GE Weichun, LIANG Yi, PAN Xiao, et al. Probabilistic power flow calculation of integrated energy system considering electric vehicles [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2020, 39 (3):265–272.
- [7] 田浩含,张智晟,于道林.基于改进LSTM的区域综合能源系统多元负荷短期预测研究[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(9):130–137.
TIAN Haohan, ZHANG Zhisheng, YU Daolin. Research on multi-load short-term forecasting of regional integrated energy system based on improved LSTM [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(9):130–137.
- [8] 齐亮,王越.考虑运行可靠性的电力系统辅助调频控制[J].电力系统自动化,2022,46(8):86–94.
QI Liang, WANG Yue. Auxiliary frequency regulation control of power system considering operational reliability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (8):86–94.
- [9] 吕振华,李强,韩华春,等.区域综合能源系统双层多目标模糊优化模型预测控制方法[J].电力建设,2020,41(12):121–130.
LYU Zhenhua, LI Qiang, HAN Chunhua, et al. Model predictive control method of bi-level multi-objective fuzzy optimization for regional integrated energy system [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12):121–130.
- [10] 黎晨阳,张沈习,程浩忠,等.计及相关性的电-气互联区域综合能源系统概率多能流计算[J].电力系统自动化,2020,44(21):42–49.
LI Chenyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Correlation-based probabilistic multi-energy flow calculation of regional integrated energy system with combined electricity and natural gas [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21):42–49.
- [11] 范宏,袁倩倩,邓剑.多区域综合能源系统的两阶段容量优化配置方法[J].现代电力,2020,37(5):441–449.
FAN Hong, YUAN Qianqian, DENG Jian. A two-stage optimal capacity configuration of multi-region integrated energy system [J]. Modern Electric Power, 2020, 37 (5):441–449.
- [12] 郁嘉嘉,肖勇,陆文升,等.基于复杂网络理论的区域综合能源系统可靠性评估[J].电力建设,2020,41(4):1–9.
HUAN Jiajia, XIAO Yong, LU Wensheng, et al. Reliability evaluation method for regional integrated energy system applying complex network theory [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4):1–9.
- [13] 潘华,梁作放,肖雨涵,等.多场景下区域综合能源系统的优化运行[J].太阳能学报,2021,42(1):484–492.
PAN Hua, LIANG Zuofang, XIAO Yuhan, et al. Optimal operation of regional integrated energy system under multiple scenes [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42 (1):484–492.
- [14] 高鹏飞,周孝信,杨小煜,等.计及异质气体混合的电-气-热综合能源系统能量流计算方法[J].电网技术,2021,45(7):2 523–2 533.
GAO Pengfei, ZHOU Xiaoxin, YANG Xiaoyu, et al. Energy flow calculation of integrated electricity, natural gas and heating systems considering mixtures of gas with alternative qualities [J]. Power System Technology, 2021, 45(7):2 523–2 533.
- [15] 魏齐鸣,杨太华,高余奇.基于混合潮流算法的多能源互补调度仿真研究[J].计算机仿真,2021,38(11):77–81.
WEI Qiming, YANG Taihua, GAO Yuqi. Simulation research on multi-energy complementary dispatch based on hybrid power flow algorithm [J]. Computer Simulation, 2021, 38(11):77–81.
- [16] 张全明,高强,叶丽娜,等.基于“两网”融合的海岛能源互联网规划研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(3):118–125.
ZHANG Quanming, GAO Qiang, YE Lina, et al. Study on island energy Internet planning based on two networks integration [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3):118–125.
- [17] 蔡晖,陈倩,刘宇,等.苏州同里新能源小镇的交/直流混合配电网潮流计算方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(2):110–115.
CAI Hui, CHEN Qian, LIU Yu, et al. Study on power flow calculation method for AC/DC hybrid distribution network of Tongli new-energy town in Suzhou [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41 (2):110–115.

作者简介:

方鑫(1987),男,通信作者,山西大同人,硕士,高级工程师,研究方向为有源配电网;

袁晓冬(1979),男,江苏无锡人,硕士,高级工程师,研究方向为综合能源、有源配电网;

杨景刚(1981),男,江苏南通人,硕士,高级工程师,研究方向为综合能源、有源配电网。

(责任编辑 于丽芳)