

电-气互联综合能源系统无功电压优化控制方法

王雨薇¹,王静¹,王勇¹,楚云飞¹,李博强¹,李曙光²

(1. 国网吉林省电力有限公司 经济技术研究院,吉林 长春 130022;

2. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要:针对电-气互联综合能源系统的电压波动问题,考虑新能源机组与耦合元件的无功支撑能力,提出了一种电-气互联综合能源系统无功电压优化控制方法。首先,在分析了电-气互联系统组成和结构的基础上,建立电-气互联综合能源系统模型,然后,计及电网、气网和耦合元件约束以系统综合成本和电压偏差为优化目标,建立电-气互联综合能源系统无功电压优化模型,采用二阶锥松弛技术将所建无功电压优化模型转化为混合整数凸优化问题进行求解。最后在IEEE33节点电网与7节点天然气网耦合形成的IEGS33-7系统中进行仿真,结果表明:考虑新能源机组与耦合元件的无功支撑能力可以显著减少系统综合成本并改善系统电压波动情况。

关键词:电-气互联综合能源系统;光伏发电;燃气轮机无功支撑;无功电压优化

中图分类号:TM73;TK01 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26373

Reactive Power and Voltage Optimization Control Method for Integrated Electricity-Gas System

WANG Yuwei¹, WANG Jing¹, WANG Yong¹, CHU Yunfei¹, LI Boqiang¹, LI Shuguang²

(1. Institute of Economics and Technology, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130022, Jilin, China; 2. School of Electric Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China)

Abstract: Aiming at the voltage fluctuation problem in the integrated electricity-gas system (IEGS) and considering the reactive power support capability of new energy units and coupling elements, a reactive power and voltage optimization control method for the IEGS was proposed. First, based on the analysis of the composition and structure of the IEGS, a model of the IEGS was established. Then, taking into account the constraints of the power grid, gas network, and coupling elements, with the comprehensive system cost and voltage deviation as optimization objectives, a reactive power and voltage optimization model for the IEGS was developed. The second-order cone relaxation technique was used to transform the established reactive power and voltage optimization model into a mixed-integer convex optimization problem for solution. Finally, simulations were conducted on the IEGS33-7 system, formed by coupling the IEEE33-node power grid with a 7-node natural gas network. The results show that considering the reactive power support capability of new energy units and coupling elements can significantly reduce the comprehensive system cost and improve voltage fluctuations.

Key words: integrated electricity-gas system (IEGS); photovoltaic power generation; reactive power support of gas turbines; reactive power and voltage optimization

近年来,由于化石燃料的枯竭及其带来的环境问题,风电和光伏等可再生能源正逐渐成为我国能源供给的主体^[1-2]。风电和光伏机组是电力系统中重要的可再生能源,但其波动性较大,具有显著的不确定性^[3]。由于不确定性和电网运行约束,风电会出现弃风现象^[4];如何提高新能源消纳能力成为研究热点^[5-6],电制气(power to gas,

P2G)设备消耗电能,可以重塑电力系统的负荷曲线;产生的天然气可以在气体传输网络中存储和利用^[7],增强电力和天然气综合系统的灵活性^[8],因此,P2G技术引起了人们的广泛关注。另一方面,随着能源互联网战略和绿色能源转型的不断推进^[9],能够实现多种能源互补的电-气互联综合能源系统(integrated electricity-gas system, IEGS)

基金项目:国网吉林省电力有限公司软科学课题(SCJLJY00ZLWT2400032)

作者简介:王雨薇(1994—),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向为企业发展战略、政策分析等,Email:yuweiwncepu@163.com

发展迅速^[10]。

目前,IEGS的研究主要集中在经济调度、协调优化和扩展规划等领域。文献[11]建立了一个多能流计算模型,以实现IEGS的协调运行。文献[12]在考虑P2G运行成本的基础上,同时分析其对综合能源系统风电接纳能力与系统运行经济性的影响,提出一种多目标优化调度模型;文献[13]提出了P2G的碳交易市场激励机制,进而建立IEGS经济调度模型,研究表明P2G技术在实现低碳转型和提升可再生能源利用效率方面的重要作用。文献[14]考虑到分布式调度节点功率受限特性,提出了一种基于同态加密的完全一致性低碳经济调度方法。但是,上述文献多以系统运行经济性为优化目标建立直流潮流模型,未考虑电网的电流与电压约束及新能源机组的无功出力对电力系统电压的影响,由于电力系统新能源占比的不断提高,其不确定性与潮流的双向流动显著增加了电力系统的无功电压优化的难度和复杂度。

无功优化问题是一个高维、非线性的问题,目前主要包括无功电源特性研究、无功补偿技术以及无功需求响应等研究方向^[15-16]。文献[17]通过调整变压器的抽头位置和无功补偿设备来对多电压等级的城市电网进行静态和动态无功补偿;文献[18]则是在考虑分布式电源的有功和无功功率出力上下限约束的基础上,采用最优分割法确定有载调压变压器与电容器组的动作时刻及档位,结合分布式发电(distributed generation, DG)无功出力进行联合优化,实现配电网的动态无功优化;文献[19]提出一种计及分布式电源并网逆变器无功输出的优化策略,获得分布式电源并网逆变器最优的无功输出;文献[20]分析分布式光伏及负荷日前预测误差对电压的影响机理,提出了一种多时间尺度分布式有功-无功协同优化方法。但是,上述文献多以额外的无功补偿和新能源的无功出力为主,实际上,燃气轮机将电力系统和天然气系统进行连接,能在电力系统中贡献一定的无功功率^[21-23]。

本文提出了一种电-气互联综合能源系统无功电压优化控制方法。首先,构建了一个包含P2G、燃气轮机、风电、光伏和压缩机的电-气综合能源系统框架,该框架充分考虑了新能源与耦合元件的无功出力,并提出了具体的线性化方法。其次,考虑到电力系统和天然气系统的相关运行

约束,建立以电力系统电压偏差和系统综合成本最小化为目标的优化调度模型,利用二阶锥松弛技术对所构建的模型进行凸化处理,然后使用商业求解器CPLEX进行求解。最后,通过对IEGS33-7系统进行分析,验证了新能源机组和耦合元件的无功支撑对于电力系统无功电压优化方面的效果。

1 IEGS建模

IEGS主要由电力系统、天然气系统、燃气轮机和P2G等耦合设备连接而成。P2G在负荷不能完全消纳风电、光伏时充当用电负荷,将风电、光伏剩余出力转换为氢气进一步转换为天然气进行存储,燃气轮机在负荷高峰时充当电源消耗天然气发出电能供给负荷使用,P2G与燃气轮机使电力系统与天然气系统的耦合更紧密。IEGS框架如图1所示。

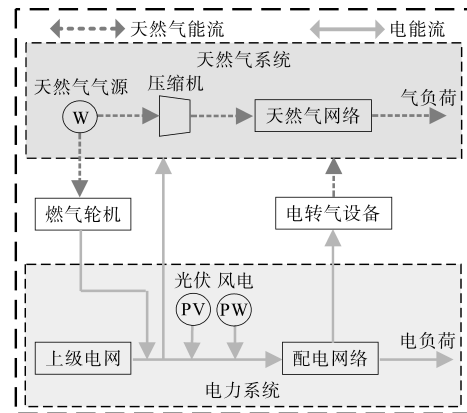


图1 电-气互联系统组成及架构

Fig.1 Structure of integrated electricity-gas system

1.1 电力系统模型

本文研究对象为IEGS,采用的电网为配电网,建立节点有功、无功方程为

$$\begin{cases} P_{j,t} = \sum_{kj \rightarrow p} P_{jp,t} - (P_{ij,t} - I_{ij,t}^2 r_{ij}) \\ Q_{j,t} = \sum_{kj \rightarrow p} Q_{jp,t} - (Q_{ij,t} - I_{ij,t}^2 x_{ij}) \\ U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 \\ I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{i,t}^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ 分别为 t 时刻 j 节点的有功、无功注入功率; $P_{jp,t}$ 、 $Q_{jp,t}$ 分别为 t 时刻流过支路 jp 的有功和无功功率的大小; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻由 i 节点流向 j 节点的有功和无功功率的大小; $I_{ij,t}$ 为 t 时刻流过支路 ij 的电流; r_{ij} 为支路 ij 的电阻; x_{ij} 为支路 ij

的电抗; $U_{i,t}, U_{j,t}$ 分别为 t 时刻 i, j 节点电压的幅值。

为保证电力系统的安全运行,需满足以下约束条件。

1)支路电流约束:

$$|I_{ij,t}| \leq I_{ij,\max} \quad (2)$$

式中: $I_{ij,\max}$ 为流过支路 ij 电流的最大值。

2)节点电压约束:

$$U_{j,\min} \leq U_{j,t} \leq U_{j,\max} \quad (3)$$

式中: $U_{j,\min}, U_{j,\max}$ 分别为 j 节点电压的最小值和最大值。

1.2 天然气系统模型

天然气管道内的气流量由管道两端的气压差和管道的具体参数共同决定。根据 Weymouth 方程,天然气管道的气流量可表示为

$$W_{mn,t} = F_{mn} C_{mn} \sqrt{|\pi_{m,t}^2 - \pi_{n,t}^2|} \quad (4)$$

其中

$$F_{mn} = \begin{cases} 1 & \pi_{m,t} > \pi_{n,t} \\ -1 & \pi_{m,t} < \pi_{n,t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $W_{mn,t}$ 为 t 时刻管道 mn 的气体流量; F_{mn} 为天然气管道的方向参数,当 m 节点气压大于 n 节点时取1,反之则为-1; C_{mn} 为天然气管道的方程参数,该参数由管道长度、直径、摩擦力和温度等因素共同决定; $\pi_{m,t}, \pi_{n,t}$ 分别为 t 时刻 m 节点和 n 节点的气压。

图2为天然气管道模型。

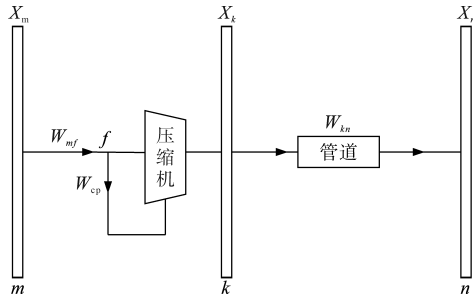


图2 天然气管道模型

Fig.2 Natural gas pipeline model

天然气管道压缩机的能耗及管道入口处天然气流量表达式为

$$W_{cp,t} = k_{cp} W_{kn,t} T_{k,t} \left[\left(\frac{\pi_{m,t}}{\pi_{k,t}} \right)^{Z_H} - 1 \right] \quad (6)$$

$$W_{mf,t} = W_{kn,t} + W_{cp,t} \quad (7)$$

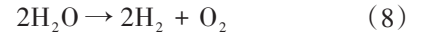
式中: $W_{cp,t}, W_{mf,t}, W_{kn,t}$ 分别为 t 时刻压缩机的能耗、入口和管道处天然气流量; $\pi_{k,t}$ 为 t 时刻 k 节点的气压; k_{cp} 为压缩比; Z_H 为天然气的固有常数; $T_{k,t}$ 为 t 时刻天然气温度。

1.3 耦合元件模型

1.3.1 P2G建模

P2G设备实现了将电能向天然气的转化,根据其两个步骤的化学反应过程可将P2G设备分为电解水装置和甲烷化反应装置两部分。电解水装置通过电能将水进行电解生成氢气,该过程可以提高系统清洁能源消纳能力,甲烷化反应装置将氢气与二氧化碳进行反应生成甲烷。P2G设备在合成甲烷的过程中不仅消耗了大量二氧化碳,有效降低了系统的碳排放,还通过电转气的方式人为地增加了电力系统的负荷,提升了其对可再生能源的消纳能力。

电转氢气利用的是电解水的原理,如下式所示:

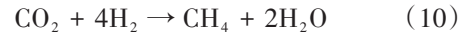


产生的氢气量通过下式计算:

$$M_{H_2,t} = P_{pw,t} \eta_{H_2} / LHV \quad (9)$$

式中: $M_{H_2,t}$ 为 t 时刻电解水过程中产生的氢气; $P_{pw,t}$ 为 t 时刻用于电解水消耗的风电; η_{H_2} 为化学反应的效率,本文取0.7; LHV 为氢气的低热值,本文取 $3.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

由于氢气不易存储且易爆炸,难以实现远距离运输,而天然气具有更高的单位能量密度,更加环保,且更易储存,更适合远距离运输,故将电解水产生的氢气进一步与二氧化碳进行反应,合成天然气,如下式所示:



P2G消耗的电通过下式计算:

$$P_{P2G,j,t} = W_{P2G,j,t} \cdot HGV / \eta_{P2G} \quad (11)$$

式中: $P_{P2G,j,t}$ 为 t 时刻 j 节点P2G设备消耗的电能; $W_{P2G,j,t}$ 为 t 时刻 j 节点P2G设备产生的天然气量; HGV 为天然气的高热值,本文取 $9.88 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; η_{P2G} 为P2G设备的转化效率,本文取0.6。

1.3.2 燃气轮机建模

燃气轮机消耗天然气发出电能,能量转换关系如下式所示:

$$P_{GT,j,t} = \eta_{GT} W_{GT,j,t} \cdot HGV \quad (12)$$

式中: $W_{GT,j,t}$ 为 t 时刻 j 节点燃气轮机消耗的天然气量; η_{GT} 为燃气轮机的转化效率,本文取0.75。

2 IEGS无功电压优化模型

本文通过对多类型新能源机组、耦合元件及负荷进行调节,从而提升新能源机组的消纳水平,提高电压合格率,电-气互联系统无功电压优

化模型如图3所示。

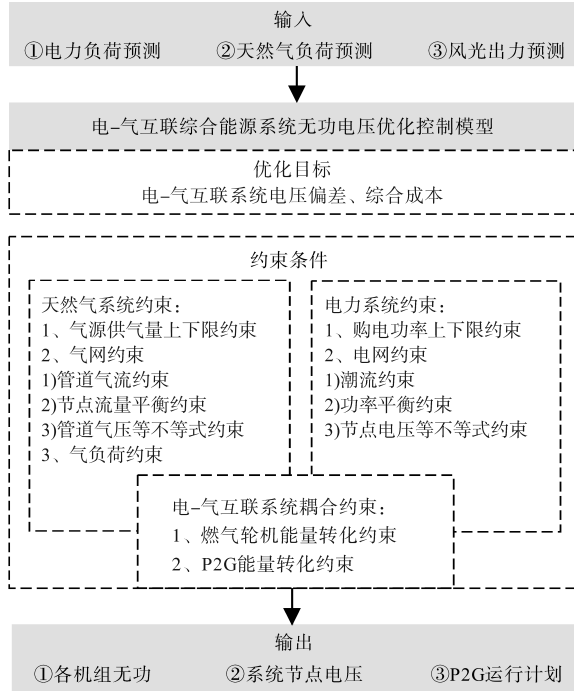


图3 电-气互联系统无功电压优化模型

Fig.3 Reactive voltage optimization model of Integrated electricity-gas system

2.1 目标函数

模型以系统综合成本和电压偏差最小为目标建立系统无功电压优化模型,为了将电压偏差这一技术指标与经济成本这一经济指标相结合,本文引入了一个电压偏差惩罚系数,将原本的多目标优化问题转化为单目标优化问题进行求解。目标函数如下式所示:

$$\min F = \sum_{t=1}^T (f_1 + f_2) \quad (13)$$

式中: f_1 为电压偏差在经济维度的投影; f_2 为系统综合成本。

f_1 和 f_2 的计算公式分别如下:

$$f_1 = \delta_1 \sum_{j \in G_{\text{bus}}} (U_{j,t} - U_1)^2 \quad (14)$$

式中: $U_{j,t}$ 为 t 时刻 j 节点的电压,设1节点的电压幅值为电压基准值,即 $U_1=1.0$ (标么值); δ_1 为电压惩罚系数,用以保证目标函数中各项数值为同一量级。

$$f_2 = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} C_1 = \sum_{t=1}^T P_{e,j,t} F_e \\ C_2 = \sum_{t=1}^T W_{g,m,t} F_g \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} C_3 = \sum_{t=1}^T P_{P2G,j,t} F_{P2G} \\ C_4 = \sum_{t=1}^T P_{GT,j,t} F_{GT} \\ C_5 = \sum_{t=1}^T P_{COM,m,t} F_{COM} \end{cases} \quad (17)$$

式中: C_1, C_2 分别为系统购电、购气成本; C_3, C_4, C_5 分别为P2G、燃气轮机和压缩机的运行成本; F_e 为电能价格; $P_{e,j,t}$ 为 t 时刻 j 节点购电功率; F_g 为天然气价格; $W_{g,m,t}$ 为 t 时刻 m 节点购气量; $P_{GT,j,t}$ 为 t 时刻 j 节点燃气机组的运行功率; F_{GT} 为燃气轮机运行成本,取70元/(MW·h); $P_{P2G,j,t}$ 为 t 时刻 j 节点P2G装置的运行功率; F_{P2G} 为电转气装置的单位运行成本,取800元/(MW·h); $P_{COM,m,t}$ 为 t 时刻 m 节点压缩机运行功率; F_{COM} 为电压压缩机的单位运行成本,取300元/(MW·h)。

2.2 约束条件

IEGS无功电压优化模型约束条件包括电力系统约束、天然气系统约束以及耦合元件运行约束3部分。

2.2.1 电力系统约束

1) 电能平衡约束:

$$\begin{cases} P_{j,t} = P_{e,j,t} + P_{PV,j,t} + P_{PW,j,t} + P_{GT,j,t} - P_{P2G,j,t} - P_{L,j,t} \\ Q_{j,t} = Q_{e,j,t} + Q_{PV,j,t} + Q_{PW,j,t} + Q_{GT,j,t} - Q_{P2G,j,t} - Q_{L,j,t} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{e,j,t}, P_{PV,j,t}, P_{PW,j,t}, P_{GT,j,t}$ 分别为 t 时刻上级电网、光伏机组、风电机组和燃气轮机向 j 节点注入的有功功率; $P_{L,j,t}, P_{P2G,j,t}$ 分别为 t 时刻 j 节点负荷和P2G设备消耗的有功功率; $Q_{e,j,t}, Q_{PV,j,t}, Q_{PW,j,t}, Q_{GT,j,t}$ 分别为 t 时刻上级电网、光伏机组、风电机组和燃气轮机向 j 节点注入的无功功率; $Q_{L,j,t}, Q_{P2G,j,t}$ 分别为 t 时刻 j 节点负荷和P2G设备消耗的无功功率。

2) 光伏有功-无功出力约束。由于光伏机组归属不同的运营商,为了考虑经济效益,规定光伏机组始终运行于最大功率输出模式,只对其无功功率输出进行调节和控制。光伏机组有功-无功出力约束如下式所示:

$$\begin{cases} P_{PV,j,t} = P_{PV,j,t,MPPT} \\ Q_{PV,j,t}^2 + P_{PV,j,t}^2 = S_{PV}^2 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{PV,j,t}, Q_{PV,j,t}$ 分别为 t 时刻光伏机组注入 j 节点的有功功率和无功功率; $P_{PV,j,t,MPPT}$ 为 t 时刻光伏工作在MPPT点的有功功率; S_{PV} 为光伏的装机

容量。

3)风电有功-无功出力约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{PW,j,t} \leq P_{PW,f,t} \\ 0 \leq Q_{PW,j,t} \leq Q_{PW,f,t} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{PW,j,t}$, $Q_{PW,j,t}$ 分别为 t 时刻风电机组注入 j 节点的有功和无功功率; $P_{PW,f,t}$, $Q_{PW,f,t}$ 分别为 t 时刻风电机组有功和无功的预测功率。

4)购电功率约束:

$$0 \leq P_{e,j,t} \leq P_{e,j,\max} \quad (21)$$

式中: $P_{e,j,\max}$ 为购电功率的最大值。

2.2.2 天然气系统约束

1)天然气功率约束:

$$\begin{cases} W_{g,m,t} - W_{load,m,t} - W_{GT,m,t} - \sum_{mn \in B} W_{mn,t} = 0 \\ \forall m \in R, \forall mn \in B \end{cases} \quad (22)$$

式中: $W_{g,m,t}$ 为 t 时刻 m 节点天然气的供给量; $W_{load,m,t}$ 为 t 时刻 m 节点的气负荷量; $W_{GT,m,t}$ 为 t 时刻 m 节点燃气轮机的天然气消耗量; R 为天然气节点集合; B 为天然气管道集合。

2)管道流量约束:

$$W_{mn,\min} \leq W_{mn,t} \leq W_{mn,\max} \quad (23)$$

式中: $W_{mn,\min}$, $W_{mn,\max}$ 分别为管道 mn 气体流量最小值和最大值。

3)节点气压约束:

$$\begin{cases} \pi_{n,\min} \leq \pi_{n,t} \leq \pi_{n,\max} \\ \pi_{m,\min} \leq \pi_{m,t} \leq \pi_{m,\max} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\pi_{n,\min}$, $\pi_{m,\min}$ 分别为 n 节点和 m 节点气体压力的最小值; $\pi_{n,\max}$, $\pi_{m,\max}$ 分别为 n 节点和 m 节点气体压力的最大值。

4)气源出力约束:

$$W_{g,m,\min} \leq W_{g,m,t} \leq W_{g,m,\max} \quad (25)$$

式中: $W_{g,m,t}$ 为 t 时刻气源供气量; $W_{g,m,\max}$ 为气源供气量的最大值; $W_{g,m,\min}$ 为气源供气量的最小值。

5)压缩机约束:

$$k_{cp,\min} \leq k_{cp,t} = \frac{\pi_{m,t}}{\pi_{k,t}} \leq k_{cp,\max} \quad (26)$$

式中: $k_{cp,\min}$, $k_{cp,\max}$ 分别为 t 时刻压缩机出口压力和变比的最小值和最大值。

2.2.3 耦合元件运行约束

1)燃气轮机出力约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{GT,j,t} \leq P_{GT,j,\max} \\ 0 \leq Q_{GT,j,t} \leq Q_{GT,j,\max} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $P_{GT,j,t}$, $Q_{GT,j,t}$ 分别为 t 时刻燃气轮机注入 j 节点的有功和无功功率; $P_{GT,j,\max}$, $Q_{GT,j,\max}$ 分别为燃气

轮机注入 j 节点有功和无功功率的最大值。

2)P2G 机组运行约束:

$$\begin{cases} P_{P2G,j,\min} \leq P_{P2G,j,t} \leq P_{P2G,j,\max} \\ Q_{P2G,j,\min} \leq Q_{P2G,j,t} \leq Q_{P2G,j,\max} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $P_{P2G,j,t}$, $Q_{P2G,j,t}$ 分别为 t 时刻 j 节点 P2G 设备消耗的有功和无功功率; $P_{P2G,j,\max}$, $Q_{P2G,j,\max}$ 分别为 j 节点 P2G 设备消耗有功和无功功率的最大值。

3 混合整数二阶锥规划模型

本文采用二阶锥松弛技术对模型中的非凸问题进行松弛,将本文中建立的电-气互联综合能源系统无功电压优化问题的非凸可行域松弛成一个凸锥可行域,进而将该优化问题转换为一个混合整数二阶锥规划模型,以提高求解速率,简化求解过程。模型中的非线性主要体现在式(1)、式(4)、式(14)。

本文分别引入支路电流与其平方、节点电压幅值与其平方的等式关系,建立新的变量 $l_{ij,t} = I_{ij,t}^2$, $u_{j,t} = U_{j,t}^2$, 此时式(1)将转化为

$$\begin{cases} P_{j,t} = \sum_{kj \rightarrow p} P_{jp,t} - (P_{ij,t} - l_{ij,t} r_{ij}) \\ Q_{j,t} = \sum_{kj \rightarrow p} Q_{jp,t} - (Q_{ij,t} - l_{ij,t} x_{ij}) \\ u_{j,t} = u_{i,t} - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij,t} \\ l_{ij,t} = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{u_{i,t}} \end{cases} \quad (29)$$

对其进行二阶锥松弛转化,具体过程为

$$l_{ij,t} \geq \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{u_{i,t}} \quad (30)$$

$$(l_{ij,t} + u_{i,t})^2 - (l_{ij,t} - u_{i,t})^2 \geq 4P_{ij,t}^2 + 4Q_{ij,t}^2 \quad (31)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ l_{ij,t} - u_{i,t} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq l_{ij,t} + u_{i,t} \quad (32)$$

此外,针对气网潮流的非线性约束式(4),文献[24-25]对该约束进行了线性化处理,这些文献普遍采用了增量分段的方法,然而,这种方法往往会引入较大的误差。为了改善这一情况,通过采用上述的二阶锥松弛技术来对该非线性约束进行处理,具体应用如下式所示:

$$\left\| \begin{bmatrix} W_{mn,t} \\ C_{mn} \pi_{m,t} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq C_{mn} \pi_{n,t} \quad (33)$$

通过上述的二阶锥松弛技术,电压偏差优化目标 f_1 被转化为如下形式:

$$f_1 = \delta_1 \sum_{j \in G_{\text{bus}}} (u_{jd} - 2U_{jd}U_1 + U_1^2) \quad (34)$$

本文建立的IEGS无功电压优化模型为一个非线性模型,首先将电力系统中的潮流方程与天然气系统中的管道流量方程通过二阶锥松弛方法进行转换,以适应商用求解器CPLEX求解环境,然后再通过YALMIP工具箱进行模型大规模求解。

4 算例分析

4.1 E33-G7节点系统

本文电气互联综合能源系统以IEEE33节点电力系统和7节点天然气系统为研究对象,如图4所示,IEEE33节点电力系统中共有33个节点,32条支路,基准功率设置为10 MW,系统电压等级为12.66 kV,系统节点电压安全运行范围为0.95(标幺值)~1.05(标幺值)。将5节点设置为燃气轮机与气网2节点相连,14节点设置为风电机组,7,20和30节点设置为光伏机组,1节点与上级电网相连。设置1台电转气设备,输入端接在电力系统18节点,输出端接在天然气系统7节点。7节点天然气系统包含2处天然气源 W_1 和 W_2 ,1台压缩机,5条天然气管道。

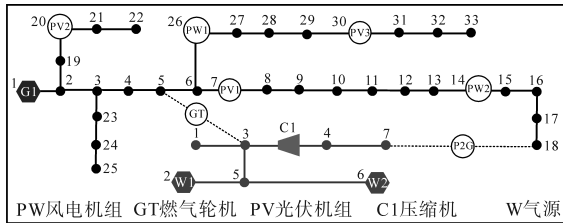


图4 IEGS系统结构图

Fig.4 Structure diagram of IEGS system

其中, PV_1 , PV_2 和 PV_3 的最大输出功率设置为800 kW;燃气轮机的最大输出功率设置为4 MW。光伏机组预测出力如图5所示。风电机组预测出力如图6所示。IEGS电-气负荷日出力曲线如图7所示。

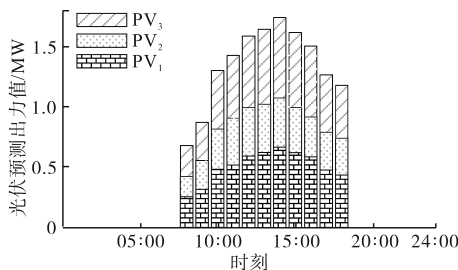


图5 光伏机组预测出力

Fig.5 Forecast output of PV

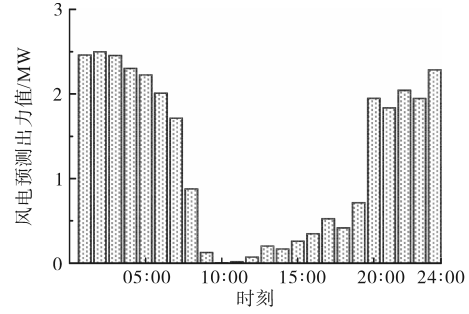


图6 风电机组预测出力

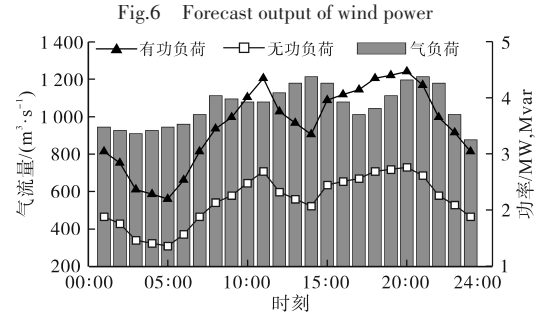


图7 电-气负荷日出力曲线

Fig.7 Sunrise force curve of electricity-gas load

为验证所提IEGS无功电压优化策略对配电网电压的影响,分别设置以下两种场景进行对比算例分析。

场景1:各系统之间独立运行,互不影响,不考虑电力系统与天然气系统之间的耦合关系。

场景2:考虑电力系统与天然气系统之间的耦合关系,各系统通过优化耦合策略共同运行,以实现整体系统的最优性能。

场景1和场景2下系统机组无功出力与消耗如图8和图9所示。场景1中,08:00—20:00时段,此时风电机组出力小,系统无功主要由上级电网、燃气轮机和光伏机组承担。由于场景1中未考虑系统中耦合元件燃气轮机额外的无功出力,系统该时间段无功出力不足,导致电压出现越下限的情况;而在00:00—08:00时段、22:00—24:00时段,由于风电机组出力较大,而该时间段系统负荷较小,风电机组出力无法被消纳,以至于系统潮流流向发生变化,系统电压出现越上限的情况。在场景2中,电力系统和天然气系统被视为一个整体协同运行。在该场景下,燃气轮机从天然气系统的购气成本基本保持不变,但在分时电价较高的08:00—20:00时段附近,燃气轮机发出更多的无功功率。此外,耦合元件本身具有一定的无功调节特性,可以为系统提供额外的无功支撑,使得配电网电压升高。而在00:00—06:00时段、21:00—24:00时段,由于系统负荷较

小,而风电机组又提供较大的功率,由P2G设备对其进行消纳,使得系统的电压降低,改善电压越限的情况。

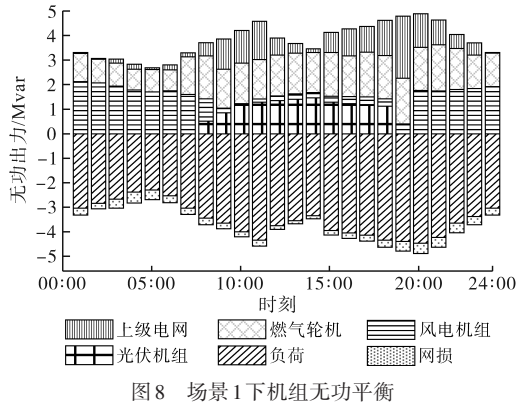


Fig.8 Unit reactive power balance in case 1

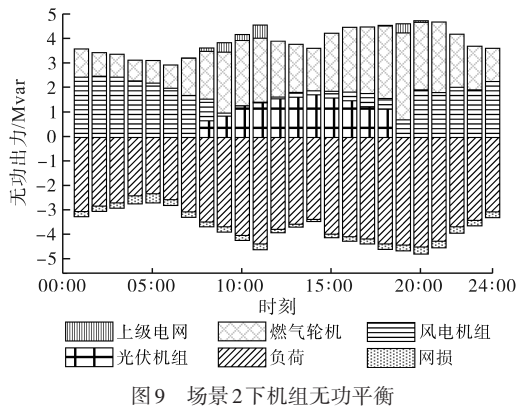


Fig.9 Unit reactive power balance in case 2

电力系统各时刻电压大小如图10所示。本文设置节点电压安全范围设置为0.95(标么值)~1.05(标么值),场景1中,可以看到07:00,08:00,11:00—13:00时刻,电压满足条件,其余时间段电压均超过了安全范围。00:00—06:00,21:00,24:00时刻,由于此时负荷较小,且风电出力较大,电力系统无法消纳额外的风电,导致所有节点电压出现越上限的情况,00:30时刻电压越限至最高,为1.074(标么值),06:00,20:00时刻,此时虽然光伏机组提供一定的无功功率,但由于负荷较大,电压依旧出现了越下限的情况,10:00时刻电压跌落至最低为0.934(标么值);场景2中,采用所提考虑电力系统和天然气系统之间的耦合关系,00:00—06:00,21:00—24:00时刻,P2G机组将多余的风电转化为天然气,使得节点电压降低,00:30时刻的电压降低至1.033(标么值),而在06:00—20:00,燃气轮机随着负荷的增大而额外发出更多的无功功率,抑制了配电网中节点电压的降低,10:00时刻电压升高至0.985(标么

值)。场景2中各时段电压均得到改善,电力系统各时段电压一直保持在安全范围内。

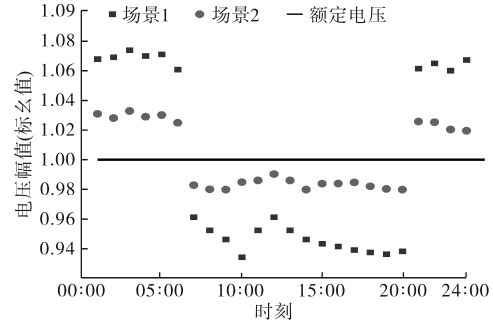


图10 电力系统各时刻电压大小

Fig.10 Voltage of the power system at all times

燃气机组无功出力对比如图11所示,可以看到,在00:00—07:00时段,夜间风电机组出力充足,且夜间负荷较小,燃气轮机无功出力保持不变,在09:00—23:00时段,由于该时间段负荷较大,且该时间段处于分时电价的高峰期,从上级电网购电成本会很大,而光伏机组的无功出力又不足以支撑负荷所需要的无功功率,故燃气轮机额外发出无功功率来弥补无功功率的不足,19:00时刻燃气轮机发出的无功功率从1.86 Mvar上升到了3.55 Mvar。

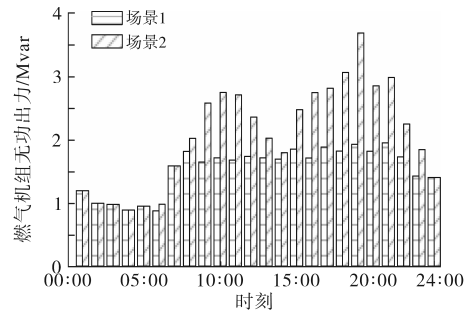


图11 燃气机组无功出力对比

Fig.11 Reactive power output comparison of the gas unit

电转气设备消纳富余电量的结果如图12所示,从图中可以看出,在00:00—06:00,21:00—24:00时段,电转气设备处于工作状态,它将电力系统无法消耗的电能转换成天然气,并将其储存到天然气系统中。随后,在电力系统负荷高峰期,这些储存的天然气将通过燃气机组转换成电能,提高了风电机组的消纳水平。

天然气系统各节点气压如图13所示,从图中可以看出,场景1中,气网的气压在传输过程中出现跌落,导致4节点气压不足,而场景2中,压缩机为燃气输送提供一定气压动力,燃气的运输容量通过压缩机的调节进而发生变化,可以看到4节点的气压得到明显改善。并在00:00—06:00,

21:00—24:00时段,此时电转气设备将多余的风电转化为天然气并存储到天然气系统中,使得天然气系统节点气压升高。

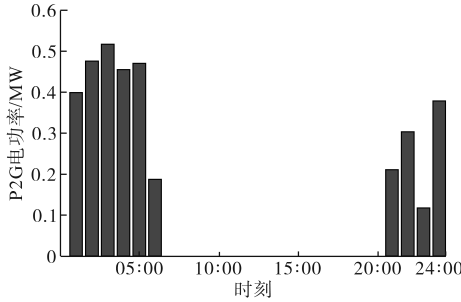


图12 电转气设备消纳电量

Fig.12 Electricity absorbed by power to gas equipment

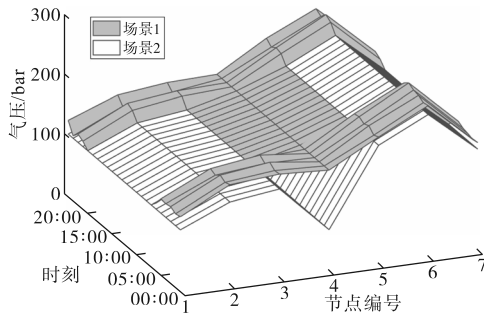


图13 天然气系统各节点气压

Fig.13 Pressure of each node of natural gas system

场景1和场景2下IEGS的综合成本对比如表1所示。可以看出,场景2中配电网购电成本 C_1 较场景1减少了4.89万元,因为在购电价格较高的时段,燃气轮机和风电机组主要承担了配电网的无功功率需求,从而减少了向上级电网购买的无功功率;然而,由于燃气轮机向配电网提供无功功率需消耗更多天然气,因此场景2的购气成本 C_2 较场景1有所增加;场景1未考虑电、气系统之间的耦合性,所以P2G的运行成本 C_3 为0;场景2中燃气轮机运行功率较场景1高,所以燃气轮机的运行成本 C_4 较场景1高;场景2考虑电、气系统之间的耦合性,P2G机组在风电出力较大的阶段将未消纳的风电转化为天然气进行存储,天然气网中气体增多,压缩机运行功率增大,所以压缩机运行成本 C_5 增加。

表1 各场景下综合成本对比

Tab.1 Comprehensive cost comparison under different scenarios

场景	f_1 / 万元	f_2 /万元					F / 万元
		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	
场景1	2.28	5.38	2.41	0	1.86	0.56	12.49
场景2	1.08	0.49	4.98	1.95	2.02	0.91	11.43

4.2 有效性验证

为验证二阶锥松弛方法准确性,结合本文电

力系统与天然气系统二阶锥松弛模型,即式(32)和式(33),给出电力系统和天然气系统的误差指标,如下式所示:

$$\varepsilon_e = l_{ij,t} u_{i,t} - P_{ij,t}^2 - Q_{ij,t}^2 \quad (35)$$

$$\varepsilon_g = W_{mn,t}^2 - C_{mn}^2 \pi_{m,t} - C_{mn}^2 \pi_{n,t} \quad (36)$$

式中: ε_e 为电力系统潮流松弛误差; ε_g 为天然气系统潮流松弛误差; $l_{ij,t}$ 为 t 时刻流过支路 ij 的电流幅值的平方; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻由 i 节点流向 j 节点的有功和无功功率的大小。

电力系统、天然气系统二阶锥松弛误差以及求解时间如表2所示。由表2可知,电力系统中各支路各时段的二阶锥松弛误差为 10^{-5} 量级,而天然气系统中各管道各时段的二阶锥松弛误差为 10^{-3} 量级,松弛偏差较小,能达到调度需求,验证了二阶锥松弛的准确性和有效性。

表2 二阶锥松弛有效性验证

Tab.2 Validation of second-order cone relaxation effectiveness

	误差量级	求解时间/s
电力系统	10^{-5}	16.45
天然气系统	10^{-3}	16.45

5 结论

本文针对电-气综合能源系统中新能源机组和耦合元件的无功出力特性,考虑电力系统运行的稳定性和经济性,构建了一个针对电-气互联综合能源系统的无功电压优化模型。该模型旨在通过合理调整无功功率,确保电力系统的电压稳定,同时降低整体运行成本,从而实现更高效的能源利用。算例结果表明:

1)在IEGS中考虑新能源机组和耦合元件燃气轮机的无功出力后,系统电压偏差得到有效降低。

2)燃气轮机与电制气技术的联合调度能够显著增强系统对风电机组的消纳能力,从而提高可再生能源的利用效率;同时,这种调度方式也有助于降低系统整体经济成本,优化资源配置,实现更加经济高效的能源管理。

3)将二阶锥松弛方法应用于本文模型,原问题在得到最优解时,可以保证松弛后的等式足够精确,满足原问题所有约束,能保证求解精度和速率。

参考文献

[1] 王延杰,林潮彬,徐国智,等.配电网新能源消纳能力评估与

- 工程应用研究[J]. 电气传动, 2024, 54(6): 67-75.
- WANG Yanjie, LIN Chaobin, XU Guozhi, et al. Research on evaluation and engineering application of new energy consumption capacity of distribution network[J]. Electric Drive, 2024, 54(6): 67-75.
- [2] 孙旭日, 周超群, 李延真, 等. 高比例新能源和电动汽车接入背靠背并联系统优化控制[J]. 电气传动, 2021, 51(19): 50-57.
- SUN Xuri, ZHOU Chaoqun, LI Yanzhen, et al. Back-to-back parallel system optimization control with high proportion of renewable energy and electric vehicles[J]. Electric Drive, 2021, 51(19): 50-57.
- [3] 鲍颜红, 张金龙, 衣立东, 等. 含大规模风电电力系统的安全稳定风险预防控制方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 187-194.
- BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, YI Lidong, et al. Prevention and control method of security and stability risk for power system with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 187-194.
- [4] 张三洪, 党杰, 戴剑丰, 等. 考虑最优转速与桨距角控制的风电场限功率优化控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1844-1851.
- ZHANG Sanhong, DANG Jie, DAI Jianfeng, et al. Optimal control strategy for wind power curtailment considering optimal speed and pitch angle control[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1844-1851.
- [5] 李咸善, 陶雨露, 张磊. 考虑内部有偿交易的综合能源系统优化调度策略[J]. 电测与仪表, 2026, 63(1): 92-104.
- LI Xianshan, TAO Yulu, ZHANG Lei. Optimal scheduling strategy of integrated energy system considering the internal paid transaction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2026, 63(1): 92-104.
- [6] 张海华, 刘福才. 考虑风电消纳的区域综合能源系统优化运行分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 585.
- ZHANG Haihua, LIU Fucui. Optimal operation analysis of regional integrated energy system considering wind power accommodation[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(10): 585.
- [7] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1234-1244.
- [8] ZENG Z, DING T, XU Y, et al. Reliability evaluation for integrated power-gas systems with power-to-gas and gas storages[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(1): 571-583.
- [9] ZHANG Y, LIU S, ZHENG S, et al. Rural green transformation of energy in a demonstration county in China[C]//2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Hangzhou, China, 2023: 4529-4533.
- [10] LIN T, DU H, LI Q, et al. Post-contingency corrective control for integrated electricity-gas systems based on convex hull[C]//2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), Nanjing, China, 2021: 846-850.
- [11] 许康平, 王程, 毕天姝. 基于气网动态代理模型的电-气综合能源系统最优能流计算[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3415-3428.
- XU Kangping, WANG Cheng, BI Tianshu. Optimal energy flow calculation of integrated electric-gas systems based on gas network dynamic surrogate model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3415-3428.
- [12] 董帅, 王成福, 梁军, 等. 计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 8-15, 121.
- DONG Shuai, WANG Chengfu, LIANG Jun, et al. Multi-objective day-ahead optimal scheduling of integrated energy system considering power-to-gas operation cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 8-15, 121.
- [13] 林楷东, 陈泽兴, 张勇军, 等. 含P2G的电-气互联网络风电消纳与逐次线性低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 23-37.
- LIN Kaidong, CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, et al. Wind power consumption and successive linear low-carbon economic dispatch of electricity-gas interconnection network with P2G[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 23-37.
- [14] 罗龙波, 陈明辉, 王雯沁, 等. 考虑分级重构的配电网安全低碳两阶段运行优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 36-45.
- LUO Longbo, CHEN Minghui, WANG Wenqin, et al. A two-stage secure and low-carbon operation optimization for a distribution network considering multi-level reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 36-45.
- [15] 范俊杰, 齐磊, 孙孝峰, 等. 面向含无功补偿电容配电网的逆变器主动适配控制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 175-183.
- FAN Junjie, QI Lei, SUN Xiaofeng, et al. Active adaptation control of inverter for distribution network with reactive power compensation capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 175-183.
- [16] 陈鹏伟, 肖湘宁, BARAN Mesut. 计及分布式电源无功特性的弱环配电网复仿射潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 59-66.
- CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, BARAN Mesut. Complex affine power flow algorithm for weak-loop distribution network considering reactive power characteristics of distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 59-66.
- [17] DING T, LIU S, YUAN W, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 301-311.
- [18] 季玉琦, 耿光飞, 温渤婴, 等. 基于优分割法的含DG配电网动态无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2585-2592.
- JI Yuqi, GENG Guangfei, WEN Boying, et al. Dynamic reactive power optimization in distribution network with DG based on optimal partition[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2585-2592.

- 2585-2592.
- [19] 姚艳,高飞翎,周子旺.基于改进蝙蝠算法的含分布式电源配电网无功优化[J].电气传动,2023,53(6):46-52.
- YAO Yan, GAO Feiling, ZHOU Ziwan, et al. Reactive power optimization of distribution networks with distributed generations based on improved bat algorithm[J]. Electric Drive, 2023, 53(6):46-52.
- [20] 赵晶晶,朱炯达,刘帅,等.基于集群划分的配电网多时间尺度分布式有功-无功协同优化方法[J].电测与仪表,2024,61(10):57-66.
- ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LIU Shuai, et al. Multi-timescale distributed active and reactive power coordinated optimization method of distributed network based on cluster division[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10):57-66.
- [21] 张浩禹,邱晓燕,周晨锐,等.考虑燃气轮机无功支撑的IEGES有功-无功协调优化模型[J].电气传动,2021,51(12):52-58.
- ZHANG Haoyu, QIU Xiaoyan, ZHOU Shengrui, et al. Coordinated active-reactive optimization model for IEGES considering reactive power support by gas-fired turbine[J]. Electric Drive, 2021, 51(12):52-58.
- [22] 李崎勇,郑一飞,刘斌,等.基于主从博弈的含碳捕集与热电联产综合能源系统优化运行[J].电测与仪表,2024,61(6):10-19.
- LI Jiyong, ZHENG Yifei, LIU Bin, et al. Optimal operation of an integrated energy system with carbon capture system and combined heating and power based on a master-slave game[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6):10-19.
- [23] 陈厚合,高康静,张儒峰,等.考虑异步通信的配电-气网分布式有功-无功协同优化[J].电力系统自动化,2024,48(20):69-80.
- CHEN Houhe, GAO Kangjing, ZHANG Rufeng, et al. Distributed active-reactive power coordinated optimization for electricity-gas distribution network considering asynchronous communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(20):69-80.
- [24] 黎静华,王治邦,姜娟.计及供能可靠性的电-气互联传输网络优化规划[J].电力自动化设备,2021,41(9):164-172.
- LI Jinghua, WANG Zhibang, JIANG Juan. Optimal planning of integrated electricity-gas transmission network considering energy supply reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):164-172.
- [25] 张林垚,郑洁云,孔顺飞,等.考虑综合能源系统的配网规划模型及其求解方法[J].南方电网技术,2019,13(6):76-86.
- ZHANG Linyao, ZHENG Jieyun, KONG Shunfei, et al. Planning model of distribution network considering the integrated energy system and its solution method[J]. Southern Power Grid Technology, 2019, 13(6):76-86.

收稿日期:2024-12-19

修改稿日期:2025-02-28

(上接第9页)

- tivity, 2021, 31(5):1-5.
- [11] ZHAO Z, MA G, LUO J, et al. Modeling and characteristic analysis of air-cored linear synchronous motors with racetrack coils for electrodynamic suspension train[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 8(2):1828-1838.
- [12] 李婧,徐佳明,刘康,等.高温超导直线同步电机电磁力仿真与实验研究[J].中国电机工程学报,2024,44(11):4513-4524.
- LI Jing, XU Jiaming, LIU Kang, et al. Simulation and experimental study on electromagnetic forces characteristic of high temperature superconducting linear motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11):4513-4524.
- [13] FU X, HUANG J, WANG D, et al. Electromagnetic characteristics analysis and thrust fluctuation optimization in integrated propulsion, levitation, and guidance systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(6):1-10.
- [14] 徐杰.超导磁悬浮列车用直线发电机的设计与特性解析分析[D].北京:北京交通大学,2020.
- XU Jie. Design and characteristic analysis of linear generator for superconducting maglev train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

收稿日期:2025-03-25

修改稿日期:2025-05-23