

考虑燃气轮机无功支撑的IEGES有功-无功协调优化模型

张浩禹,邱晓燕,周晟锐,刘梦依,赵有林

(四川大学电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:燃气轮机作为连接电力网络和天然气网络的重要元件,其无功支撑能力为减小网损和电压偏差提供重要途径。基于此,提出一种考虑燃气轮机无功支撑的电-气互联综合能源系统(IEGES)有功-无功协调优化模型。模型首先对电转气、燃气轮机、有载调压变压器和常规机组等重要元件建模,并采用分段线性化处理燃气轮机有功无功出力耦合特性约束,从而融入燃气轮机的无功支撑能力。接着计及电网气网约束以调度成本和网损为优化目标,运用二阶锥松弛技术将模型转化为混合整数凸优化问题求解。最后在IEEE33节点电网与比利时20节点天然气网耦合系统中模拟仿真,结果表明:考虑燃气轮机的无功支撑可以显著减少配电网损耗和电压偏差。为综合能源系统建设和调度决策提供参考。

关键词:电-气互联综合能源系统;燃气轮机无功支撑;二阶锥松弛;分段线性化;有功-无功协调优化

中图分类号:TM933 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21286

Coordinated Active-reactive Optimization Model for IEGES Considering Reactive Power Support by Gas-fired Turbine

ZHANG Haoyu, QIU Xiaoyan, ZHOU Shengrui, LIU Mengyi, ZHAO Youlin

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: As the important equipment to link the power network and the gas network, the gas-fired turbine with the ability of reactive power support could be a considerable way to decrease the network loss and the voltage deviation. Based on this fact, a coordinated active-reactive optimization model for integrated electricity-gas energy system (IEGES) considering reactive power support by gas-fired turbine was proposed. Firstly, some important units in this model such as power to gas(P2G), gas-fired turbine, on load tap changer, and traditional generators were elaborated, and simultaneously to integrate the reactive power support by gas-fired turbine, the piecewise linearization was adopted to linearize the coupling constraint between active power and reactive power generated by gas-fired turbine. Secondly, by the technology of the second order cone relaxation, the model setting the minimum dispatch cost and network loss as the target with the power and gas network constraints was transformed to a mixed integer convex optimization problem. Finally, the integrated system of IEEE33-node power network and 20-node natural gas network of Belgium was employed for analog simulation, results show that the ability of reactive power support by gas-fired turbine can significantly decrease the distributed network loss and voltage deviation. This model can provide reference for the construction and dispatch decision of the integrated energy system.

Key words: integrated electricity-gas energy system (IEGES); reactive power support by gas-fired turbine; second order cone relaxation; piecewise linearization; coordinated active-reactive power optimization

随着经济的高速发展,人类逐渐面临化石能源枯竭和环境保护问题^[1]。目前,我国风电累计并网容量已高居世界首位,但风电间歇性和反调峰特性为其消纳带来困难。另一方面,仅考虑电

能的单一能量管理不利于多种能源的高效利用,其发展也会受到限制^[2-3]。因此,电-气互联综合能源系统(integrated electricity-gas energy system, IEGES)的概念应运而生,它将电力系统和天然气

基金项目:四川省科技厅重点研发项目(2017FZ0103)

作者简介:张浩禹(1994—),男,硕士研究生,Email:905701355@qq.com

系统紧密耦合,有效提高了能源利用效率和供能灵活性。电转气(power to gas, P2G)和燃气轮机等常见的耦合元件的接入势必对电网潮流带来影响。

目前,针对IEGES的研究集中于经济调度、扩展规划等方面。文献[4]考虑P2G较高的运行成本与风电消纳存在的矛盾关系,采用多目标模糊加权的方法协调系统综合成本与风电消纳水平;文献[5]从实现热电解耦热电联产机组(combined heat and power, CHP)出发,研究P2G与CHP在IEGES中的联合调度机制;文献[6]提出含P2G碳交易激励机制的IEGES经济调度模型,证明P2G对弃风消纳和低碳电力均有积极作用。上述工作多以经济为重心建立直流潮流模型,但忽略了电网内电压电流约束和线路损耗问题。

此外,配电网中常考虑有载调压变压器(on load tap changer, OLTC)、静止无功补偿器等传统手段降低损耗。文献[7]通过调节变压器抽头和静止无功补偿装置降低主动配电网网损,并将模型松弛为混合整数二阶锥规划问题进行求解;文献[8]考虑分布式电源有功无功出力上下限约束,结合OLTC和并联电容器实现配电网动态无功优化,但分布式电源无功出力建模比较简单。实际上,燃气轮机作为连接电力系统和天然气系统的纽带,本身具备一定的无功补偿能力^[9],但其有功无功出力间存在明显的非线性耦合约束关系,如何对此约束关系准确建模并对其线性化将是关键性问题。

综上所述,本文建立了考虑燃气轮机无功支撑的IEGES有功-无功协调优化模型。首先搭建了包含电转气、燃气轮机、风电、OLTC和常规机组的综合能源系统构架,模型中具体考虑了燃气轮机的无功补偿能力并给出其具体线性化方法。其次,考虑配电网、配气网潮流约束建立以成本和网损最小为目标的调度优化模型,将其转化为混合整数二阶锥规划模型,调用成熟的商业软件包CPLEX准确求解。最后通过算例分析验证燃气轮机的无功优化效果,并分析了求解方法的精准性和快速性。

1 IEGES有功-无功协调优化模型

1.1 IEGES结构

文中设计的IEGES由配电网、配气网和耦合

元件(P2G和燃气轮机)组成。P2G和燃气轮机实现了电网和气网能量的双向流动,使电网和气网紧密耦合。配电网电能由变电站、风电场、常规机组和燃气轮机供给;配气网天然气由气源和P2G供给。本文主要从输电输气层面研究燃气轮机和P2G对系统无功优化和经济成本的影响,暂未考虑热能冷能的耦合。

1.2 目标函数

文中IEGES优化模型目标函数包括两部分:最小化网损目标和经济成本目标。由于经济成本和配电网损耗量纲不同,为兼顾综合能源系统损耗和经济成本,引入网损惩罚系数,将多目标问题转化为单目标问题方便求解,定义IEGES综合成本为经济成本与网损在经济维度的投影之和:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_{DG}} f(P_{DG,i,t}) + \sum_{j=1}^{N_G} C_{gas} \varphi_{G,j,t} + \delta \left(\sum_{mn \in N_E} I_{mn,t}^2 r_{mn} \right) \right] \quad (1)$$

式中: F 为IEGES综合成本; T 为总时段数,文中取24; N_{DG} , N_G 和 N_E 分别为常规机组电源个数、气源个数和配电网支路数; $P_{DG,i,t}$ 为第 i 个常规机组在 t 时段的有功出力; C_{gas} 为气价; $\varphi_{G,j,t}$ 为第 j 个气源在 t 时段的天然气流量; δ 为网损惩罚系数; r_{mn} 为支路 mn 的阻值, $I_{mn,t}$ 为 t 时段流过支路 mn 的电流; $f(P_{DG,i,t})$ 为常规机组的成本函数,具体为

$$f(P_{DG,i,t}) = a_i P_{DG,i,t}^2 + b_i P_{DG,i,t} + c_i \theta_{DG,i,t} \quad (2)$$

式中: a_i , b_i , c_i 为第 i 个常规机组的耗量特性曲线参数; $\theta_{DG,i,t}$ 为第 i 个常规机组在 t 时段的开停机状态,为1表示开机,为0表示关机。

1.3 约束条件

文中IEGES无功优化模型约束条件包含配电网约束、配气网约束和耦合元件约束条件。

1.3.1 配电网约束条件

1)潮流约束^[5]如下:

$$\begin{cases} P_{j,t} = P_{Sj,t} + P_{Wj,t} + P_{DGj,t} + P_{GTj,t} - P_{Lj,t} - P_{P2Gj,t} \\ Q_{j,t} = Q_{Sj,t} + Q_{GTj,t} - Q_{Lj,t} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{j,t} = \sum_{k \in \mathbf{s}(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \mathbf{\zeta}(j)} (P_{ij,t} - r_{ij} I_{ij,t}^2) + g_j V_{j,t}^2 \\ Q_{j,t} = \sum_{k \in \mathbf{s}(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \mathbf{\zeta}(j)} (Q_{ij,t} - x_{ij} I_{ij,t}^2) + b_j V_{j,t}^2 \\ V_{j,t}^2 = V_{i,t}^2 - 2(P_{ij,t} r_{ij} + Q_{ij,t} x_{ij}) + I_{ij,t}^2 (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \\ I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{s}(j)$ 为首节点 j 支路的相邻节点集合; $\mathbf{\zeta}(j)$

为末节点*j*支路的相邻节点集合; P_{jt}, Q_{jt} 分别为第*j*个节点在*t*时段的有功、无功注入功率; P_{Sjt} , P_{Wjt} 和 P_{GTjt} 分别为变电站、风电机组和燃气轮机在*t*时段向节点*j*注入的有功功率; P_{P2Gjt} 为节点*j*在*t*时段向P2G输入的有功功率; Q_{Sjt}, Q_{GTjt} 分别为变电站和燃气轮机在*t*时段向节点*j*注入的无功功率; P_{Ljt}, Q_{Ljt} 分别为节点*j*在*t*时段的有功、无功负荷; g_j, b_j 分别为节点*j*的电导和电纳; x_{ij} 为支路*ij*的电抗值; V_{jt} 为节点*j*在*t*时段的电压; P_{ijt}, Q_{ijt} 分别为支路*ij*在*t*时段的有功、无功功率。

2)安全约束如下式:

$$\begin{cases} I_{ij,min} \leq I_{ij,t} \leq I_{ij,max} \\ V_{j,min} \leq V_{jt} \leq V_{j,max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $I_{ij,max}, I_{ij,min}$ 分别为支路*ij*的电路上下限; $V_{j,max}, V_{j,min}$ 分别为节点*j*的电压上下限。

3)变电站功率约束。变电站有功、无功出力需满足上下限约束:

$$\begin{cases} P_{Sj,min} \leq P_{Sjt} \leq P_{Sj,max} \\ Q_{Sj,min} \leq Q_{Sjt} \leq Q_{Sj,max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{Sj,max}, P_{Sj,min}$ 分别为变电站*j*的有功出力上、下限; $Q_{Sj,max}, Q_{Sj,min}$ 分别为变电站*j*的无功出力上、下限。

4)风电和常规机组约束。文中仅考虑风电和常规机组的有功出力,常规机组出力需满足上、下限约束和功率爬坡、滑坡约束:

$$0 \leq P_{Wjt} \leq P_{Wjt}^{pre} \quad (7)$$

$$P_{DGj,min} \theta_{DGj,t} \leq P_{DGj,t} \leq P_{DGj,max} \theta_{DGj,t} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_{DGj,t} - P_{DGj,t-1} \geq R_j^D \\ P_{DGj,t} - P_{DGj,t-1} \leq R_j^U \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{Wjt}^{pre} 为风电机组*j*在*t*时段的预测功率; $P_{DGj,max}, P_{DGj,min}$ 分别为常规机组*j*的有功出力上、下限; R_j^U, R_j^D 分别为常规机组*j*的爬坡、滑坡上限。

5)OLTC约束。文中OLTC均安装在变电站节点处,不额外增设变压器支路,则与OLTC相连的变电站母线电压为可调离散变量:

$$\begin{cases} V_{j,min} \leq V_{base} X_{jt} \leq V_{j,max} \\ X_{j,min} \leq X_{jt} \leq X_{j,max} \\ X_{jt} = X_{j,min} + \sum_k X_{jk} \theta_{jt,k}^{OLTC} \end{cases} \quad (10)$$

式中: X_{jt} 为OLTC在*t*时段的变比; V_{base} 为基准电压; $X_{j,max}, X_{j,min}$ 分别为可调变比上、下限; X_{jk} 为档位*k*与档位*k-1*的变比差值; $\theta_{jt,k}^{OLTC}$ 为OLTC在档位*k*的状态变量,为0-1变量。

同时也应该满足档位调节范围和调节次数的限制,如下式所示:

$$\begin{cases} \theta_{jt,1}^{OLTC} \geq \theta_{jt,2}^{OLTC} \geq \dots \geq \theta_{jt,SR_j}^{OLTC} \\ \sum_k \theta_{jt,k}^{OLTC} - \sum_k \theta_{jt-1,k}^{OLTC} \geq \tau_{jt}^{OLTC,IN} - \tau_{jt}^{OLTC,DE} SR_j \\ \sum_k \theta_{jt,k}^{OLTC} - \sum_k \theta_{jt-1,k}^{OLTC} \leq \tau_{jt}^{OLTC,IN} SR_j - \tau_{jt}^{OLTC,DE} \\ \tau_{jt}^{OLTC,IN} + \tau_{jt}^{OLTC,DE} \leq 1 \\ \sum_{t=1}^T (\tau_{jt}^{OLTC,IN} + \tau_{jt}^{OLTC,DE}) \leq \bar{Y}_j^{OLTC} \end{cases} \quad (11)$$

式中: SR_j 为第*j*个OLTC的档位最大调节范围; $\tau_{jt}^{OLTC,IN}, \tau_{jt}^{OLTC,DE}$ 分别为第*j*个OLTC在*t*时段档位上调、下调0-1变量,即当 $\tau_{jt}^{OLTC,IN}$ 为1时代表OLTC在*t*时刻档位比(*t-1*)时刻档位更高,为0时代表档位不变或变低, $\tau_{jt}^{OLTC,DE}$ 与之类似; \bar{Y}_j^{OLTC} 为第*j*个OLTC在调度周期内的档位调节次数上限。

1.3.2 配气网约束条件

1)天然气流量平衡约束

$$\sum_{j \in N_Q} \varphi_{ijt} + \varphi_{L,i,t} + \varphi_{GT,i,t} = \varphi_{G,i,t} + \varphi_{P2G,i,t} \quad (12)$$

式中: N_Q 为天然气系统节点集合; φ_{ijt} 为*t*时段流过管道*ij*的天然气; $\varphi_{L,i,t}$ 为节点*i*在*t*时段的天然气负荷; $\varphi_{GT,i,t}$ 为节点*i*在*t*时段向燃气轮机输入的天然气流量; $\varphi_{G,i,t}$ 为气源*i*在*t*时段提供的天然气流量; $\varphi_{P2G,i,t}$ 为P2G在*t*时段向节点*i*注入的天然气流量^[4]。

2)潮流约束。管道流量应该受到相连节点气压和自身属性的限制,可以具体表示为

$$\begin{cases} \varphi_{ijt} = K_{ij} S_{ijt} \sqrt{S_{ijt} (p_{i,t}^2 - p_{j,t}^2)} \\ S_{ijt} = \begin{cases} 1 & p_{i,t} \geq p_{j,t} \\ -1 & p_{i,t} \leq p_{j,t} \end{cases} \\ |\varphi_{ijt}| \leq \varphi_{ij,max} \\ p_{i,min} \leq p_{i,t} \leq p_{i,max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: K_{ij} 为管道*ij*的Weymouth常数; S_{ijt} 为管道*ij*在*t*时段的流量方向变量,为1表示管道流量从始节点流向末节点,为-1时则相反; $p_{i,t}$ 为气网节点*i*在*t*时段的的气压; p_{jt} 为气网节点*j*在*t*时段的的气压; $\varphi_{ij,max}$ 为管道*ij*的流量上限; $p_{i,max}, p_{i,min}$ 分别为节点*i*的气压上、下限。

3)气源约束

$$\varphi_{G,i,min} \leq \varphi_{G,i,t} \leq \varphi_{G,i,max} \quad (14)$$

式中: $\varphi_{G,i,max}, \varphi_{G,i,min}$ 分别为气源*i*提供的天然气流量上、下限。

1.3.3 耦合元件约束

1)P2G技术。电转天然气的过程可以分为两

步实现:首先通过电解水产生氢气和氧气,氢气由于密度小存在难以大规模存储和运输的缺陷,可以将产生的氢气与二氧化碳在高温高压催化剂的条件下产生甲烷。考虑两阶段的化学反应,P2G的效率约为45%~60%。由于天然气管道和储气罐都是经济实用的储气手段,所以对电网而言,P2G作为可直接管控的虚拟负荷常用于消纳大量风电,是电力系统储能的一种新手段,其具体能源转化模型为

$$\begin{cases} \varphi_{P2G,i,t} = \eta_{P2G} P_{P2G,i,t} / HGV \\ P_{P2G,i,\min} \leq P_{P2G,i,t} \leq P_{P2G,i,\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: η_{P2G} 为电转气效率; HGV 为天然气高热值,文中取 $9.88 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; $P_{P2G,i,\max}$, $P_{P2G,i,\min}$ 分别为P2G输入电功率上、下限。

2)燃气轮机。燃气轮机作为高效清洁的发电方式,通过燃气发电向电网注入电能,缓解电网峰荷压力减少线路阻塞。其具体能源转化模型为

$$\begin{cases} P_{GT,i,t} = \eta_{GT} \varphi_{GT,i,t} \cdot HGV \\ 0 \leq P_{GT,i,t} \leq P_{GT,i,\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: η_{GT} 为燃气发电效率; $P_{GT,i,\max}$ 为燃气轮机发电功率上限。

本文考虑燃气轮机在配电网的无功补偿能力,其有功无功出力耦合特性曲线如图1所示。

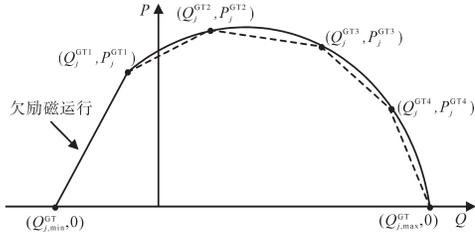


图1 燃气轮机有功无功出力特性曲线

Fig.1 Active and reactive power output curves of gas-fired turbine

由图1可知,除了在欠励磁运行状态,燃气轮机有功、无功出力存在明显非线性耦合关系,在曲线上寻找6个特征点从左至右分别为 $(Q_{j,\min}^{GT}, 0)$, (Q_j^{GT1}, P_j^{GT1}) , (Q_j^{GT2}, P_j^{GT2}) , (Q_j^{GT3}, P_j^{GT3}) , (Q_j^{GT4}, P_j^{GT4}) 和 $(Q_{j,\max}^{GT}, 0)$,其中 $Q_{j,\max}^{GT}$, $Q_{j,\min}^{GT}$ 分别为第 j 个燃气轮机的无功出力上、下限; P_j^{GT1} , P_j^{GT2} , P_j^{GT3} 和 P_j^{GT4} 为第 j 个燃气轮机特性曲线上对应特征点的有功出力; Q_j^{GT1} , Q_j^{GT2} , Q_j^{GT3} 和 Q_j^{GT4} 为第 j 个燃气轮机特性曲线上对应特征点的无功出力。

采用分段线性化将燃气轮机有功、无功出力约束松弛为线性模型:

$$\begin{cases} P_{GT,j,t} \leq \frac{P_j^{GT1}}{Q_j^{GT1} - Q_{j,\min}^{GT}} (Q_{GT,j,t} - Q_{j,\min}^{GT}) \\ P_{GT,j,t} \leq \frac{P_j^{GT2} - P_j^{GT1}}{Q_j^{GT2} - Q_j^{GT1}} (Q_{GT,j,t} - Q_j^{GT1}) + P_j^{GT1} \\ P_{GT,j,t} \leq \frac{P_j^{GT3} - P_j^{GT2}}{Q_j^{GT3} - Q_j^{GT2}} (Q_{GT,j,t} - Q_j^{GT2}) + P_j^{GT2} \\ P_{GT,j,t} \leq \frac{P_j^{GT4} - P_j^{GT3}}{Q_j^{GT4} - Q_j^{GT3}} (Q_{GT,j,t} - Q_j^{GT3}) + P_j^{GT3} \\ P_{GT,j,t} \leq \frac{P_j^{GT4}}{Q_j^{GT4} - Q_{j,\min}^{GT}} (Q_{GT,j,t} - Q_{j,\min}^{GT}) \end{cases} \quad (17)$$

2 混合整数二阶锥规划模型

文中建立的IEGES有功-无功协调优化问题是一个混合整数非线性优化问题,为保证求解精度和速度,本文采用二阶锥松弛技术将其转化为混合整数二阶锥规划模型方便求解,非线性主要集中于式(1)、式(4)、式(13)。

2.1 二阶锥松弛

针对配电网潮流约束,首先定义辅助变量

$\tilde{I}_{ij,t} = I_{ij,t}^2$, $\tilde{V}_{j,t} = V_{j,t}^2$,此时式(4)将转化为

$$\begin{cases} P_{j,t} = \sum_{k \in \mathcal{S}(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \mathcal{L}(j)} (P_{ij,t} - r_{ij} \tilde{I}_{ij,t}) + g_j \tilde{V}_{j,t} \\ Q_{j,t} = \sum_{k \in \mathcal{S}(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \mathcal{L}(j)} (Q_{ij,t} - x_{ij} \tilde{I}_{ij,t}) + b_j \tilde{V}_{j,t} \\ \tilde{V}_{j,t} = \tilde{V}_{i,t} - 2(P_{ij,t} r_{ij} + Q_{ij,t} x_{ij}) + \tilde{I}_{ij,t} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \\ I_{ij,\min}^2 \leq \tilde{I}_{ij,t} \leq I_{ij,\max}^2 \\ V_{j,\min}^2 \leq \tilde{V}_{j,t} \leq V_{j,\max}^2 \end{cases} \quad (18)$$

对其进行二阶锥松弛转化,具体过程为

$$\tilde{I}_{ij,t} \geq \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\tilde{V}_{i,t}} \quad (19)$$

$$(\tilde{I}_{ij,t} + \tilde{V}_{i,t})^2 - (\tilde{I}_{ij,t} - \tilde{V}_{i,t})^2 \geq 4P_{ij,t}^2 + 4Q_{ij,t}^2 \quad (20)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{V}_{i,t} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{V}_{i,t} \quad (21)$$

此外,对于气网潮流非线性约束式(13),大量文献^[10]采用增量分段线性化的方法处理,但往往存在误差较大的弊端。同样可以采用二阶锥松弛的方法处理此约束条件,首先添加管道流向0-1辅助变量 $\theta_{ij,t}^+$ 和 $\theta_{ij,t}^-$, $\theta_{ij,t}^+$ 为1代表管道 ij 在 t 时段的流量方向为从始节点流向末节点,为0则流向相反或没有流量, $\theta_{ij,t}^-$ 与之相反。再定义变量 $\tilde{p}_{i,t} = p_{i,t}^2$,则式(13)被转化为

$$(\theta_{ij,t}^+ - \theta_{ij,t}^-) \cdot (\tilde{p}_{i,t} - \tilde{p}_{j,t}) = (1/K_{ij})^2 \cdot \varphi_{ij,t}^2 \quad (22)$$

$$-(1 - \theta_{ij,t}^+) \cdot \varphi_{ij,t,\max} \leq \varphi_{ij,t} \leq (1 - \theta_{ij,t}^-) \cdot \varphi_{ij,t,\max} \quad (23)$$

$$\theta_{ij,t}^+ + \theta_{ij,t}^- = 1 \quad (24)$$

$$p_{i,\min}^2 \leq \tilde{p}_{i,t} \leq p_{i,\max}^2 \quad (25)$$

引入辅助变量 $\Gamma_{ij,t}$, 对式(22)进行二阶锥松弛转化:

$$\begin{cases} \Gamma_{ij,t} \geq (1/K_{ij})^2 \cdot \varphi_{ij,t}^2 \\ \Gamma_{ij,t} \geq \tilde{p}_{j,t} - \tilde{p}_{i,t} + (\theta_{ij,t}^+ - \theta_{ij,t}^- + 1)(p_{i,\min}^2 - p_{j,\max}^2) \\ \Gamma_{ij,t} \geq \tilde{p}_{i,t} - \tilde{p}_{j,t} + (\theta_{ij,t}^+ - \theta_{ij,t}^- - 1)(p_{i,\max}^2 - p_{j,\min}^2) \\ \Gamma_{ij,t} \leq \tilde{p}_{j,t} - \tilde{p}_{i,t} + (\theta_{ij,t}^+ - \theta_{ij,t}^- + 1)(p_{i,\max}^2 - p_{j,\min}^2) \\ \Gamma_{ij,t} \leq \tilde{p}_{i,t} - \tilde{p}_{j,t} + (\theta_{ij,t}^+ - \theta_{ij,t}^- - 1)(p_{i,\min}^2 - p_{j,\max}^2) \end{cases} \quad (26)$$

针对目标函数(2)中的二次项, 可以引入辅助变量 z 做二阶锥松弛转化:

$$f(P_{DG,i,t}, z_{i,t}) = a_i z_{i,t} + b_i P_{DG,i,t} + c_i \theta_{DG,i,t} \quad (27)$$

$$z_{i,t} \geq 0 \quad z_{i,t} \geq P_{DG,i,t}^2 \quad (28)$$

2.2 有功-无功协调优化模型

至此, 通过二阶锥松弛转化, 在第1节中建立的IEGES有功-无功协调优化模型被转化为混合整数二阶锥规划问题, 具体如下:

$$\begin{aligned} \min F = & \sum_{t=1}^T [\sum_{i=1}^{N_{DC}} f(P_{DG,i,t}, z_{i,t}) + \sum_{j=1}^{N_G} C_{gas} \varphi_{G,j,t} + \\ & \delta (\sum_{mn \in N_E} \tilde{I}_{mn,t} r_{mn})] \end{aligned} \quad (29)$$

s.t.

电网约束条件式(3), 式(6)~式(11), 式(18), 式(21)。

气网约束条件式(12), 式(14), 式(23)~式(26)。

耦合元件约束式(15)~式(17)。

辅助约束条件式(28)。

CPLEX是一种较为高效的优化求解器, 对于这个含大量约束条件和变量的混合整数二阶锥规划模型, 可以在Matlab中调用YALMIP和CPLEX12.6.0算法包进行有效求解, 保障了模型求解的精确性和快速性。

3 算例分析

将IEEE33节点电力系统与比利时20节点天然气系统进行耦合, 组成的IEGES作为文中的算例背景。其中, 电网中共有33个节点, 32条支路, 基准电压为12.66 kV。设计有OLTC的变电站位于节点1, 有功、无功出力上限分别为3 MW和3 Mvar, 电压调节范围为[0.94, 1.06], 档位调节增量均为0.02共设置7个档位。两个常规机组具体参数详见表1, 气网中共有20节点, 19条管道,

网络参数参考文献[10]。燃气轮机与P2G效率均为0.6, P2G有功功率上限为0.15 MW, 燃气轮机特征点数据来自文献[9]。网损惩罚系数取100元/kW。

表1 常规机组参数

Tab.1 Parameters of traditional generators					
机组	出力下限/ MW	出力上限/ MW	爬坡滑坡 上限/MW	a_i	b_i c_i
G ₁	0.1	1	0.05	0.000 04	0.025 4
G ₂	0.1	1.5	0.10	0.000 06	0.020 4

IEGES具体结构图如图2所示, 图3为日前风电出力预测和电、气负荷数据曲线图。

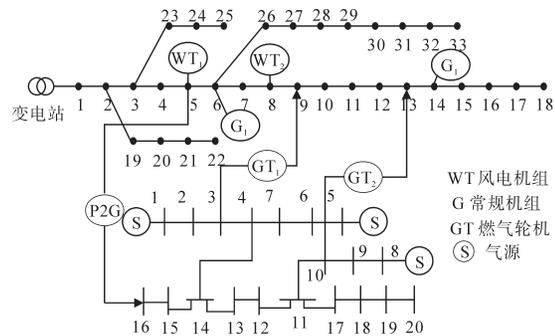


图2 IEGES系统结构图
Fig.2 Structure map of IEGES

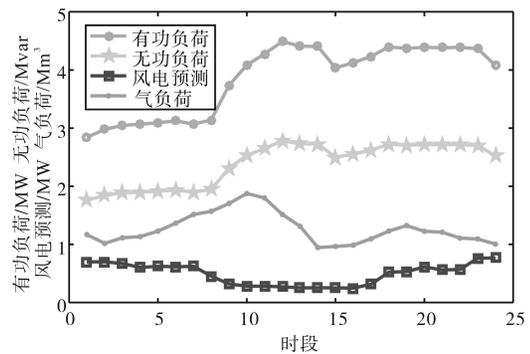


图3 电负荷、气负荷和风电预测出力曲线
Fig.3 Output curves of electricity load, gas load and prediction of wind power

为研究在IEGES中加入无功优化模型和燃气轮机无功支撑能力对调度结果的影响, 设置4个场景进行对比分析, 具体为:

场景一: 不考虑无功优化和燃气轮机无功出力, 以经济成本为目标函数;

场景二: 不考虑无功优化, 考虑燃气轮机无功出力, 以经济成本为目标函数;

场景三: 考虑无功优化, 不考虑燃气轮机无功出力。

场景四: 考虑无功优化和燃气轮机无功出力。

3.1 结果对比

分别根据上述4种场景求解结果,不同场景下的经济成本、网络损耗和综合成本如表2所示。

表2 不同场景下的优化结果

Tab.2 Optimal results under different scenarios

运行模式	经济成本/万元	网损/MW
场景一	23.64	9.67
场景二	23.62	9.21
场景三	24.13	2.32
场景四	24.10	1.55

由表2可知,在考虑了燃气轮机无功补偿后,场景二网损较场景一降低了4.8%,场景四网损较场景三降低了33.19%,经济成本也有所下降但幅度不大。此外,在模型中考虑了无功优化后,场景三网损较场景一降低了76%,场景四网损较场景二降低了83.17%。因此,在IEGES调度中考虑无功优化和燃气轮机无功补偿能力均能有效降低配电网损耗。为进一步分析上述结论,各设备有功无功出力如表3所示。

表3 不同场景下各设备日前总发电出力

Tab.3 Day-ahead gross power output of each equipment under different scenarios

运行模式	变电站有功/MW	变电站无功/Mvar	风电/MW	燃气轮机有功/MW	燃气轮机无功/Mvar	常规机组/MW
场景1	69.79	64.95	10.99	19.13	—	8.72
场景2	70.10	54.36	11.05	18.73	10.35	8.32
场景3	34.76	58.88	11.75	17.95	—	30.80
场景4	41.59	37.34	11.77	6.53	21.04	34.27

由表3可知,由于场景一和场景二仅以经济成本最小为目标,所以在求解时优先考虑由变电站向负荷供电,但仅由处于初始母线的变电站向整个辐射状网络供能将会导致网络损耗增加。场景三和场景四在考虑无功优化后,分布于配电网各处的电源出力较为均匀,场景三与场景一相比较变电站有功出力减少了50.19%,风电出力增加6.9%,常规机组出力增加了约3倍,供电距离缩短导致系统总网损显著降低。场景二和场景四在考虑燃气轮机无功支撑能力后,减少了变电站无功出力,降低了系统总网损,但燃气轮机有功出力明显降低,这是由于考虑燃气轮机有功无功特性曲线约束后,有功出力和无功出力受到明显制约。

不同场景下各节点平均电压如图4所示。由图4可知,燃气轮机和无功优化的有机结合可以显著降低母线电压偏差。

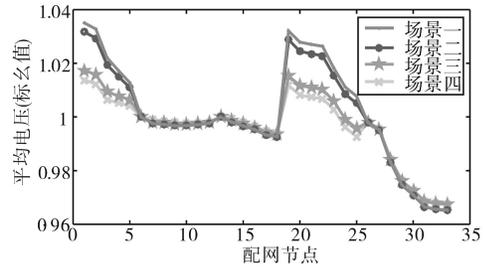


图4 电力系统母线电压

Fig.4 Bus voltages of power system

由表3可知,在IEGES中引入无功优化对风电出力影响不大。为重点分析P2G对风电消纳和经济调度的影响,在场景四的背景下做优化对比具体如表4所示。由表4可知,考虑P2G后系统风电出力增加28.21%,经济成本降低2%,网损变化不大。证明在IEGES中考虑P2G对促进风电消纳和减少成本有积极作用。

表4 P2G对优化结果的影响

Tab.4 The impact of P2G on optimization results

运行模式	风电出力/MW	网损/MW	经济成本/万元
考虑P2G	11.77	1.55	24.10
不考虑P2G	9.18	1.57	24.59

由表2可知,IEGES在引入无功优化目标后,经济成本反而上升,因此系统经济性和网损目标间存在一定矛盾关系。文中利用网损惩罚系数协调这一矛盾关系,惩罚系数的具体大小反映了调度决策者对网损这一目标的偏好程度,惩罚系数的选取将直接影响优化结果,具体如图5所示。由图5可知,网损惩罚系数从10增加至100的过程中,网损不断减少、经济成本不断增加,这表明网损惩罚系数越增加,系统的无功优化效果越好。调度部门可以根据实际的调度需求,选择合理的惩罚系数实现经济和网损的灵活管控。

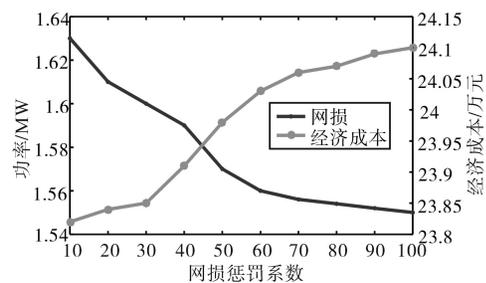


图5 网损惩罚系数对优化结果的影响

Fig.5 Influence of loss penalty coefficient on optimum results

3.2 有效性验证

为验证二阶锥松弛方法准确性,定义误差指标如下式所示:

$$\Delta_{ele} = |P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 - \tilde{I}_{ij,t} \tilde{V}_{ij,t}| \quad (30)$$

$$\Delta_{gas} = |I_{ij,t} - (1/K_{ij})^2 \cdot \varphi_{ij,t}^2| \quad (31)$$

式中: Δ_{ele} 为电网潮流松弛误差; Δ_{gas} 为气网潮流松弛误差。

电网、气网二阶锥松弛误差如图6、图7所示。由图6、图7可知,配电网中各支路各时段的二阶锥松弛误差为 10^{-5} 量级,而气网中各管道各时段的二阶锥松弛误差为 10^{-2} 量级,显然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。

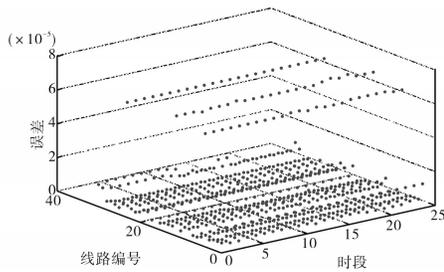


图6 电网潮流松弛误差散点图

Fig.6 Error scatter of power flow relaxation

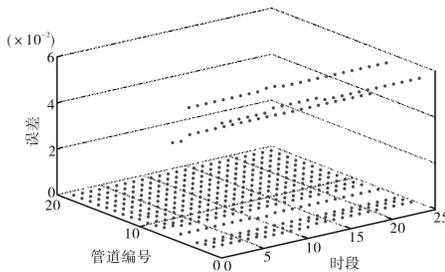


图7 气网潮流松弛误差散点图

Fig.7 Error scatter of gas flow relaxation

4 结论

本文提出一种考虑燃气轮机无功支撑的IEGES有功-无功协调优化模型,对比分析了四种模式下的优化结果和各设备出力情况,并研究了P2G和网损惩罚系数对模型的影响,得到以下结论:1)在IEGES中考虑燃气轮机无功支撑能力和无功优化模型后,系统网损和电压偏差得到有

效降低。2)燃气轮机和P2G的联合调度能提升系统风电消纳能力,降低经济成本。3)合理选择网损惩罚系数能实现经济和网损的灵活管控。4)将二阶锥松弛方法应用于本文模型能保证求解精度和速率。

参考文献

- [1] 郭创新,王惠如,张伊宁,等. 面向区域能源互联网的“源-网-荷”协同规划综述[J]. 电网技术,2019,43(9):3071-3080.
- [2] 毕伟,申建,刘鸣,等. 基于互联网+的综合能源管理平台方案的研究[J]. 电测与仪表,2018,55(S1):80-84.
- [3] Wen Y, Qu X, Li W, *et al.* Synergistic operation of electricity and natural gas networks via ADMM[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5):4555-4565.
- [4] 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.
- [5] 魏震波,黄宇涵,高红均,等. 含电转气和热电解耦热电联产机组的区域能源互联网联合经济调[J]. 电网技术,2018,42(11):3512-3520.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Rueda-Medina A C, Franco J F, Rider M J, *et al.* A mixed-integer linear programming approach for optimal type, size and allocation of distributed generation in radial distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 97:133-143.
- [10] Zhang Y, Hu Y, Ma J, *et al.* A mixed-integer linear programming approach to security-constrained co-optimization expansion planning of natural gas and electricity transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):6368-6378.

收稿日期:2019-12-23

修改稿日期:2020-01-07