

计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价

杜琳,孙亮,陈厚合

(东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要: 电转气设备的应用可实现能源转换,大力消纳可再生能源。电转气设备与燃气轮机的结合,可使能量在电网和天然气系统中双向流动。提出一种配置电转气设备的电-气联合系统优化模型,分析电转气设备的应用对负荷供能率及可再生能源过剩率的影响。介绍了电转气设备的应用场景及联合系统配置模型;设置了相应指标对联合系统进行建模,并以电转气设备、蓄电池和燃气轮机的建设及运维成本最小为目标函数。算例结果表明,电转气技术提升了负荷供能率,降低了弃风水平。

关键词: 电转气; 综合能源系统; 能量形式转换; 多指标评价; 模型

中图分类号: TM 61

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.015

0 引言

综合能源系统内部存在多种耦合方式,其中电力系统与天然气系统一般通过燃气轮机进行耦合。当电网出现输电阻塞时,联合系统对电网进行调度,并针对燃气轮机出力制定天然气供需计划,然后根据天然气系统调度对燃气轮机出力进行控制。这样,天然气就被转化为电能并在联合系统内部进行单向传递^[1-2]。但随着新能源装机容量的不断扩大,弃风、弃光问题日益突出。近年来出现的电转气 P2G(Power to Gas)技术可以将弃风、弃光转化为甲烷并依靠大容量的天然气管网进行储存,缓解了由于新能源装机容量不断扩大而引起的电网输电阻塞问题^[3]。P2G 设备运行过程中还可以实现碳的回收利用,有良好的环境效益。随着 P2G 技术的日趋成熟,P2G 设备与燃气轮机的联合运行实现了能量在电网和天然气系统中的双向交互,电力系统与天然气系统的耦合程度正逐步加深。

近年来,国内外学者已经逐步展开针对综合能源系统运行优化等方面的研究工作。文献[4]引入能源集线器模型,对含有 P2G 设备的综合能源系统进行了规划,评估了 P2G 设备消纳风电的能力。文献[5]建立了综合能源系统耦合模型,提出了基于能源互联的能量流概念。文献[6]建立了一种通用性强、可拓展的含 P2G 设备的综合能源系统调度模型。文献[7]分析了多能源系统运行对电网可靠性的影响。文献[8]基于不同应用场景,建立了含 P2G 的多源储能型微网日前调度模型,分析了 P2G 对新能源的消纳能力。文献[9]提出了电力系统可靠性评价指标,对联合系统运行模式进行了优化。算例结果表明天然气系统管网约束对电网长期调度计划有重要影

响。文献[10]以环境效益、能量损失和综合能源系统运行成本为优化目标建立了多目标优化模型,分析了多能源系统的运行特性。文献[11]使用多级优化模型,研究了 P2G 技术对改善多能源系统运行经济性、碳排放水平及天然气节点压力的影响。文献[12]针对多种能源参与者建立了多目标优化模型,对电-气系统进行多阶段分层规划。

以燃气轮机为耦合设备的综合能源系统规划、协调运行方面的研究,国内外已有大量研究成果^[13-18]。但考虑 P2G 为耦合设备的相关研究还停留在经济性分析层面,本文从新能源消纳角度综合考虑了 P2G、燃气轮机及蓄电池的协同规划。使用燃气轮机和 P2G 设备作为电网与天然气系统的耦合元件,考虑到可再生能源有明显的季节性特征,为了最大限度地消纳可再生能源发电,使用蓄电池与 P2G 进行配合。和 P2G 相比,蓄电池的储能容量小但储能效率高。2 种设备的配合使用可以进行优势互补。首先,对综合能源系统进行建模,并描述了系统约束;然后,以最小化 P2G 建设和运维成本为目标函数,设定多种指标分析了 P2G 潜在的有益影响;最后,使用改进差分进化算法在 MATLAB 软件上编程求解了规划模型并分析了 P2G 对提高消纳风电水平、电网削峰填谷等方面的能力。

1 综合能源系统模型

1.1 天然气管道流量模型

天然气管道流量与管道长度、坡度、管径、室外温度、节点压力等紧密相关,且呈非线性关系^[19-20],具体如下式所示:

$$Q_p = \alpha k \sqrt{|p_a^2 - p_b^2|} \quad \forall a, b \in N_2 \quad (1)$$

其中, Q_p 为天然气管道流量; p_a 和 p_b 分别为管道 a 和 b 的端口压力; α 为天然气流向, $p_a < p_b$ 时 $\alpha = -1$, $p_a \geq p_b$ 时 $\alpha = 1$; k 为天然气管道传输参数,与管道传输

收稿日期:2017-03-08;修回日期:2017-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477027)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477027)

效率、温度、管长、管径、压缩因子等有关; N_2 为天然气系统节点集合。

1.2 压缩机模型

天然气管道内壁不光滑且环境温度与地势的变化会使天然气系统存在一定输气损耗。因此在输气管道沿线合理设置加压站可以弥补一定的输气损耗,保证下游输气压力。为减少经济投入,使用压缩机所在管道的天然气作为驱动压缩机的气源^[6]。

$$f_c = k_c f_i (p_k - p_n) \quad (2)$$

其中, f_c 为压缩机耗量; f_i 为压缩机所在管道流量; k_c 为压缩机单元特征常数,与温度及压缩机效率等有关; p_k 和 p_n 分别为压缩机出口及入口压力。

1.3 P2G 模型

P2G 设备由电解水装置、甲烷化反应装置及加压设备构成。为提高联合系统计算效率,P2G 设备被简化为与功-能转换效率直接相关的模型^[11]。

$$E_o = \eta_{P2G} v P_{P2G} t_{P2G} \quad (3)$$

$$Q_{P2G} = E_o / H_{\text{gas}} \quad (4)$$

其中, E_o 为 P2G 设备输出能值; P_{P2G} 为 P2G 安装容量; η_{P2G} 为 P2G 设备效率; v 为电能与热量单位转换系数; t_{P2G} 为 P2G 运行时长; H_{gas} 为天然气热值; Q_{P2G} 为 P2G 设备输送至天然气的甲烷流量。

1.4 燃气轮机模型

燃气轮机的耗量与其有功出力呈二次函数关系。根据燃气轮机实际有功出力可近似得出其天然气耗量^[16]。

$$Q_{GT} = k_1 P_{GT}^2 + k_2 P_{GT} + k_3 \quad (5)$$

其中, k_1 、 k_2 和 k_3 为燃气轮机耗量系数; P_{GT} 为燃气轮机有功出力; Q_{GT} 为燃气轮机消耗的天然气流量。

1.5 蓄电池模型

考虑蓄电池的充放电特性,可以获得蓄电池在一定时间间隔内的始末荷电状态关系。在一个充放电周期内,蓄电池充电与放电功率满足能量守恒条件^[21]。

$$S_{\text{soc}}(t + \Delta t) = S_{\text{soc}}(t) + \frac{(\mu_{\text{ce}} P_{\text{ce}}(t) - \mu_{\text{de}} P_{\text{de}}(t)) \Delta t}{U_o C_{\text{bc}}} \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T [P_{\text{de}}(t) - \eta P_{\text{ce}}(t)] = 0 \quad (7)$$

其中, $S_{\text{soc}}(t)$ 和 $S_{\text{soc}}(t + \Delta t)$ 分别为蓄电池始、末荷电状态; μ_{ce} 为 t 时刻蓄电池充电状态; μ_{de} 为 t 时刻蓄电池放电状态; $P_{\text{ce}}(t)$ 和 $P_{\text{de}}(t)$ 分别为 t 时刻蓄电池充、放电功率; U_o 为蓄电池端电压; C_{bc} 为蓄电池容量; η 为蓄电池能量转换效率; T 为蓄电池充放电周期。

1.6 电网潮流模型

电网运行需要满足潮流平衡方程,即输入至电网的功率等于电负荷及输电线损耗的功率。

2 综合能源系统优化配置

2.1 目标函数

以 P2G 设备、燃气轮机及蓄电池的建设和运维

成本之和最小为优化配置目标,加入相关分析指标对系统运行进行分析。

$$f = C_{\text{inv}} + C_o \quad (8)$$

其中, C_{inv} 为建设成本,主要由 P2G 设备、燃气轮机和蓄电池的建设成本构成; C_o 为各设备的运维成本。优化变量为各设备功率。

各成本^[21]具体如下:

$$C_{\text{inv}} = \sum_{t=1}^{T_r} \frac{c_{P2G} P_{P2G} + c_c S_n + c_p P_n + c_g P_g}{(1 + d_r)^{t-1}} \quad (9)$$

$$C_o = \sum_{t=1}^{T_r} \frac{(c_{P2Gom} P_{P2G} + c_{gom} P_g) + c_{B1}}{(1 + d_r)^{t-1}} \quad (10)$$

其中, c_{P2G} 为 P2G 单位投资成本; c_c 为蓄电池单位容量成本; c_p 为蓄电池单位功率成本; c_g 为燃气电厂单位投资成本; S_n 为蓄电池额定容量; P_n 为蓄电池额定功率; P_g 为燃气轮机安装容量; c_{P2Gom} 为 P2G 单位运维成本; c_{gom} 为燃气轮机单位运维成本; c_{B1} 为蓄电池初期运维成本; T_r 为规划年限; d_r 为折现率。

2.2 系统约束

联合系统约束由电网、P2G 设备、蓄电池和天然气系统的等式及不等式约束^[22-23]构成。

a. 天然气网络平衡限制。

$$f_s + f_{P2G} + (A + C) f_p = L + D f_c + f_{GT} \quad (11)$$

其中, f_s 为气源注入天然气系统的流量向量; f_p 为天然气管道流量向量; f_{P2G} 为 P2G 设备注入天然气系统的流量向量; f_{GT} 为燃气轮机消耗天然气的流量向量; A 为天然气系统节点-管道关联矩阵; C 为天然气系统节点-压缩机关联矩阵; D 为天然气系统节点与压缩机供气关系矩阵; f_c 为压缩机耗量向量; L 为天然气负荷消耗的天然气流量向量。

b. 天然气管道流量与压力限制。

$$Q_{ab}^{\min} \leq Q_{ab} \leq Q_{ab}^{\max} \quad \forall a, b \in N_2 \quad (12)$$

$$p_a^{\min} \leq p_a \leq p_a^{\max} \quad \forall a \in N_2 \quad (13)$$

其中, Q_{ab} 为天然气管道 a 、 b 节点间流量; $Q_{ab}^{\max}$ 和 $Q_{ab}^{\min}$ 分别为流量上、下限。

c. 蓄电池限制。

$$S_{\text{soc},\min} \leq S_{\text{soc}}(t) \leq S_{\text{soc},\max} \quad (14)$$

$$P_{\text{ce}}(t) \leq P_n \quad (15)$$

$$P_{\text{de}}(t) \leq P_n \quad (16)$$

其中, $S_{\text{soc},\max}$ 和 $S_{\text{soc},\min}$ 分别为蓄电池荷电状态上、下限, $S_{\text{soc},\min}$ 取 0.2, $S_{\text{soc},\max}$ 取 1。

在蓄电池的一个充放电周期内,各单位采样时段蓄电池释放的功率总和不应超过蓄电池的额定容量。

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{de}}(t) \leq S_n \quad (17)$$

d. 燃气轮机运行限制。

$$P_{GT}^{\min} \leq P_{GT} \leq P_{GT}^{\max} \quad (18)$$

$$Q_{GT}^{\min} \leq Q_{GT} \leq Q_{GT}^{\max} \quad (19)$$

其中, $P_{GT}^{\max}$ 和 $P_{GT}^{\min}$ 分别为燃气轮机有功出力上、下限。

e. 电网运行限制。

电网约束为常规约束,需满足节点功率平衡约束、节点电压约束、线路输电容量约束、发电机爬坡约束及相角约束。

f. P2G 设备功率限制。

$$0 \leq P_{P2G} \leq P_{P2G}^{\max} \quad (20)$$

其中, $P_{P2G}^{\max}$ 为 P2G 设备最大运行功率。

g. 可再生能源渗透率限制。

$$0 \leq R_{\text{res}} \leq R_{\text{res}}^{\max} \quad (21)$$

其中, R_{res} 为可再生能源渗透率; $R_{\text{res}}^{\max}$ 为可再生能源最大渗透率。

h. 压缩机限制。

$$\lambda_c^{\min} \leq \frac{P_b}{P_a} \leq \lambda_c^{\max} \quad (22)$$

其中, $\lambda_c^{\max}$ 和 $\lambda_c^{\min}$ 分别为压缩机压缩比上、下限。

2.3 系统指标评价

a. 系统可靠供能率。

以电负荷及天然气负荷受能率作为系统可靠供能率指标^[24],对联合系统供能可靠性进行评价。

$$S_p = 1 - \sum_{t=1}^M \frac{P_s(t)}{P_L(t)} \quad (23)$$

其中, $P_s(t)$ 为负荷短缺量; $P_L(t)$ 为总负荷量; M 为测评时间。

b. 天然气系统消纳率。

可再生能源经 P2G 设备转换可用于供给天然气负荷。SNG(Synthetic Natural Gas)供给的燃气负荷量可用于评价天然气系统消纳风电的水平。

$$S_{\text{gas}} = \sum_{t=1}^M \frac{Q_{\text{SNG}}(t)}{Q_{\text{GASL}}(t)} \quad (24)$$

其中, $Q_{\text{SNG}}(t)$ 为 P2G 生产的 SNG 供给天然气负荷量; $Q_{\text{GASL}}(t)$ 为天然气负荷。

c. 电网削峰填谷率。

以风电为例,在夜间风电过剩时 P2G 设备及蓄电池可以对风电进行储存利用,此时 2 种设备被视为电负荷;在日间用电高峰,蓄电池将储存的电馈入电网以此减少电网总负荷需求,此时蓄电池被视为电源。因此任意一种设备的应用均有益于减小电网峰谷差。

$$S_{\text{ep}} = \left| \sum_{t=1}^M \frac{P_1^{\max}(t) - P_2^{\max}(t)}{P_1^{\max}(t)} \right| \quad (25)$$

其中, $P_1^{\max}(t)$ 为 P2G 设备及蓄电池未投入使用时系统负荷; $P_2^{\max}(t)$ 为 P2G 设备及蓄电池投入使用后的系统负荷。

d. 可再生能源产能过剩率。

新能源发电波动性较大,以风电为例,一般夜间风速较大,此时风电发电水平较高,但夜间电负荷需求较小,容易造成风电弃风^[25]。通过计算可再生能源产能过剩率,可以反映风电弃风水平。

$$S_{\text{ex}} = \sum_{t=1}^M \frac{P_{\text{total}}(t) - P_{\text{use}}(t)}{P_{\text{use}}(t)} \quad (26)$$

其中, $P_{\text{total}}(t)$ 为可再生能源总发电功率; $P_{\text{use}}(t)$ 为电负荷(P2G 设备、一般电负荷和蓄电池)利用的可再生能源功率。

2.4 模型求解方法

根据所提规划模型可知,综合能源系统为混合整数非线性优化问题。为解决上述问题,在此采用改进差分进化算法^[26]对目标函数进行优化。使用遍历方法以经济最优选取最佳安装位置。规划模型求解流程图如图 1 所示。

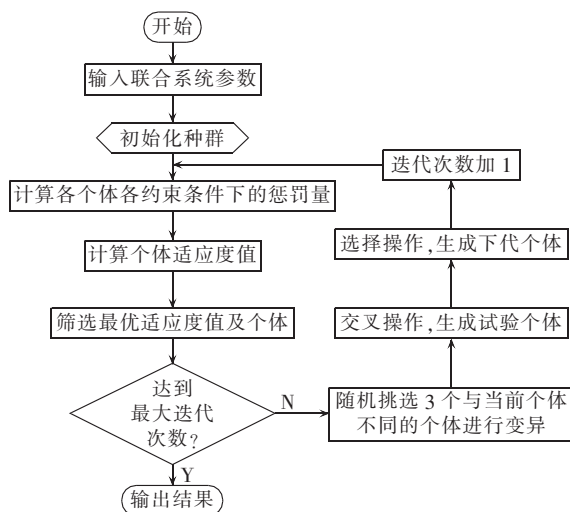


图 1 规划模型求解流程图

Fig.1 Flowchart of planning model solver

3 算例分析

采用修改后的 IEEE 14 节点系统和一个气网测试系统分析论证所提出的 P2G 技术对联合系统的影响。储气设备容量 180 km^3 。将 IEEE 14 节点系统中 4 台燃煤发电机用燃气发电机代替。其中风力发电机装机容量为 925 MW 。气源点供气上限为 1250 km^3 ,供气下限为 750 km^3 。为简化计算,在此规定 00:00—06:00 气源点按供气下限供气,其余时间按供气上限供气。年电负荷增长率 1.5% ,年天然气负荷增长率 0.5% ,天然气热值为 39.5 MJ/m^3 ,压缩机压缩比下限为 1.0 ,上限为 1.3 。折现率 7% 。系统规划周期分为 2 个规划阶段,共 8 a。系统参数见文献^[13],算例参数^[13,24,27]如表 1 所示。

电网和气网结构图如图 2 所示,电网和气网的每一个节点均耦合在一起^[13]。

日发电量及负荷需求曲线如图 3 所示。

结合上述负荷需求与各机组发电曲线,本文对不同风电渗透率下的 P2G 设备和蓄电池进行规划。

方案 1:风电渗透率最大为 40% ^[28]时,未安装 P2G 设备。优化后,第 1 年在节点 3、4 各安装 47 MW

表 1 算例参数
Table 1 Parameters for case study

设备	效率/ %	建设成本	年运维成本/ ($\text{€}\cdot\text{kW}^{-1}$)	寿命/a
P2G	60	1500 $\text{€}/\text{kW}$	30	20
燃气轮机	30	882 $\text{€}/\text{kW}$	15	40
蓄电池	95	容量成本:186 $\text{€}/(\text{kW}\cdot\text{h}^{-1})$ 功率成本:242 $\text{€}/\text{kW}$	28	10

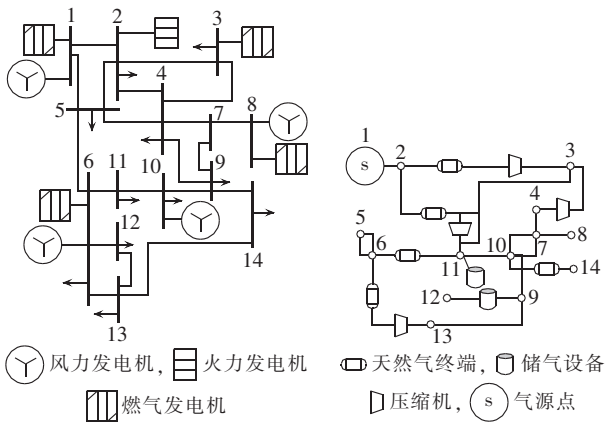


图 2 电气联合系统结构

Fig.2 Structure of electricity-gas combination system

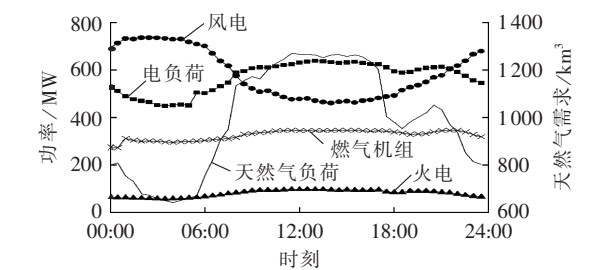


图 3 日发电量及负荷需求曲线

Fig.3 Daily power generation and load curves

燃气轮机,在节点 1 安装 7 MW 蓄电池;第 6 年在节点 8、10 各安装 55 MW 燃气轮机,在节点 8 安装 5 MW 蓄电池。

方案 2:风电渗透率最大为 40%时,安装 P2G 设备和蓄电池。优化后,第 1 年在节点 1、6 安装 P2G 设备各 20 MW,蓄电池各 18 MW,在节点 1 安装燃气轮机 32 MW;第 6 年在节点 8、10 安装 P2G 设备各 25 MW,蓄电池各 27 MW。

方案 3:风电渗透率最大为 70%^[28]时,安装 P2G 设备和蓄电池。优化后,第 1 年在节点 1、6 安装 P2G 设备各 30 MW,蓄电池各 20 MW;第 7 年在节点 8、10 安装 P2G 设备各 35 MW,蓄电池各 20 MW。

3 种方案的指标计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知,由于燃气轮机发电效率较低,方案 1 需要配置较大容量燃气机组来满足电力负荷需求,且白天风电有限,负荷用电高峰时需要燃气机组出力,系统没有削峰填谷的能力。白天天然气系统负荷需求也处于较高水平,此时燃气机组的使用将加剧天然气管网输气阻塞,降低了天然气系统的可靠性。

表 2 3 种方案指标结果
Table 2 Optimization results of three cases

方案	天然气网 日消纳率	电网日削峰 填谷率	可再生能源 日产能过剩率	成本/ €
1	0	0	0.59	$2.397\,3480\times10^8$
2	0.099	0.132	0.15	$2.982\,9665\times10^8$
3	0.122	0.181	0	$2.803\,4243\times10^8$

和方案 1 相比,方案 2 的成本较高,但电网和天然气系统都能充分消纳风电。蓄电池在夜间进行充电,在白天峰荷时段作为电源进行放电,有削峰填谷的能力。P2G 设备生产的甲烷可以满足部分天然气负荷需求,提高了联合系统的可靠性。且 P2G 设备运行时可回收大量二氧化碳,有良好的环境效益。

方案 3 说明风电渗透率越高,联合系统的消纳能力越明显,系统可靠性越高。和方案 2 相比,风电可充分满足电负荷需求,减少了燃气轮机的使用,降低了系统建设成本。

由方案 2 和方案 3 的储能设备安装结果可知,风电渗透率为 40%时,蓄电池安装容量占比较大,当风电允许渗透率增加到 70%时,整体储能设备安装容量增加,此时 P2G 设备安装容量占比较大。说明在风电渗透率较小时,储能效率比储能容量更重要,储能设备主要用于电网调度;当风电渗透率较大时,仅电网本身并不能消耗过多风电,此时储能容量显得更为重要。当贴现率为 9%时^[21],蓄电池等值年成本为 94.69 $\text{€}/(\text{MW}\cdot\text{h})$,P2G 为 194.32 $\text{€}/(\text{MW}\cdot\text{h})$,因此在设备寿命周期内,单位容量及单位运行时长下的蓄电池有明显的成本优势。但结合上述案例中不同风电渗透率条件下 2 种储能设备的安装容量占比变化情况,根据等值年成本计算公式可以得知,风电渗透率越高,适用于长期大容量储能的 P2G 成本效益越明显。

考虑燃气轮机、P2G 设备及蓄电池设备安装和运维成本较高,以上 3 种方案设备安装量均未超出负荷最大需求量。在目前风电最大允许渗透条件下,考虑到风电消纳、电网峰谷差及环境效益,方案 2 应该作为最优方案。若未来允许风电高比例并网,则方案 3 将为最优选择。

设备建设周期完成后,电网和天然气系统的可靠供能率分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4 和图 5 可知,当风电渗透率为 40%时,方案 1 电网可靠供能率较低,在负荷需求较大的白天需要削减负荷来保证电网安全运行。方案 2 和方案 3 极大地改善了电网的可靠供能水平。当不考虑风电电能质量及火电机组和燃气轮机的启停成本时,风电渗透率增大到 70%情况下,电网可靠供能率达到 100%。由于 P2G 设备生产的甲烷可以直接注入天然气管道,且风电渗透率越高,生产的甲烷越多,

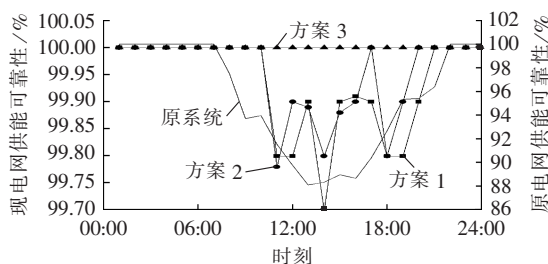


图 4 电网可靠供能率

Fig.4 Energy-supply reliability curves of power grid

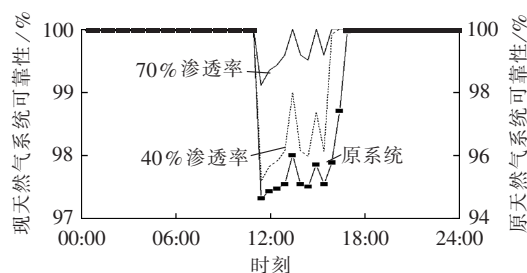


图 5 天然气系统可靠供能率

Fig.5 Energy-supply reliability curves of natural gas system

天然气系统可靠供能率越高。

方案 1 与方案 2 的电负荷需求曲线如图 6 所示。

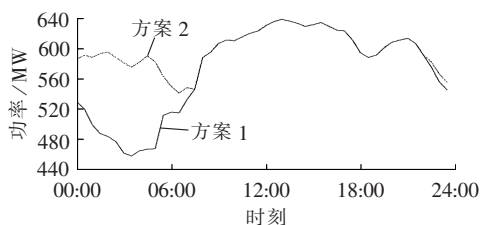


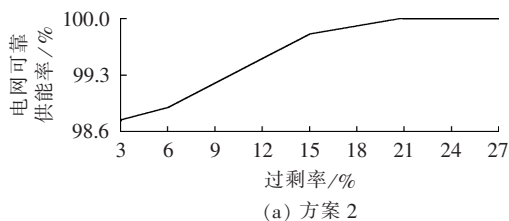
图 6 电负荷需求曲线

Fig.6 Power load demand curves

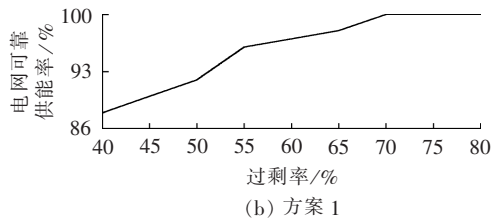
由图 6 可知,当风电渗透率为 40% 时,P2G 的应用在夜间提高了电负荷需求,减小夜间风电对电网的冲击;当风电渗透率为 70% 时,日间高峰负荷需求基本可以被风电满足,电网此时暂时不用考虑调峰问题,因此不考虑方案 3。

风电渗透率为 40% 时电网可靠供能率与风电产能过剩率的关系如图 7 所示。

由图 7 可知,在风电渗透率为 40% 时,随着风电产能过剩率的增大,联合系统的可靠性也在提升。方案 1 由于未安装 P2G 设备,夜间仅依靠蓄电池对风电进行消纳,风电消纳率较低。因此,方案 1 在风电严重过剩时才能进入 100% 可靠状态,即电负荷需求被充分满足。方案 2 安装了 P2G 设备,因此系统在能源过剩率相对较小的情况下便进入 100% 可靠状态。根据系统运行参数可知,风电渗透率为 70% 时电力负荷需求可以充分得到满足,且储能设备装机容量较大,理论上可再生能源可以全部被利用。因此,不进行能源过剩率计算。



(a) 方案 2



(b) 方案 1

图 7 方案 2 和方案 1 能源过剩率与电网可靠供能率关系

Fig.7 Relationship between energy excess rate and grid energy-supply reliability for Case 2 and 1

4 结论

本文建立了综合能源系统 P2G 优化配置模型,通过求解电网削峰填谷率、天然气系统消纳率等指标,验证了 P2G 对综合能源系统的多种有益影响。P2G 和蓄电池 2 种储能设备均可提高风电利用率,减少弃风。通过不同渗透率下储能设备的配置结果可以看出,P2G 设备有较大的储能容量,适用于长期储能;蓄电池储能效率高,适用于储能频繁的短时储能系统中,对辅助电网调度有一定作用。P2G 运行过程中可以回收利用大量的二氧化碳,有较好的环境效益。

在今后的工作中,将考虑常规发电机组启停、系统网损,研究综合能源系统的协同调度方案。

参考文献:

- [1] 孙国强,陈胜,郑玉平,等. 计及电气互联能源系统安全约束的可用输电能力计算[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):26-32.
SUN Guoqiang, CHEN Sheng, ZHENG Yuping, et al. Available transfer capacity calculation considering electricity and natural gas coupled energy system security constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 26-32.
- [2] 邵成成,王锡凡,王秀丽,等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报,2016,36(14):3817-3828.
SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3828.
- [3] HEINISCH V, TUAN L A. Effects of power-to-gas on power systems: a case study of Denmark [C]//Proceedings of IEEE Power Tech Eindhoven. Eindhoven, Netherlands: [s.n.], 2015: 1-6.
- [4] 黄国日,刘伟佳,文福拴,等. 具有电转气装置的电气混联综合能源系统的协同规划[J]. 电力建设,2016,37(9):1-13.
HUANG Guori, LIU Weijia, WEN Fushuan, et al. Collaborative planning of integrated electricity and natural gas energy systems with power-to-gas stations[J]. Electric Power Construction, 2016,

- 37(9):1-13.
- [5] MARTINEZ-MARES A,FUERTE-ESQUIVEL C. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(4):2156-2166.
- [6] 李杨,刘伟佳,赵俊华,等. 含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J]. 电网技术,2016,40(12):3680-3688.
LI Yang,LIU Weijia,ZHAO Junhua,et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation [J]. Power System Technology,2016,40(12):3680-3688.
- [7] LI T,EREMIA M,SHAHIDEPOUR M. Interdependency of natural gas network and power system security[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(4):1817-1824.
- [8] 陈沼宇,王丹,贾宏杰,等. 考虑P2G多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[J/OL]. [2017-01-18]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2107.TM.20161130.0855.011.html>.
CHEN Zhaoyu,WANG Dan,JIA Hongjie,et al. Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system[J/OL]. [2017-01-18]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2107.TM.2016-1130.0855.011.html>.
- [9] NEYESTANI N,YAZDANI-DAMAVANDI M,SHAFIE-KHAH M. Stochastic modeling of multi-energy carriers dependencies in smart local networks with distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(4):1748-1762.
- [10] 魏大钧,孙波,赵峰,等. 小型生物质沼气冷热电联供系统多目标优化设计与运行分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(12):7-12.
WEI Dajun,SUN Bo,ZHAO Feng,et al. Multi-objective optimization design and operation analysis of a small biomass biogas combined cooling heating and power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(12):7-12.
- [11] 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.
- [12] 王一家,董朝阳,徐岩,等. 利用电转气技术实现可再生能源的大规模存储与传输[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3586-3595.
WANG Yijia,DONG Zhaoyang,XU Yan,et al. Enabling large-scale energy storage and renewable energy grid connectivity:a power-to-gas approach[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3586-3595.
- [13] QIU J,DONG Z Y,ZHAO J H,et al. Multi-stage flexible expansion co-planning under uncertainties in a combined electricity and gas market[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(4):2119-2129.
- [14] GUANDALINI G,CAMPANARI S,ROMANO M C. Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatch ability:energy and economic assessment[J]. Applied Energy,2015(147):117-130.
- [15] OJEDA-ESTEYBAR D M,RUBIO-BARROS R G,ANO O. Integration of electricity and natural gas systems identification of coordinating parameters[C]//Proceedings of IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition-Latin America (PES T&D-LA). Medellin,Colombia:[s.n.],2014:1-8.
- [16] 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):2942-2950.
- 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):2942-2950.
- [17] GEIDL M,ANDERSSON G. Optimal coupling of energy infrastructures[C]//Proceedings of 2007 IEEE Lausanne Power Tech. Lausanne,Switzerland:[s.n.],2007:1398-1403.
- [18] KIENZLE F,TRUTNEVTE E,ANDERSSON G. Comprehensive performance and incertitude analysis of multi-energy portfolios [C]//Proceedings of 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference. Bucharest,Romania:[s.n.],2009:1-6.
- [19] SHAHMOHAMMADI A,MORADI-DALVAND M,CHASEMI H,et al. Optimal design of multicarrier energy systems considering reliability constraints[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(2):878-886.
- [20] JENTSCH M,TROST T,STERNER M. Optimal use of power-to-gas energy storage systems in an 85% renewable energy scenario[J]. Energy Procedia,2014(46):254-261.
- [21] 向育鹏,卫志农,孙国强,等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术,2015,39(1):264-270.
XIANG Yupeng,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system in distribution network[J]. Power System Technology,2015,39(1):264-270.
- [22] 卫志农,张思德,孙国强,等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):9-15.
WEI Zhinong,ZHANG Side,SUN Guoqiang,et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(15):9-15.
- [23] 赵波,包侃侃,徐志成,等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J]. 中国电机工程学报,2015,35(21):5465-5474.
ZHAO Bo,BAO Kankan,XU Zhicheng,et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(21):5465-5474.
- [24] 王晶,陈江斌,束洪春. 基于可靠性的微网容量最优配置[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):120-127.
WANG Jing,CHEN Jiangbin,SHU Hongchun. Microgrid capacity configuration optimization based on reliability[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):120-127.
- [25] 石庆均. 微网容量优化配置与能量优化管理研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
SHI Qingjun. Research on optimal sizing and optimal energy management for microgrid[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2012.
- [26] 吴亮红,王耀南,陈正龙. 求解混合整数非线性规划问题的改进差分进化算法[J]. 小型微型计算机系统,2007,28(4):666-669.
WU Lianghong,WANG Yaonan,CHEN Zhenglong. Modified differential evolution algorithm for mixed integer nonlinear programming problems[J]. Journal of Chinese Computer Systems,2007,28(4):666-669.
- [27] 刘春阳,王秀丽,刘世民,等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):29-36.
LIU Chunyang,WANG Xiuli,LIU Shimin,et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid[J]. Electric Power

Automation Equipment, 2015, 35(10): 29-36.

- [28] BELDERBOS A, DELARUE E, D'HAESELEER W. Possible role of power-to-gas in future energy systems[C]// Proceedings of the 12th International Conference on the European Energy Market (EEM). Lisbon, Portugal: [s.n.], 2015: 1-5.

作者简介:

杜琳(1992—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研



杜琳

究方向为电力系统低碳电力技术(E-mail: 491470503@qq.com);

孙亮(1973—),男,吉林吉林人,副教授,硕士,主要研究方向为电力系统优化运行(E-mail: sunliang@nedu.edu.cn);

陈厚合(1978—),男,吉林吉林人,教授,博士,主要研究方向为电力系统安全性(E-mail: chenhouhe@126.com)。

Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning

DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: P2G(Power to Gas) facility can be applied to realize the energy conversion for the accommodation of massive renewable energy and the combination of P2G facility and gas turbine makes the bidirectional energy flow between power grid and natural gas network possible. An optimization model is proposed for the electricity-gas combination system with P2G planning and the impacts of P2G application on the energy acceptance rate of loads and the excess rate of renewable energy are analyzed. The P2G application cases and the combination system optimization model are introduced, the corresponding indexes for system modelling are set, and the minimum total cost of construction and maintenance for P2G facility, battery and gas turbine is taken as the objective. Results of case study show that, P2G technology improves the rate of energy-supply to loads and reduces the level of wind-power curtailment.

Key words: power to gas; integrated energy system; energy form conversion; multi-index evaluation; models