

风力发电产氢注入天然气管网仿真计算

张晓光¹ 叶 茂² 雷马平²

1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100;
2. 中国兵器工业导航与控制技术研究所, 北京 100089

摘 要:为评估利用风力发电的富裕电力制氢并注入天然气管网存储的可行性,建立了耦合风力发电、电解水制氢以及天然气管网计算的仿真模型,对管网储氢进行了静态与动态仿真分析。在保证用户节点能量需求的前提下,提出了定压力变流量和变压力定流量的天然气管网输运策略。静态仿真结果表明,两种策略下天然气管网均可实现氢气存储,且各用户节点的天然气消耗量均有降低。由于变压力定流量策略下管网天然气消耗量降低较显著,基于该输运策略提出了储配气站压力动态调整方法;动态仿真结果表明,该动态调整方法在节省管网储配气站天然气输入的同时,基本可以满足用户节点的能量需求。通过分析可知,变压力定流量策略可兼顾用户节点的能量需求和管网天然气耗量降低,缓解“弃风限电”问题,可供类似电厂参考借鉴。

关键词:风力发电;天然气管网;储氢;弃风限电

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.05.003

The Simulation of Natural Gas Networks Under Hydrogen Injection from a Wind Farm

Zhang Xiaoguang¹, Ye Mao², Lei Maping²

1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an, Shaanxi, 710100, China;
2. Navigation and Control Technology Institute, China North Industries Group Corporation, Beijing, 100089, China

Abstract: In order to improve the influence of wind curtailment on waste of electric power resource, we preliminarily analyzed the feasibility of natural gas networks under hydrogen injection from a wind farm by evaluating the ability of networks on storing injected hydrogen. Based on the analytical model coupled with wind power generation, hydrogen production from electrolysis of water and calculation on natural gas networks, we performed steady and unsteady simulation analysis of hydrogen storage in gas networks to evaluate the feasibility of this method. Two strategies, constant-pressure-variable-flow model and variable-pressure-constant-flow model, are proposed to satisfy energy needs of user nodes. According to the results of the steady simulation, both of the two strategies could achieve the aim of hydrogen storage in networks and decrease the consumption of natural gas of user nodes. Because results of steady simulations shows that the variable-pressure-constant-flow model has advantages on saving natural gas, a strategy for dynamic adjustments on input points of supply is proposed. Results of unsteady simulations show that this strategy can basically fulfill the needs of user nodes. Through analysis, the variable-pressure-constant-flow

收稿日期:2019-04-21

作者简介:张晓光(1986-),男,山西原平人,高级工程师,工学博士,主要从事能源与动力工程的研究工作。

strategy could not only meet the energy requirement of user nodes, but also help to decrease the consumption of natural gas in networks, which promotes the energy conversion between electricity from wind curtailment and hydrogen energy in the networks, and provides references for similar power plants.

Keywords: Wind power generation; Natural gas networks; Hydrogen storage; Wind curtailment

0 前言

近年来,我国风力发电延续平稳快速增长势头,装机容量和发电量不断攀升。随着我国对清洁能源需求的持续增加,风力发电具有更加广阔的发展前景。但风力发电也有受天气影响的明显缺点,风力发电量的不稳定性对电力系统调峰能力构成了严重挑战。因此,很多时候我国不得已采用“弃风限电”策略,造成了风电的较大浪费^[1-3]。如何解决“弃风限电”难题对风力发电行业至关重要。

针对上述问题,将风力发电产氢注入天然气管网存储具有解决风力发电较大波动性的可能,即基于天然气管网,利用富裕风电电解水产氢,并将之注入到管网中储存,实现部分替代天然气的作用,进而实现富裕风电的能量转换和存储。Haeseldonckx D 等人分析了天然气管网储氢的可行性及市场经济性^[4-5]。Tabkhi F 等人仿真分析了储氢对天然气管网相关特性的影响,指出储氢会造成管网能量特性降低^[6]。Melaina M W 等人详细说明了天然气管网储氢所面临的兼容性、安全性、泄漏量及分离提取技术等关键问题^[7-9]。黄明、吴嫦等人通过计算指出提高输送压力可保证储氢管道输出功率不变^[10-11]。Guandalini G 等人基于电解水产氢和单根管路模型,对天然气管网储氢技术可行性进行了分析^[12-14]。

以上研究主要对天然气管网储氢能力进行宏观分析,缺少对实际复杂管网情况的考虑。本文基于实际天气数据、风力发电模型、电解水制氢模型及实际复杂天然气管网模型,完成了富裕风电产氢注入天然气管网的建模仿真,考察了产氢注入对用户节点的气体组分、压力、流量、运输功率的影响;在保证用户节点能量需求的前提下,将储氢工况下管网整体的天然气节省量作为可行性指标,从能量转化角度评估天然气管网储存富裕风电产氢的可行性。

1 仿真模型与计算方法

1.1 富裕风电产氢注入天然气管网仿真模型

为从能量转换角度评估富裕风电产氢注入天然气管网的可行性,进行静态和动态仿真。静态仿真仅针对天然气管网静态储氢能力进行分析,而动态仿真则在考虑天气因素和当地电网容量的基础上进行弃风量、电解水产氢量和天然气管网储氢动态仿真计算,仿真流程见图1。

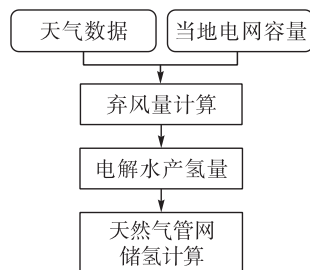


图1 富裕风电产氢注入天然气管网动态仿真流程图

1.2 弃风量计算模型

弃风量 W_{wpc} 计算公式^[15]:

$$W_{wpc} = \begin{cases} W_{wp} - W_{rl} & W_{wp} > W_{rl} \\ 0 & W_{wp} \leq W_{rl} \end{cases} \quad (1)$$

式中: W_{wpc} 为弃风量, W ; W_{wp} 为风力发电量, W ; W_{rl} 为当地电网最大接入负载, W 。

W_{rl} 一方面由电网实际设计参数确定,另一方面受实际政策对传统发电方式倾斜的影响。本文不考虑政策调整的影响,将 W_{rl} 视为仅与电网设计相关的固定值。 W_{wp} 主要与当地天气状况和风电场发电能力有关。当地天气数据包含温度、湿度和风速等,这里简化处理,仅将风速视为主要影响参量。风电涡轮输出功率 W_{wt} 与风速 v_w 的关系见图2。风电涡轮启动风速 v_{ci} 、额定风速 v_r 和停机风速 v_{co} 分别为 3.5、14 和 25 m/s。 W_{wt} 和 v_w 在启动风速至额定风速区间内呈非线性关系,为简化计算,将其线性化处理为式(2)^[15]:

$$W_{wt} = \begin{cases} W_{wtr} & v_r < v_w < v_{co} \\ \frac{v_w - v_{ci}}{v_{co} - v_{ci}} \cdot W_{wtr} & v_{ci} < v_w \leq v_r \\ 0 & v_w \geq v_{co}, v_w \leq v_{ci} \end{cases} \quad (2)$$

式中: W_{wtr} 为风电涡轮额定输出功率, W 。

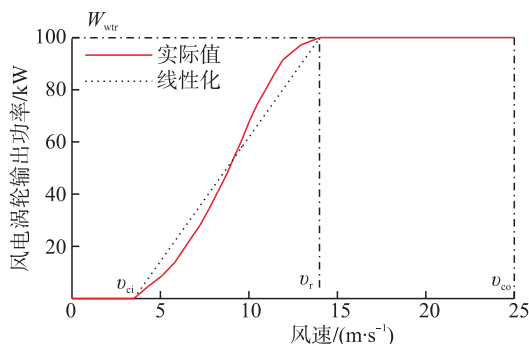


图2 典型风电输出曲线图

1.3 电解水产氢计算模型

电解水产氢技术主要有 Alkaline 和 PEM(质子交换膜)两种。Alkaline 是目前最成熟的工业化制氢技术,但因安全原因无法在低于额定功率 20% 以下工作,而风力发电具有随机性和波动性特点,因此本文不考虑 Alkaline 技术。PEM 是近期发展的制氢技术,虽然效率较 Alkaline 低,但可在全功率范围内工作而不产生安全问题。PEM 产氢计算模型采用 Electrolyzer model A,见式(3)^[16-17]。该模型不考虑温度和压力影响,精度对于工程计算足够。

$$\begin{cases} n_{H_2} = \frac{n_c I_{EZ}}{2F} \eta_F \\ \eta_F = 96.5 \exp\left(\frac{0.09}{I_{EZ}} - \frac{0.09}{I_{EZ}^2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: n_{H_2} 为产氢量, mol/s; n_c 为 PEM 组元数; I_{EZ} 为 PEM 电解电流, A; F 为 Faraday 常数, C/mol; η_F 为 Faraday 效率。

1.4 天然气管网流动过程仿真模型

天然气管网流动过程仿真模型包含连续方程、动量方程、能量方程及气体状态方程^[18]:

$$\begin{cases} A \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho w A) = 0 \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial \tau} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial x} = -g \rho \frac{ds}{dx} - \frac{\lambda}{d} \frac{w^2}{2\rho} \\ -\frac{\partial Q}{\partial x}(\rho w A) = \frac{\partial}{\partial \tau}[(\rho A)\left(u + \frac{w^2}{2} + gs\right)] + \\ \frac{\partial}{\partial x}[(\rho w A)\left(u + \frac{w^2}{2} + gs\right)] \\ p = Z\rho RT \end{cases} \quad (4)$$

式中: A 为管道横截面积, m^2 ; d 为管道内径, m ; τ 为时间, s ; s 为各路高程, m ; λ 为管段水力摩阻系数; g 为重力加速度, m/s^2 ; x 为距管段起点的距离, m ; Q 为在 $[0, x]$ 管段中气流流向周围环境的散热量, W ; p 为气体绝对压力, Pa ; ρ 为气体密度, kg/m^3 ; w 为气体流速, m/s ; u 为单位质量气体内能, J/kg ; T 为气体绝对温度, K ; R 为通用气体常数, $J/(kg \cdot K)$; Z 为气体压缩因子。

这里,忽略高程 s 和散热量 Q 的影响,认为管网均处于同一水平面,且其中气体温度保持均一。气体压缩因子 Z 为压力、温度及组分的函数,由于管网储氢率较低($\leq 20\%$),可将 Z 视为常量,这里取 0.99。

由于氢气注入会改变管网气体组分,进而影响其能量特性,这里引入输运功率 W_{Tran} 以综合描述气体能量特性^[10]:

$$W_{Tran} = Q_N H_N \quad (5)$$

式中: W_{Tran} 为输运功率, W ; Q_N 为管道标况(101 325 Pa, 288 K)等效流量, m^3/h ; H_N 为标况气体热值, J/m^3 。

引入理论节省天然气标况等效流量, Q_{Save_theory} 和实际节省天然气标况等效流量, Q_{Save_real} , 以评估管网储氢的

实际可行性,见(6)、(7):

$$Q_{Save_theory} = \frac{(Q_{H_2})_N H_{H_2}}{H_{Gas}} \quad (6)$$

$$Q_{Save_real} = Q_{Gas0} - Q_{Gas_H_2} \quad (7)$$

式中: $(Q_{H_2})_N$ 为管网中氢气标况等效总流量, m^3/h ; Q_{Gas0} 、 $Q_{Gas_H_2}$ 分别为管网中非储氢工况、储氢工况天然气标况等效总流量, m^3/h ; H_{H_2} 、 H_{Gas} 分别为氢气、天然气标准热值, J/m^3 。

可见, Q_{Save_theory} 的物理意义为管网注入氢气总热值换算成等热值的天然气流量,而, Q_{Save_real} 为非储氢工况与储氢工况管网注入天然气的流量差值。仿真计算中,须以保持用户节点的能量需求 W_{Tran} 为前提,以 Q_{Save_theory} 和 Q_{Save_real} 来评价管网储氢的优劣。

本文天然气管网流动过程仿真计算采用 Pipeline Studio 软件中的 TGNET 模块,验证算例管网模型见图 3^[19]。所采用的天然气主要组分为 96.5% (体积分数) 甲烷、1.82% 乙烷、0.46% 丙烷、0.10% 异丁烷、0.10% 正丁烷等。分别设置管道效率 100% 和 90%, 计算各用户节点压力见图 4, 与文献结果均较为接近,且分布变化趋势一致,最大偏差 $\leq 2.8\%$, 表明本文所采用的天然气管网储氢仿真计算方法具有较高精度。为进一步提高仿真精度,将管道效率设为 96%, 使最大偏差 $\leq 1.5\%$ 。

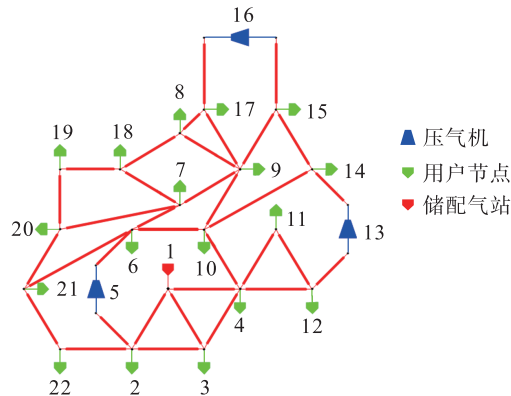


图 3 仿真实验算例管网模型图

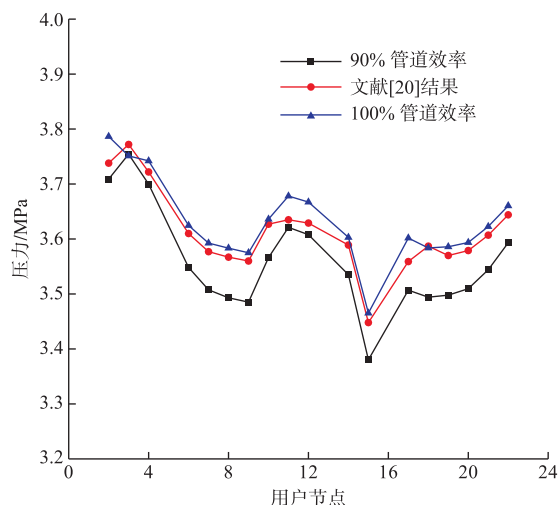


图 4 仿真实验算例计算结果曲线图

2 仿真结果与分析

2.1 静态仿真分析

静态仿真主要对稳态储氢工况下天然气管网的流量、压力、组分和热值等参数进行计算,初步开展管网基本性能和储氢影响分析,为风力发电与管网储氢联合动态仿真奠定基础。计算过程为:

- 1) 非储氢管网静态仿真,获得各用户节点的天然气组分、压力和流量等基本参数。
- 2) 保证管网输入总能量不变,设置氢气输入量进行仿真,获得各用户节点的气体组分、压力和流量等基本参数。
- 3) 详细对比1)、2)步骤中各用户节点输运功率,对管网天然气输入量和氢气输入量进行调整,反复迭代。
- 4) 重复步骤3)直至总输运功率差 $\leq 0.5\%$,各用户节点最大输运功率差 $\leq 1.0\%$,计算完成。

天然气管网流量会随着用户消耗量的改变而调整,并不是一个恒定值。这里,重点分析管网低谷和高峰两种情况,总流量分别为最大流量的33%和100%。

静态仿真采用的管网模型为中压区域管网,储配气站出口最大压力0.5 MPa,允许最低压力0.2 MPa,见图5。该管网包括4个储配气站点、8个集中用户节点,其中Supply 0001 /0002 为天然气输入点,Supply 0003 /0004 为氢气输入点。非储氢工况下,Supply 0001 /0002 出口压力均为0.4 MPa,天然气流量分别为961 m³/h 和706 m³/h;储氢工况下,Supply 0003 /0004 氢气输入量按照 Supply 0001 /0002 天然气输入量比值进行分配。

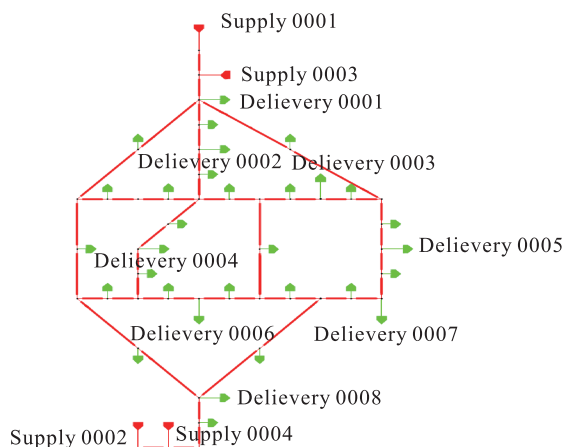


图5 静态储氢仿真计算采用的管网模型图

氢气注入天然气管网可能导致管道材料氢脆和氢气漏率大等问题。管道储氢率 φ_{H_2} （氢气所占体积分数） $\leq 22\%$,氢脆问题可不予考虑, $\varphi_{H_2} \leq 20\%$ 则漏率可忽略^[7]。此外,考虑到燃气的互换性,要求储氢后气体的华白数和燃烧势变化幅度为 $\pm 10\%$,这就要求储氢率 $\varphi_{H_2} \leq 17\%$ ^[10]。综合上述因素,为充分考虑储氢率对管

网的影响,本文选取 $\varphi_{H_2} \leq 20\%$ 。

天然气和氢气标况热值分别为38.42、12.08 MJ/m³。可见,如果管网压力保持不变,掺混氢气必然造成单位体积下燃气能量特性的降低。为保持用户节点的总热值不变,可考虑采用定压力变流量策略和变压力定流量两种管道运输策略。

2.1.1 定压力变流量策略静态仿真分析

保持 Supply 0001 /0002 出口压力0.4 MPa,通过增加天然气流量的方式来保证用户节点能量需求,进行定压力变流量策略静态仿真分析。低谷情况下不同用户节点所需流量随管网储氢率的变化见图6。由图6可见,随着储氢率不断增加,各用户节点所需流量也不断增加,如储氢率上升至17.6%,各用户节点流量增加约13.7%~13.8%。低谷情况下天然气节省量随管网储氢率的变化见图7,由图7可见,随着储氢率增加, Q_{Save_real} 也在不断增加,但其数值略低于 Q_{Save_theory} ,当储氢率为

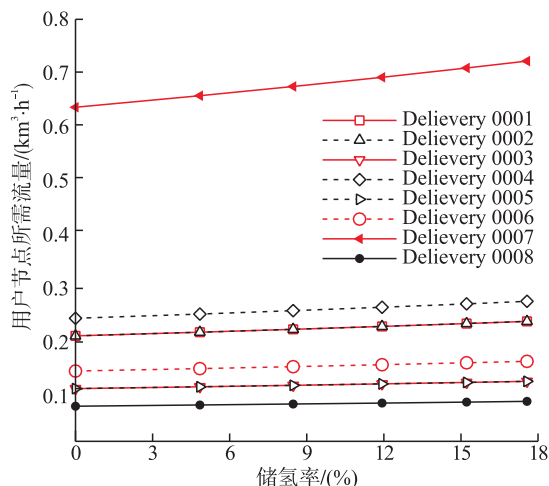


图6 采用定压力变流量策略时低谷情况下不同用户节点所需流量随管网储氢率的变化曲线图

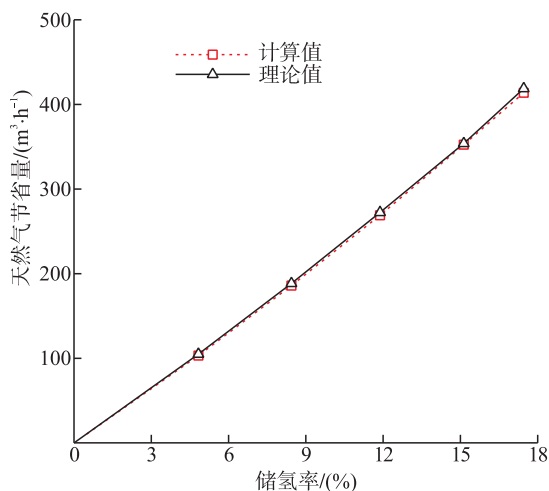


图7 采用定压力变流量策略时低谷情况下天然气节省量随管网储氢率的变化曲线图

17.6% 时, $Q_{\text{Save_real}}$ 达到了 $413.8 \text{ m}^3/\text{h}$, 表明天然气管网具有一定的储氢能力, 并可实现天然气能源的节省。

高峰情况下不同用户节点所需流量随管网储氢率的变化见图 8, 与低谷情况类似, 各用户节点所需流量也随储氢率增加而增加。储氢率上升至 17.5% 时, 各用户节点流量增加比例差异较大: 最高为 Delivery 0007, 达到 14.8%; 最低为 Delivery 0001, 仅 13.8%。这主要是因为随着天然气流量增加, 有限的管网运输能力阻碍了管网中氢气组分的均匀分布见图 9。图 9 表明, 高峰情况下 $Q_{\text{Save_real}}$ 也随储氢率增加而增加。储氢率增加至 17.5% 时, 管网天然气节省量为 $1\,108.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。但在较高储氢率情况下, $Q_{\text{Save_real}}$ 明显低于 $Q_{\text{Save_theory}}$, 且差值随储氢率增加而增大。这是因为在储配气站出口压力保持不变的情况下, W_{Tran} 随着储氢率增加而降低, 为保证节点用户热值需求, 须进一步增加天然气输入量, 从而导致 $Q_{\text{Save_real}}$ 低于 $Q_{\text{Save_theory}}$; 而管网运输能力有限, 能量损失随天然气流量增加而加剧, 进一步放大了

$Q_{\text{Save_real}}$ 与 $Q_{\text{Save_theory}}$ 的差值。综上, 受制于管网输运能力和能量损失, 定压力变流量策略在天然气流量较大情况下会削弱管网天然气节省能力。

2.1.2 变压力定流量策略静态仿真分析

保持 Supply 0001 /0002 出口天然气流量不变, 通过增加出口压力的方式来保证用户节点能量需求, 进行变压力定流量策略静态仿真分析。低谷情况下天然气输入点压力随管网储氢率的变化见图 10。由图 10 可见, Supply 0001 /0002 压力均随储氢率增加而升高, 且差别微小。低谷情况下管网天然气节省量随储氢率的变化见图 11, 由图 11 可见, $Q_{\text{Save_real}}$ 基本与储氢率正相关。当储氢率达到 20% 时, 管网天然气节省量为 $488.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。计算表明, $Q_{\text{Save_real}}$ 略高于 $Q_{\text{Save_theory}}$, 一方面是因为管网输运功率 W_{Tran} 随压力升高而增大, 另一方面则是因为管路能量损失有所下降, 各用户节点压力随之升高。

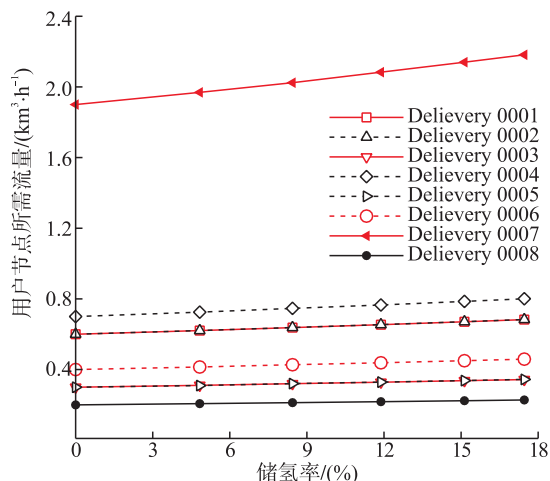


图8 采用定压力变流量策略时高峰情况下不同用户节点所需流量随管网储氢率的变化曲线图

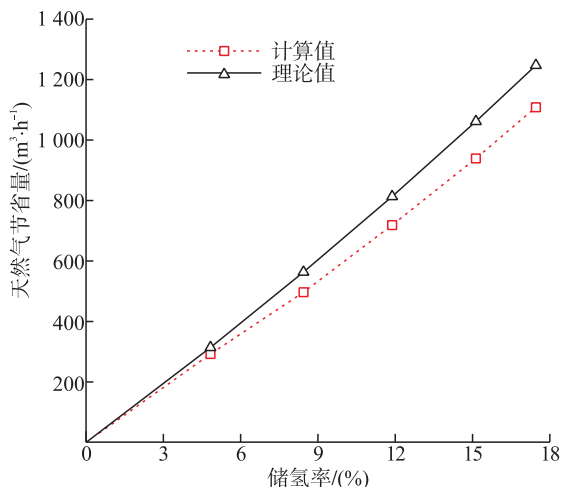


图9 采用定压力变流量策略时高峰情况下天然气节省量随管网储氢率的变化曲线图

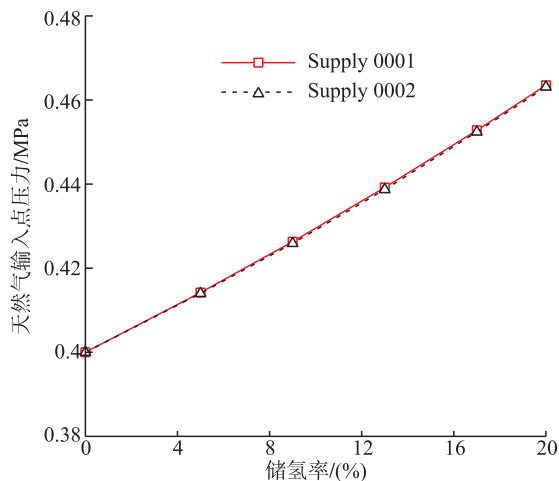


图10 采用变压力定流量策略时低谷情况下储配气站压力随管网储氢率的变化曲线图

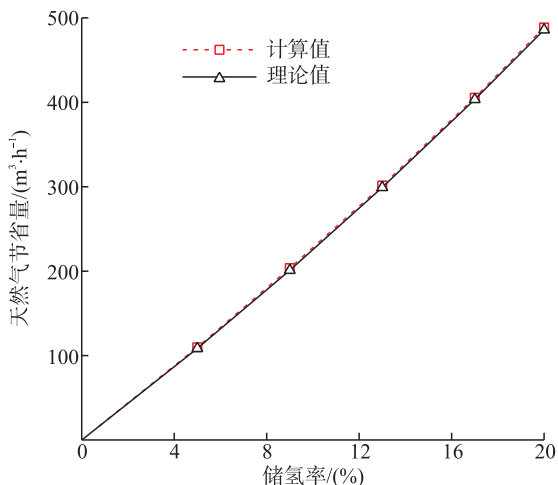


图11 采用变压力定流量策略时低谷情况下天然气节省量随管网储氢率的变化曲线图

高峰情况下储配气站出口压力随管网储氢率的变化见图 12。虽然天然气输入点压力仍与储氢率呈正相

关,但 Supply 0001 压力要高于 Supply 0002 压力,造成该现象的原因同样是相对有限的管网输运能力。高峰情况下天然气节省量随管网储氢率的变化见图 13,与低谷情况类似, $Q_{\text{Save_real}}$ 同样高于 $Q_{\text{Save_theory}}$,且差值随储氢率增加而增大。由于适当增加管路压力可改善天然气管道输运功率和能量损失,因此,变压力定流量策略在天然气流量较大情况下会增强管网天然气节省能力。

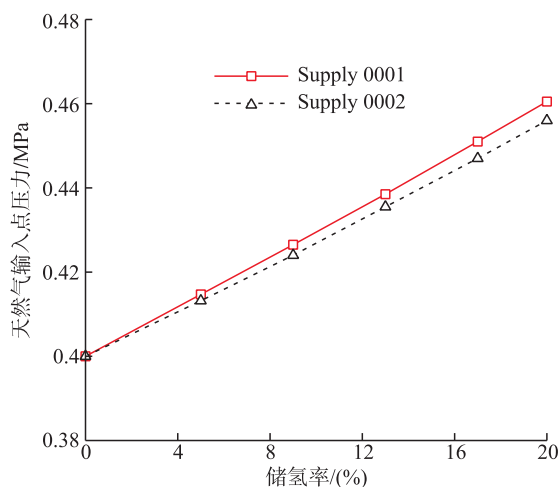


图12 采用变压力定流量策略时高峰情况下储配气站压力随管网储氢率的变化曲线图

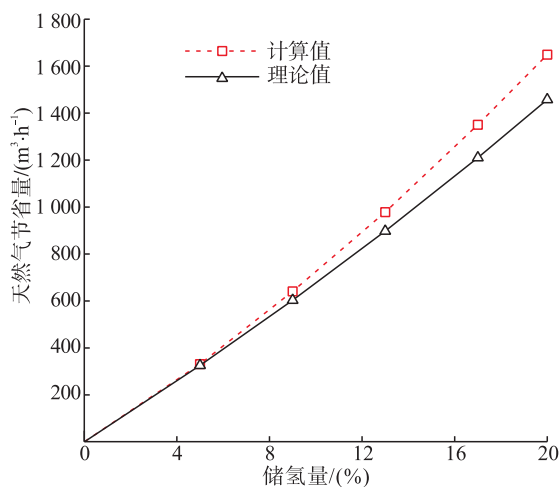


图13 采用变压力定流量策略时高峰情况下天然气节省量随管网储氢率的变化曲线图

2.2 动态仿真分析

动态仿真以 2.1 节静态仿真为基础,耦合了风力发电、电解水制氢及天然气管网储氢动态变化等计算内容,主要考察注入氢气对天然气管网基本性能的动态影响。由于变压力定流量策略更有利于发挥管网储氢节能能力,因此重点对该策略进行仿真分析。Supply 0001 / 0002 天然气输入压力随储氢率变化的调整主要基于图 11 和图 13 计算结果。所采用的风力田机组数为 30 组,每组额定功率 3 MW,电网额定输出功率 65 MW,所造成

的弃风量由式(1)和(2)计算,电解水制氢产量由式(3)计算。风速、风力发电、弃风量、氢气产量和氢气输出量的关系见图 14~15。由图 14、15 可见,氢气产量和氢气输出量虽总值相同,但耦合关系相对较弱,前者主要受天气影响,后者则主要配合天然气管网输出策略。

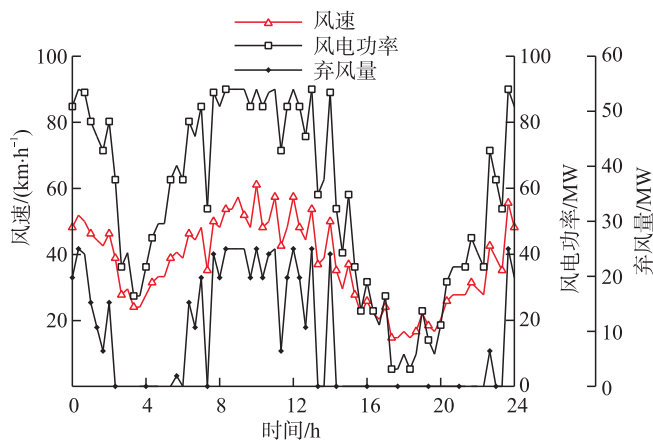


图14 24 h 风力发电、弃风量与风速随时间的变化曲线图

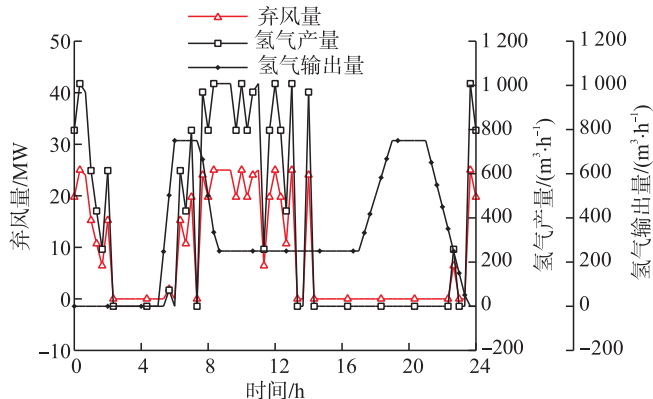


图15 24 h 氢气产量、氢气输出量与弃风量随时间的变化曲线图

对储氢管网进行 0~48 h 动态仿真,所采用的天然气管网输出点流量变化策略见图 16。初始 0 h 时刻为未填充状态,从 5 h 时刻各输入点开始填充,后续各时刻保持填充状态。选取 Delivery 0001 用户节点为说明对象,其流量、出口压力、氢含量、华白数及单位时间热值随时间的变化见图 17。由图 17 可见,氢含量、华白数及单位时间热值在 4~48 h 时间段随各输入点供气策略和出口压力的变化而滞后变化。在绝大部分时间段内,Delivery 0001 氢含量大致稳定,基本保持在 12.6%~13.7%,但在 29.3 h 时刻骤降至 1.97%。该节点的单位时间热值和华白数也有类似突变,但变化幅度均小于 8%。部分用户节点在 4~24 h 时间段氢含量随时间的变化见图 18-a),各用户节点变化关系基本一致,但靠近输入节点的用户节点变化滞后性较小。部分用户节点的输运功率比(与非储氢工况)随时间的变化见图 18-b):

在 4~21 h 时间段,输运功率比基本在 1.0 以上;在 21~24 h 时间段逐渐降至 0.9 左右,但由于处于低谷阶段,其影响相对较小。上述计算结果表明,基于静态变压力定流量策略的结果对管网动态储氢工况有一定的适用性,但考虑到部分时刻输运功率偏差较多,该策略依然需要进行调整。

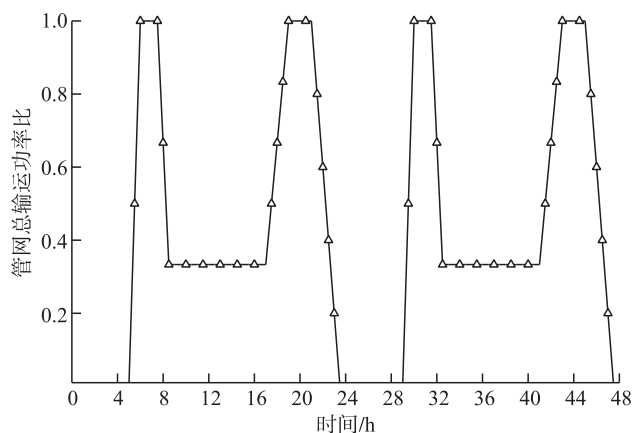
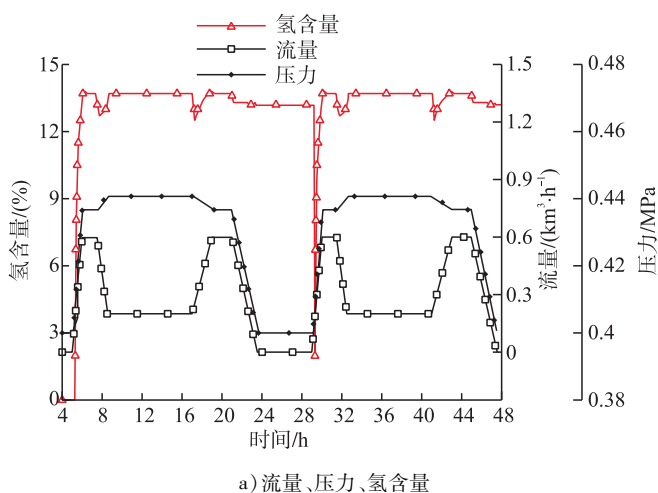
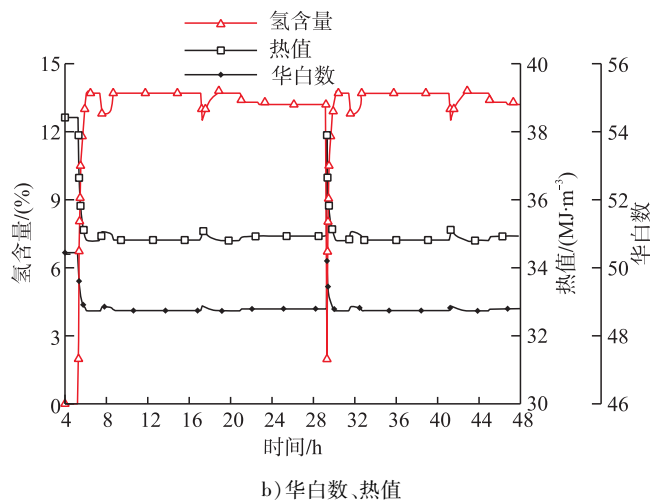


图 16 动态仿真所采用的天然气管网输出策略曲线图

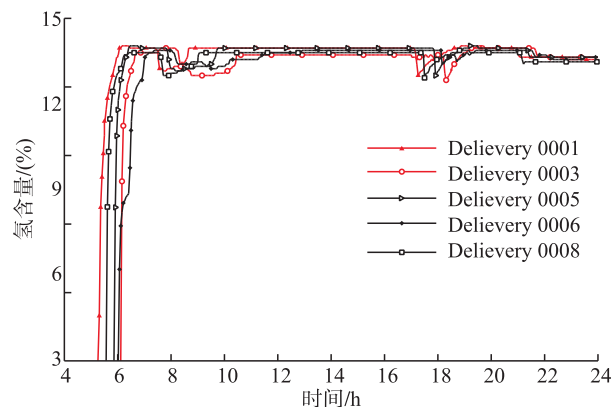


a) 流量、压力、氢含量

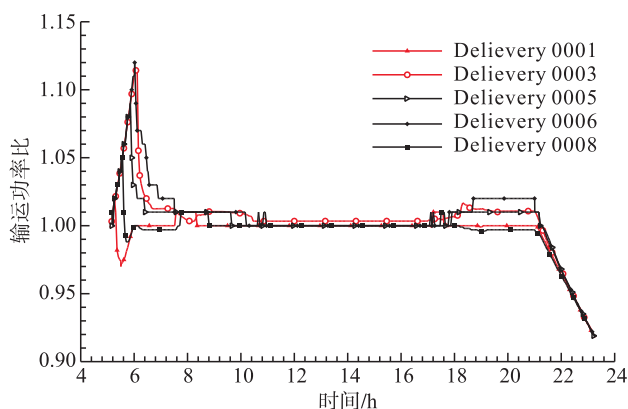


b) 华白数、热值

图 17 变压力定流量策略下 Delivery 0001 的流量、压力、氢含量、华白数以及单位时间热值随时间的变化曲线图



a) 氢含量



b) 输运功率比

图 18 变压力定流量策略下部分用户节点的氢含量、输运功率比随时间的变化曲线图

3 结论

通过对富裕风电产氢注入天然气管网进行静态和动态仿真分析,得到以下结论:

1) 天然气管网可实现注入富裕风电产氢的均匀分布,具备一定的储氢能力;但随着管网储氢率升高,用户节点的天然气输运功率逐渐降低,需考虑增加管网天然气流量或提高储配气站入口压力以保证用户节点的能量需求。

2) 增加天然气流量或提高管储配气站入口压力均可在保持用户总输运功率基本不变的前提下实现氢气管网存储运输,并降低管网天然气消耗。提高储配气站压力策略更有利于减少管网天然气消耗,且对管网动态变化适应性好,但各用户节点的气体组分和输运功率存在波动。

3) 从能量转换角度考虑,富裕风电产氢注入天然气管网可降低管网天然气消耗,实现不可存储的富裕电能向可存储的氢能源转换。

参考文献:

[1] 郭 丹. 高比例风电并网提高消纳能力的研究[D]. 沈阳:

- 沈阳农业大学, 2017.
- Guo Dan. Research on Improving Accommodation Capacity Under the Background of High Proportion of Wind Power Integration [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [2] 冯泽深, 张曙光, 郭雁珩, 等. 东北地区风电“弃风”现状及分析[J]. 电气技术, 2014(2): 1-3.
- Feng Zeshen, Zhang Shuguang, Guo Yanheng, et al. Status and Analysis of Abandoned Wind Power in Northeast of China [J]. Electrical Engineering, 2014 (2): 1-3.
- [3] 王赵宾. 中国弃风限电报告[J]. 能源, 2014(7): 42-48.
- Wang Zhaobin. Report on Wind Curtailment and Electric Power Regulator in China [J]. Energy, 2014 (7): 42-48.
- [4] Haeseldonckx D, D'haeseleer W. Using Renewables and the Co-Production of Hydrogen and Electricity from CCS-Equipped IGCC Facilities, as a Stepping Stone Towards the Early Development of a Hydrogen Economy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35 (3): 861-871.
- [5] Haeseldonckx D, D'haeseleer W. The Use of the Natural-Gas Pipeline Infrastructure for Hydrogen Transport in a Changing Market Structure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32 (10/11): 1381-1386.
- [6] Tabkhi F, Azzaro-Pantel C, Pibouleau L, et al. A Mathematical Framework for Modeling and Evaluating Natural Gas Pipeline Networks Under Hydrogen Injection [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33 (21): 6222-6231.
- [7] Melaina M W, Antonia O, Penev M. Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: a Review of Key Issues: NREL/TP-5600-51995 [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [8] Melaina M W. Overview of Two Hydrogen Energy Storage Studies: Wind Hydrogen in California and Blending in Natural Gas Pipelines: NREL/PR-5600-58514 [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [9] Melaina M W, Penev M, Zuboy J. Hydrogen Blending in Natural Gas Pipelines [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [10] 黄明, 吴勇, 文习之, 等. 利用天然气管道掺混输送氢气的可行性分析[J]. 煤气与热力, 2013, 33(4): 39-42.
- Huang Ming, Wu Yong, Wen Xizhi, et al. Feasibility Analysis of Hydrogen Transport in Natural Gas Pipeline [J]. Gas & Heat, 2013, 33 (4): 39-42.
- [11] 吴端. 天然气掺混氢气使用的可行性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- Wu Chang. Feasibility Study on Blending Hydrogen into Natural Gas Distribution Networks [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [12] Guandalini G, Colbertaldo P, Campanari S. Dynamic Quality Tracking of Natural Gas and Hydrogen Mixture in a Portion of Natural Gas Grid [J]. Energy Procedia, 2015, 75: 1037-1043.
- [13] Guandalini G, Campanari S. Wind Power Plant and Power-to-Gas System Coupled with Natural Gas Grid Infrastructure: Techno-economic Optimization of Operation [C] // ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, June 15-19, 2015, Montreal, Quebec, Canada. New York: ASME, 2015: 1-10.
- [14] 50Hertz. Overhead Line Versus Cable [EB/OL]. [2019-04-14]. <http://www.50hertz.com/en/Grid-Extension/Planning-criteria/Overhead-line-versus-buried-cable>.
- [15] Sarrias-Mena R, Fernández-Ramírez L M, García-Vázquez C A, et al. Electrolyzer Models for Hydrogen Production from Wind Energy Systems [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40 (7): 2927-2938.
- [16] Castañeda M, Cano A, Jurado F, et al. Sizing Optimization, Dynamic Modeling and Energy Management Strategies of a Stand-Alone PV/Hydrogen/Battery-Based Hybrid System [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38 (10): 3830-3845.
- [17] Khan M J, Iqbal M T. Dynamic Modeling and Simulation of a Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System [J]. Renewable Energy, 2005, 30 (3): 421-439.
- [18] 王建刚. 城市天然气输配管网的数学模型及优化[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- Wang Jiangang. The Mathematical Model and Optimization of City Natural Gas Pipeline Network [D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [19] 江茂泽, 徐羽镗, 王寿喜, 等. 输配气管网的模拟与分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- Jiang Maoze, Xu Yutang, Wang Shouxi, et al. The Simulation and Analysis of Gas Distribution Networks [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.