

面向统一能源系统的氢能规划框架

张红¹, 袁铁江^{1*}, 谭捷¹, 开赛江², 周专²

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁省大连市 116024;

2. 国网新疆电力有限公司, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000)

Hydrogen Energy System Planning Framework for Unified Energy System

ZHANG Hong¹, YUAN Tiejia^{1*}, TAN Jie¹, KAI Saijiang², ZHOU Zhuan²

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

ABSTRACT: Unified energy system should consider the impact of the randomness of new energy on the reliability of the unified energy system, use multi-energy complementary and seasonal energy storage technology to improve energy efficiency, and ensure reliable supply of electricity/heat/gas/oil chemical products on medium and long-term scales. Firstly, the basic structure of the hydrogen energy system which include power to hydrogen (P2H)-hydrogen storage (HES)-hydrogen to X (H2X) and its operating modes supporting the unified energy system were proposed. Then, the seasonal hydrogen storage planning framework was proposed, which mainly analyzed the key characteristics of seasonal hydrogen storage, established its operation analysis and energy regulation models. A complementary energy storage mechanism for the different energy storage functions requirements in unified energy system was developed, which took the upper limit of the short-term energy storage adjustment time as the time resolution of seasonal energy storage energy adjustment. Based on it, the configuration method of seasonal hydrogen storage system was proposed to ensure that the system has no long-term energy insufficient after seasonal hydrogen storage configuration, furthermore conducting a comprehensive evaluation of the seasonal hydrogen storage planning scheme. Finally, in the context of a unified energy system, the effectiveness of the proposed seasonal hydrogen storage planning method was verified.

KEY WORDS: unified energy system; reliability; complementary energy storage mechanism; seasonal hydrogen

storage planning

摘要:统一能源系统该如何考虑新能源随机性对供电可靠性的影响,利用多能互补与季节性储能技术,提高能源利用率,确保中长时间尺度上电/热/气/油化产品的可靠供应。首先,提出氢能系统的基本结构(电制氢-储氢-氢转X)及其支撑统一能源系统的运行模式。其次,提出季节性氢储能规划框架,根据季节性氢储能的关键特征,建立其运行分析与能量调控模型;考虑统一能源系统对储能功能的不同需求,建立储能互补机制,以短时储能调节时间的上限作为季节性储能能量调节的时间分辨率,基于此提出季节性氢储能的配置方法,确保季节性氢储能配置后系统无长时能量缺失;再对季节性氢储能规划方案进行综合评估。最后,在统一能源系统背景下,验证所提氢能规划框架的有效性。

关键词:统一能源系统;可靠性;储能互补机制;季节性氢储能规划

0 引言

应对气候变化,氢能再次受到关注,基于减排控温的迫切需求,氢能应用从传统的工业生产领域,拓展到电力生产、热力生产和交通系统^[1-3];随着可再生能源在能源结构中的占比增加,清洁电能电解水制“绿氢”,替代“蓝氢”或“灰氢”,是实现节能减排的重要手段。文献[4]提出利用可再生能源制氢-储氢,耦合煤/石油炼化、交通等领域,为用户提供清洁的电、热、气以及油/化产品的统一能源系统,预测了统一能源系统各领域中长期氢能需求,为清洁能源系统规划提供了方向和依据。然而,基于清洁电能制-储氢的统一能源系统,电能来自高比例可再生能源的发电系统,可再生能源出力具有随机间歇波动特性,中长时间尺度上,需要考虑随机性可再生能源供给电/热/气的可靠性问题。

基金项目:中央高校基本科研业务项目(DUT20RC(5)021);国网新疆电力有限公司科技项目“基于氢能的新疆能源互联网研究”。

Basic Research Projects for the Central Universities (DUT20RC(5)021); State Grid Xinjiang Power Company Limited Science and Technology Project "Research on Xinjiang Energy Internet Based on Hydrogen Energy"(SGXJY00GHJS2000068).

季节性储能支撑长时间、大规模、广域空间范围内能量转移,是应对高比例可再生能源系统供能长时间歇的关键技术^[5]。与抽水蓄能、压缩空气储能等季节性储能方式相比,氢储能系统结构、储氢方式与能量转化利用形式多样,且在大规模、长时段能量存储中效益更佳^[6-8]。目前,已有较多研究从经济性、可靠性和环保性等方面验证了可再生能源耦合氢(储)能系统的可行性,讨论的氢能系统结构、优化方法、评价指标不尽相同^[9-13]。文献[10]提出电网辅助风电耦合电解槽制高纯度氢的系统优化方法;文献[11]讨论考虑氢气需求特征和不同氢气交易模式下,风电制氢系统优化规划方案;文献[12-13]提出光伏-制氢-储氢一体化系统的容量优化方法;然而,目前研究多对 kW 级并网或离网型可再生能源耦合氢能系统性能、容量进行优化,兆瓦级、百兆瓦级以上的大规模、长时氢储能的研究多集中于探讨储氢技术-经济可行性,支撑统一能源系统可靠运行的季节性氢储能规划范式还未形成。如,文献[14]建立了盐穴和储层地下 H₂ 储存的数学模型,研究地下储氢系统与可再生发电系统耦合运行方式与特性。文献[15]讨论了江苏省金坛县盐穴储氢的密封性、稳定性及利用其大规模储氢消纳风电的可行性。文献[16]提出利用西班牙现有的天然气网络存储氢气,电能不足时氢源燃气轮机发电,可使 7.27TW·h 可再生能源再利用,CO₂ 减排 254 万 t。文献[17]从长时间尺度、多能源形式与跨空间范围 3 个层面分析了面向高比例可再生能源的季节性储能研究的关键科学问题与挑战。文献[18]提出支持电力系统清洁转型的系统级储能需求分析模型与的量化储能需求的优化方法框架。文献[19]基于能量集线器的概念,开发了一个基于运行模拟的热、水、氢多能季节性存储的可再生能源系统分析模型。

系统评价方面,多以全寿命周期成本、制氢成本为经济性评估指标^[20-22];可靠性指标主要包括:负载缺失概率,电源缺失概率和能量缺失期望等^[23-25],文献[26]提出以每小时最大能量缺失为可靠性指标,规划储能容量。现有的可靠性指标定义常以小于等于 1h 为采样间隔来统计能量供应或负荷缺失概率,忽略了可再生能源长时间歇(天、周、月)导致供能持续亏欠的情况,鲜有在长时间尺度层面定义的可靠性指标。

综上所述,目前未有面向统一能源系统氢(储)

能系统架构及其大规模应用的规划范式。因此,首先提出氢能系统的基本结构及其支撑统一能源系统的运行模式。并提出季节性氢储能规划框架,主要分析季节性氢储能的关键特征,建立其运行分析与能量调控模型;分析统一能源系统对储能功能的不同需求,制定储能互补机制,以短时储能调节时间的上限作为季节性储能能量调节的时间分辨率,基于此提出季节性氢储能的配置方法;再对季节性氢储能规划方案进行综合评估。最后,通过实际案例检验所提方法的有效性。

1 氢能支撑的统一能源系统

氢能支撑的统一能源系统由清洁能源输入、制氢环节(电转氢(power to hydrogen, P2H))、储氢环节(储氢装置(hydrogen energy storage, HES))、氢能转换环节(氢转电(hydrogen to power, H2P)、氢转气(hydrogen to gas, H2G)、氢转氢(hydrogen to hydrogen, H2H)、氢转热(hydrogen to thermal, H2T))、电、热、天然气、氢传输网络及负荷构成,如图 1 所示。

其中,电源由太阳能发电、风电、水电、核电、氢气发电与生物质及其他可再生电源构成。其中,资源最丰富,开发技术最成熟的风电与太阳能发电具有不确定性,为保证风、光的利用率,发电机组耦合电解槽,将多余的电能转换为氢气。核电机组这类稳定可控的电源,承担电力系统负荷平稳部分(基荷),使其尽量在高效工况下运行,可节省系统燃料消耗,有利安全、经济运行。氢气发电稳定可控,水力发电具有预测可靠、快速响应与灵活调节等优点,可用于填补风、光间歇发电和负荷波动造成的电能缺失。统一能源系统中,风电与太阳能发

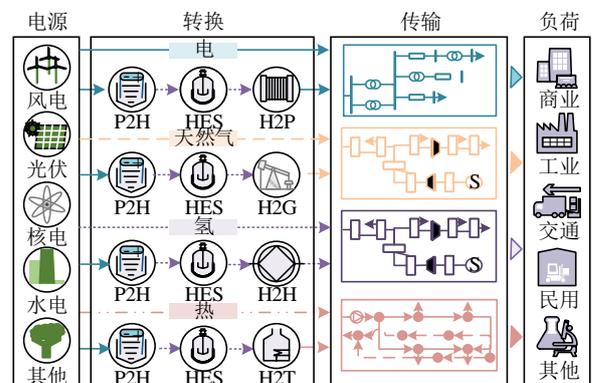


图 1 氢能支撑的统一能源系统结构

Fig. 1 Structure of unified energy system supported by hydrogen

电等间歇性电源占比较高，小时级储能难以满足电力系统的稳定运行需求，通过电解水制氢将可再生能源电力转换成氢气并储存，电能不足时，存储的氢气通过燃料电池或氢燃气轮机发电，满足用户对电能的需求，可实现日、月，甚至季节性储能，能够有效解决可再生能源消纳、平抑波动性和间歇性等问题。氢能系统支撑电力系统可靠运行的基本模式：可再生能源电站-氢能系统(P2H-HES-H2P)-电网-电能用户，如图 1 所示。

热源：由电制热、氢制热、太阳能集热及地热等可再生热源构成。其中，太阳能集热与太阳能发电相似，具有间歇性；电制热可靠、清洁、稳定，是扩大区域电力消费，消纳富裕电力，提高电气化水平的重要手段^[27]。氢制热是氢源锅炉直接燃烧氢气供热，或者联合烟气余热深度回收装置与氢能溴化锂热泵机组供热/冷^[28]，稳定可控，可用于补充太阳能集热间歇与热负荷波动的造成的热能缺失。同时，热负荷是最具季节性波动的负荷之一，氢能系统支撑热力系统可靠运行的基本模式：可再生能源电站-氢能系统(P2H-HES-H2T)-热网-热能用户。

气源：由电制气与天然气等清洁气源构成。其中，“电制气”包含：可再生能源电解水制的“绿氢”及“绿氢”耦合“煤/石油”生成天然气；“绿氢”与天然气被用于工业领域的氨/醇类化工产品生产、石油冶炼以及交通运输等。工业与交通领域的气负荷波动受市场价格等影响，同理，氢能系统支撑气体系统可靠运行的基本模式：可再生能源电站-氢能系统(P2H-HES-H2G/H2H)-天然气/氢气网-天然气/氢气用户。

2 面向统一能源系统的氢能系统规划

2.1 氢能系统规划问题

由 1 节可知，统一能源系统电、热、气多来自随机的可再生能源，氢能系统支撑其可靠运行。因此，如何考虑可再生能源随机性对供能可靠性的影响，兼顾能源利用率，中长时间尺度上，解决供能可靠性，是氢能系统规划的关键。

2.2 季节性氢储能规划框架

针对统一能源系统中长时间尺度供能可靠性问题，提出季节性氢储能规划框架。

1) 关键特征分析。

①灵活转换。压缩空气与抽水蓄能等季节性储能只能先将机械能转化为电能，电能再转换为其能量

形式，而氢储能系统有以下 4 种结构：P2H-HES-H2P、P2H-HES-H2T、P2H-HES-H2G、P2H-HES-H2H；可直接转化为电、热、气等能量物质。②制(充)-储(存)-用(放)能解耦。不同于电化学储能，氢储能制、储、用三环节可解耦运行(制氢、用氢不用分时操作)、也可解耦配置(制氢设备额定功率需求、储氢容量需求、H2X 额定功率需求互不制约)。③多形态广域传输^[17]。目前主流的大规模氢储能方式有高压储氢罐、盐穴中储存气态氢、管道储氢、液态有机载体储氢^[29-30](liquid organic hydrogen carriers, LOHC)。其中，地面高压储氢受储氢罐材料特性与成本的制约，存储压力一般不超过 10MPa，大规模储氢占地空间大投资成本高^[8]；地下的盐穴储氢已在工业领域规模化应用，但该方法受地质条件制约不能适用于所有地区，且不具备空间运输性。管道储存包括天然气与氢气管道存储两类，其中，天然气管道储氢被认为是大规模储存氢气最经济有效前途的选择，将氢气直接掺入天然气管道，送至热负荷替代天然气燃烧供热，提升清洁能源消纳空间，降低碳排放。研究表明燃气管网理论掺氢体积比可以高达 20% 以上^[31]，在不至于显著影响用户体验约束性条件下，城市燃气管网掺氢体积比可不低于 2%~5%。现有天然气管道压力和直径条件下，每公里管道大约可以储存 12t 氢气^[8]，管道运输成本约在 0.006~0.02 元/(kg·km)^[17]。

2) 运行分析模型。

季节性氢储能输入端设备电解槽具备良好的宽域适应新能源电能功率波动特性，一般可在额定功率 10%~100% 范围内波动运行^[32]；其输出端燃料电池、氢气燃气轮机、氢源锅炉等 H2X 设备具备快速响应输出电、热、气(氢)的能力，输入和输出过程无需分时操作，支撑统一能源系统灵活运行。统一能源系统包含众多能量转化过程与物质生产过程，可采用广义能量-物质流矩阵精细化描述季节性氢储能支撑统一能源系统运行过程^[33]，如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{F} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_0 & \mathbf{Z}_\tau \\ \mathbf{Z}_\pi & \mathbf{Z}_\psi \end{bmatrix}}_{\mathbf{Z}} \begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： \mathbf{O} 为输出矩阵； \mathbf{H} 为能量输出矩阵； \mathbf{F} 为物质输出矩阵； \mathbf{Z} 为耦合矩阵； \mathbf{Z}_0 、 \mathbf{Z}_τ 、 \mathbf{Z}_π 与 \mathbf{Z}_ψ 分别为系统中能量-能量、物质-能量、能量-物质与物质-物质 4 种输入输出关系； \mathbf{I} 为输入矩阵； \mathbf{L} 为

能量矩阵； \mathbf{U} 为物质输入矩阵； \mathbf{S} 为存储矩阵； \mathbf{S}_1 为参与能量转化的氢储能向量； \mathbf{S}_2 为参与物质生产的氢储能向量。

3) 能量调控模型。

季节性储氢需求视可再生能源占比、源-荷的季节性波动规律等情况而定，其一般数学模型与能量调节约束如式(2)—(6)所示。

$$E_{\text{net}}(t) = E_{\text{source}}(t) - E_{\text{load}}(t) \quad (2)$$

$$E_{\text{net}}(t) = \begin{cases} E_{\text{net}}^+(t), & E_{\text{net}}(t) \geq 0 \\ E_{\text{net}}^-(t), & E_{\text{net}}(t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $E_{\text{net}}(t)$ 为 t 时刻净能量； $E_{\text{source}}(t)$ 、 $E_{\text{load}}(t)$ 分别为 t 时刻能量供应与能量需求； $E_{\text{net}}^+(t)$ 、 $E_{\text{net}}^-(t)$ 分别为 t 时刻能量富余与能量缺失。

$$S_{\text{H}}(t+1) = S_{\text{H}}(t) + [\eta_1 E_{\text{net}}^+(t) + \sum_x \left(\frac{1}{\eta_x}\right) E_{\text{net},x}^-(t)] \quad (4)$$

式中： $S_{\text{H}}(t)$ 、 $S_{\text{H}}(t+1)$ 分别为 t 与 $t+1$ 时刻的储氢质量； η_1 为电能转化为氢的效率； η_x 为氢转化为 x (电、热、气、氢)的效率。

$$0 \leq S_{\text{H}}(t) \leq S_{\text{H}}^{\max} \quad (5)$$

$$v_{\text{HS},\text{in}/\text{out},i}^{\min} \leq v_{\text{HS},\text{in}/\text{out},i}(t) \leq v_{\text{HS},\text{in}/\text{out},i}^{\max} \quad (6)$$

式中： S_{H}^{\max} 为最大储氢质量； $v_{\text{HS},\text{in}}(t)$ 、 $v_{\text{HS},\text{out}}(t)$ 分别为 t 时刻氢气注入与输出的速率； $v_{\text{HS},\text{in}}^{\min}$ 、 $v_{\text{HS},\text{out}}^{\min}$ 与 $v_{\text{HS},\text{in}}^{\max}$ 、 $v_{\text{HS},\text{out}}^{\max}$ 分别为氢气注入、输出速率的下限与上限。

为保证系统可靠运行，应满足如式(7)的运行约束。

$$S_{\text{H}}(t) + \sum_x \left(\frac{1}{\eta_x}\right) E_{\text{net},x}^-(t+1) \geq 0 \quad (7)$$

式中 $E_{\text{net},x}^-(t+1)$ 为时刻 $t+1$ 缺失的电、热、气、氢(能)。

4) 统一能源系统储能互补机制。

统一能源系统对储能需求可按时间尺度梯级划分，锂电池、超级电容等持续充放电时间在 M 小时以内的短时功率型储能电化学主要完成日内调峰或调频服务，若短时储能不能满足系统的调节需求，或存在 M 小时($M=6\text{h}^{[18]}$)甚至更长时间的能量调节需求则依赖于季节性氢储能，统一能源系统储能互补机制如图2所示。配置季节性氢储能后，系统无 M 小时及以上连续能量缺失，如式(8)—(10)。

$$T_- = \{t_1^-, t_2^-, \dots, t_l^-\} \quad (8)$$

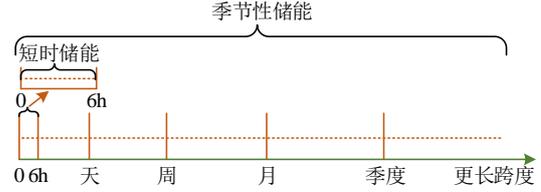


图2 储能互补机制

Fig.2 Energy storage complementary mechanism

$$T_-^{\max} = \max(T_-) \quad (9)$$

$$T_-^{\max} \leq T_M \quad (10)$$

式中： T_- 为系统能量持续缺失时段(t_l^-)的集合； T_-^{\max} 为能量缺失最长时段； T_M 短时储能持续放电最大时长 M 。

5) 季节性氢储能配置方法。

以式(7)、(10)为季节性氢储能配置依据，提出的季节性氢储能配置方法具体步骤如下：

步骤1：输入周期为 T ，时间间隔 Δt (本文取1h)的源、荷数据；以 M 小时为间隔，按式(2)生成净能量数据序列 $E_{\text{net},m}$ 。

步骤2：按式(11)、(12)计算序列 $E_{\text{net},m}$ 最大连续富裕能量 M_{ES} ，并将该时段最后时刻设为储能初始时刻，即 $S_{\text{H}}(0) = M_{\text{ES}}$ 。

$$E_n^+ = \sum_{t_{n,0}}^{t_{n,1}} E_{\text{net}}^+(t), \quad n \in N \quad (11)$$

$$M_{\text{ES}} = \max\{E_0^+, E_1^+, \dots, E_N^+\} \quad (12)$$

式中： $E_{\text{net}}^+(t)$ 是时刻 t 富余的能量； E_n^+ 是富余时段 n 富余的能量。

步骤3：以 Δt 为间隔，生成能量富余序列 $E_{\text{net},\Delta t}^+$ ；设 P2X 额定功率为 F ，即 $P_{\text{P2H}} = F$ 。

$$S_{\text{H}}(t+1) = S_{\text{H}}(t) + [kP_{\text{P2H}}(t) + \sum_x \left(\frac{1}{\eta_x}\right) E_{\text{net},x}^-(t)] \quad (13)$$

步骤4：按式(13)模拟储氢状态(state of hydrogen, SOH)。其中，运行功率 $P_{\text{P2H}}(t)$ 小于等于额定功率 F ， k 为电制氢系数；

步骤5：按式(7)检验是否满足可靠运行约束，若满足，按式(14)计算系统无 M 小时及以上连续能量缺失的最小储氢(质量)需求 S_{H}^0 ，电解槽规划功率为 F ；若不满足，则 $P_{\text{P2H}} = F + \Delta f$ ，循环执行步骤2—5，直至满足可靠运行约束，迭代停止(迭代停止条件 $P_{\text{P2H}} = \max\{E_{\text{net},\Delta t}^+\}$)。若迭代停止仍然不满足可靠运行约束，则通过增加电源装机容量，改变净能量序列 $E_{\text{net},m}$ ，循环执行步骤1—5，直至满足可靠运行约束。

$$S_H^P = \max\{S_H(0), S_H(1), \dots, S_H(t)\} \quad (14)$$

步骤 6: 以 M 为时间间隔, 生成能量缺失序列 $E_{net,m}^-$, $M_{ED} = \min\{E_{net,m}^-\}$, 其中 M_{ED} 为能量持续缺失最小值;

步骤 7: H2X 配置的额定功率计算式如式(15)。

$$P_{H2X} = \frac{|M_{ED}|}{M} \quad (15)$$

综上, 季节性氢储能制氢设备、储氢量、用氢设备规划值计算具体的流程图如图 3 所示。

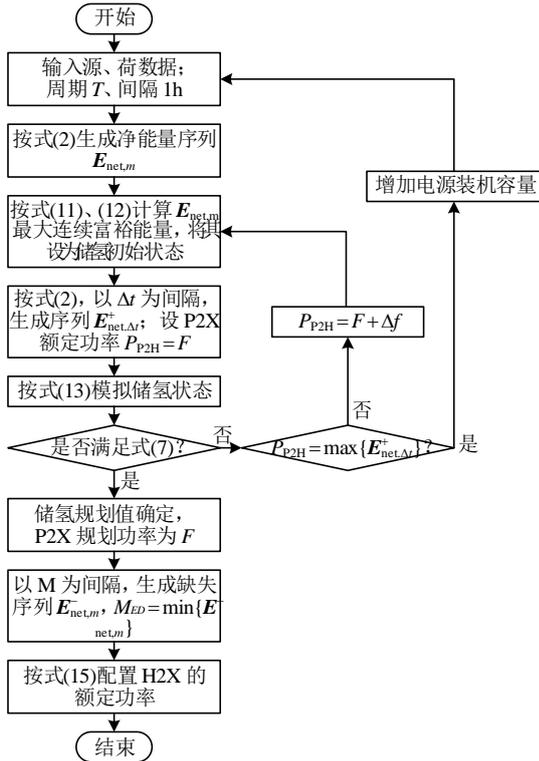


图 3 季节性氢储能规划流程图

Fig. 3 Flow chart of seasonal hydrogen storage planning

6) 季节性氢储能评估。

统一能源系统背景下, 对季节性氢储能的经济性、环境效益、可靠性提出了更高的要求。其中, 经济性评估指标主要有投资回报率、净现值、年均成本^[18]等, 如式(16)。环境效益主要为其支撑可再生能源开发规模, 减少化石能源利用的减排效益; 可靠性主要体现在保障系统中长时间供能充裕性, 减少能量缺失, 如式(8)—(10)。

$$f_{ATC} = C_{acc} + C_{o\&m} \quad (16)$$

式中: f_{ATC} 为经济性优化目标年均成本; C_{acc} , $C_{a\&m}$ 分别为季节性氢储能年均投资成本, 年运维成本。

$$CRF = \frac{j(1+j)^r}{(1+j)^r - 1} \quad (17)$$

$$C_{acc} = CRF \cdot \left(\sum_l P_l \cdot C_l^{inv} \right), \quad l \in \{P2H, HES, H2X\} \quad (18)$$

式中: CRF 投资回报率; r 为季节性储能规划周期; j 为年利率; C_l^{inv} 分别为设备 l (电解槽、储氢、H2X) 的单位投资成本; P_l 分别为设备 l 规划的额定功率与储氢容量。

$$C_{o\&m} = \sum_{t=1}^T \sum_l H_l(t) \quad (19)$$

$$H_l(t) = \left(\frac{C_l^{inv}}{N_l^{hr}} + C_l^{om} \right) \delta_l(t) + C_l^{start} \gamma_l(t) \quad (20)$$

式中: $H_l(t)$ 、 C_l^{start} 分别为设备 l 在 t 时段的操作运维成本与启动成本; $\gamma_l(t)$ 为设备切换启停状态, $\gamma_l(t)=1$ 表示启动, $\gamma_l(t)=0$ 表示切机; $\delta_l(t)$ 为设备 l 的运行状态, $\delta_l(t)=0$ 表示设备 l 处于停机状态, $\delta_l(t)=1$ 表示设备 l 处于运行状态; N_l^{hr} 为组件 l 的周期寿命。

3 案例研究

以某待建统一能源系统示范区为例, 验证上述所提框架与方法的有效性。

3.1 统一能源系统源-荷分析

1) 氢负荷。

示范区有产量为 150 万 t/年的合成氨加工厂年需氢量 264550t, 产量为 15 万 t/年的石油石化炼化厂年需氢量 500t, 为满足示范区工业生产年需氢量为 265050t。采用碱性电解槽制氢, 制氢效率是 4.5kW/Nm³, 工业制氢平均电负荷 1577.69MW, 消耗电能 1.382×10⁷MW·h/年。合成氨与石油炼化生产过程具有生产柔性, 氢负荷的波动范围为 95%~105%, 波动规律服从正态分布, 示范区工业制氢电负荷曲线如图 4 所示。

示范区预计至规划水平年投放氢燃料电池汽车

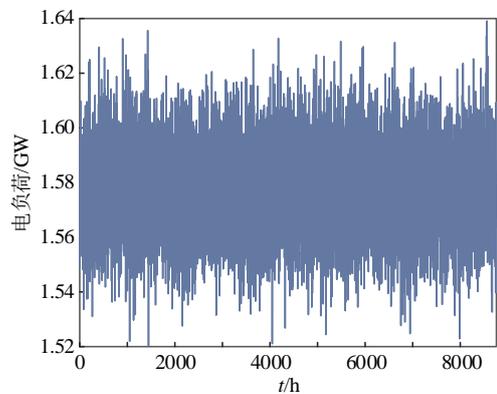


图 4 工业制氢电负荷曲线

Fig. 4 Electrical load curve for industrial hydrogen production

1000 辆(丰田 Mirai 氢燃料电池汽车: 储氢瓶总容量 122.4L/4.92kg, 续航里程 650km), 平均每天行驶里程 80 公里。氢燃料汽车的加氢模式与传统燃料汽车相似, 一周内每小时氢需求的比率参见文献[11], 考虑季节变化, 假设冬季减少 10%, 夏季增加 10%, 春季和秋季的氢需求量等于年平均需求量。氢燃料电池汽车等效周电负荷与年电负荷曲线如图 5(a)、(b)所示, 图 5(a)显示示范区氢燃料汽车的氢负荷样本数据呈现以 1 周为尺度的周期性, 为规划结果的准确性, 未简化为平均日负荷。经计算, 因氢燃料电池汽车投放增加电量需求 $1.145 \times 10^4 \text{ MW}\cdot\text{h}/\text{年}$ 。

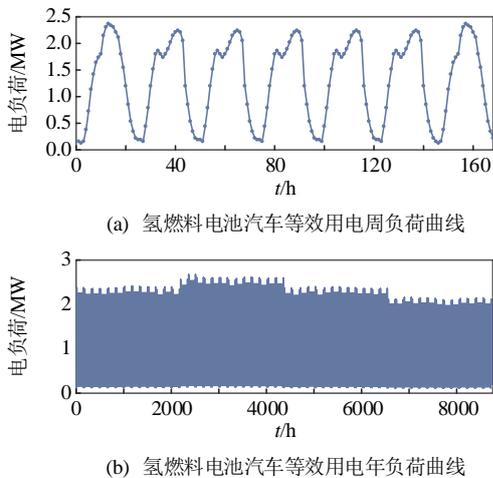


图 5 氢燃料电池汽车等效电负荷曲线
Fig. 5 Equivalent electric load curves of hydrogen fuel cell vehicles

2) 热负荷。

到规划水平年, 示范区采暖总面积达 45 万 m^2 , 采暖方式为集中式电采暖, 采暖季是每年 10 月 15 日至次年 4 月 15 日, 电采暖的日、年电负荷曲线如图 6。

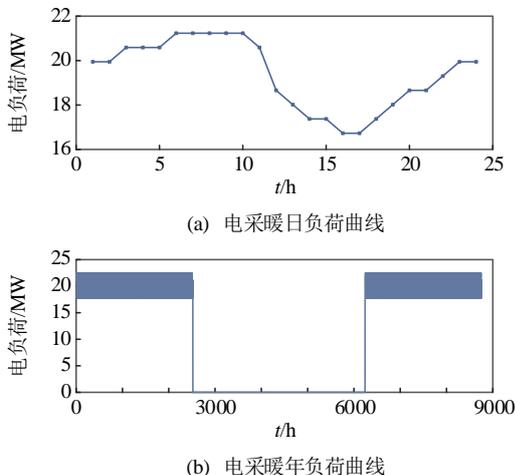


图 6 电采暖负荷曲线
Fig. 6 Load curves of electric heating

3) 天然气负荷。

示范区原采用天然气发电、供热, 统一能源系统建成后天然气负荷为 0, 仅利用天然气管道存储氢气。示范区天然气管道全长 2424km, 每 km 天然气管道存储 12t 氢气, 经计算储氢体积上限为 3.3713 亿 Nm^3 (标准立方米), 若存储空间不足, 可进一步利用该区域临近城市管网存储, 储氢空间大于 7 亿 Nm^3 。同时, 系统将依据气体质量分数或体积分数分摊天然气运输管道的一次性投资建设成本, 目前我国天然气管道的建设成本约为 1000 万元/km [34]。

4) 其他电负荷。

规划水平年, 示范区其他领域用电日、年负荷预测曲线如图 7 所示。

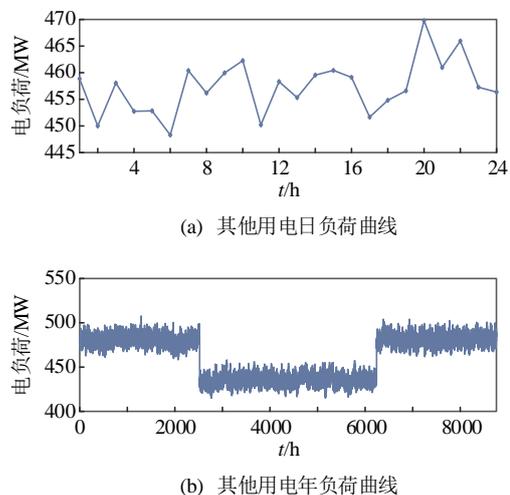


图 7 其他领域用电负荷曲线
Fig. 7 Load curves of other fields

5) 规划水平年的源-荷情况。

表 1 为规划水平示范区电源装机情况, 图 8 是区域总的电负荷曲线与各类电源的出力曲线。

表 1 电源结构

Table 1 Power structure

电源类型	装机容量/MW	年发电量/($10^6 \text{ MW}\cdot\text{h}$)	占比/%
水电	1200	4.397	21.31
光伏	7000	11.621	56.31
风电	3000	4.619	22.38

由图 8(a)—(c)可知, 水电季节性较强, 春季出力较小、夏秋冬三季出力较大; 对比风电, 光伏出力间歇性更小; 图 8(d)中的电负荷为示范区规划水平年的总电负荷曲线, 是 3.1 节中各类电负荷之和, 且由图可知, 采暖季总电负荷明显高于其他季节。

3.2 季节性氢储能配置

图 9 为系统春、夏、秋、冬四季的净能量曲线,

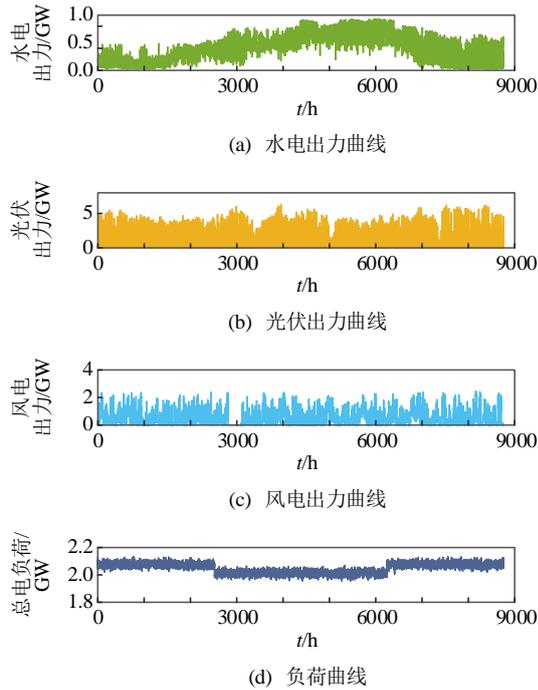


图 8 规划水平年中各电源出力与总负荷曲线
Fig. 8 Each power output and load curve in demonstration area planning level year

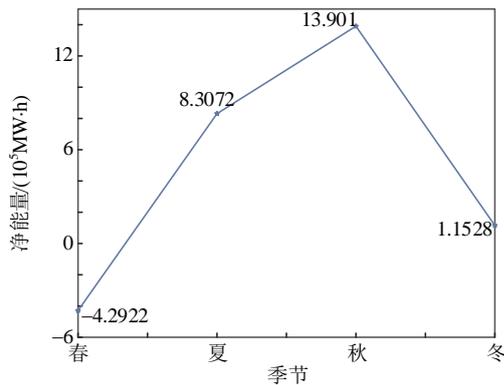


图 9 每个季节的净能量
Fig. 9 Net energy per season

由图 9 知，春季缺失电能 4.2922 亿 kW·h(燃料电池每消耗 1Nm^3 氢气产生 $1.78\text{kW}\cdot\text{h}$ 电)，为保证春季供电需求，需储氢 2.4113 亿 Nm^3 ；夏、秋、冬三季富裕电能总量为 23.362 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ (电解槽每产生 1Nm^3 氢气消耗 $4.5\text{kW}\cdot\text{h}$ 电能， 0.82kg 脱盐水)，可产生 5.1916 亿 Nm^3 氢气。

工业与氢燃料电池汽车氢负荷缺失时直接供氢，且为保证系统能量转化效率，优先满足氢负荷，再燃料电池发电满足电负荷。规划储氢 2.4113 亿 Nm^3 后，按式(4)模拟系统逐月、逐周的净能量、SOH 状态及能量缺失情况如图 10、11 所示。图 10、11 显示，按季尺度规划储能后，无月以上连续能量缺

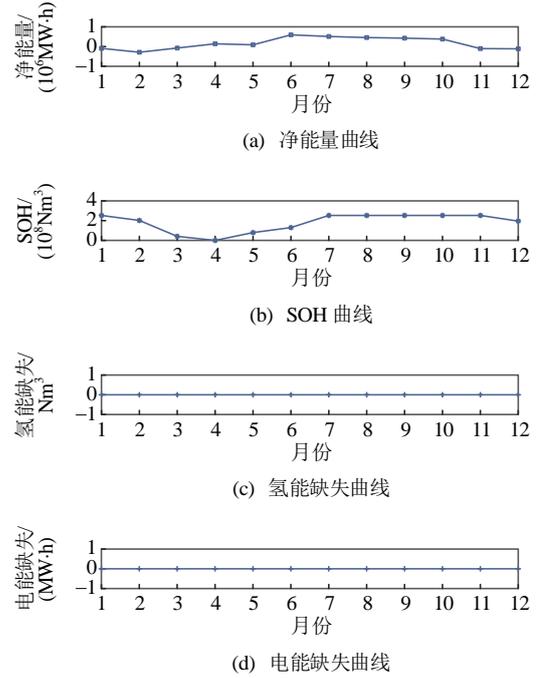


图 10 逐月净能量、SOH 状态与能量缺失
Fig. 10 Monthly net energy, SOH status and energy loss

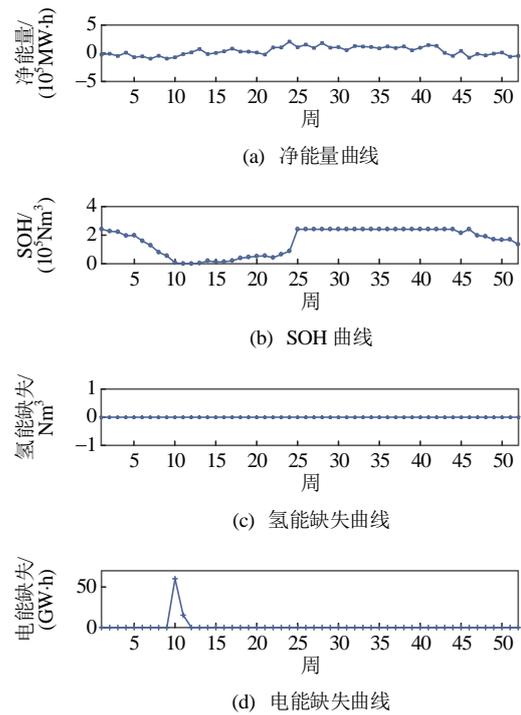


图 11 逐周净能量、SOH 状态与能量缺失
Fig. 11 Weekly net energy, SOH status and energy loss

失，第 10 与 11 周连续缺失电能 75473MW·h。

规划储氢量为 2.8354 亿 Nm^3 时，系统无周以上的连续能量缺失，逐日的净能量、SOH 状态、弃电情况及能量缺失情况如图 12 所示，最大能量连续缺失电能为第 76 天缺失 7429MW·h，最大能量连续缺失电能的时间为 2 天(48h)，第 80 与 81 天连续

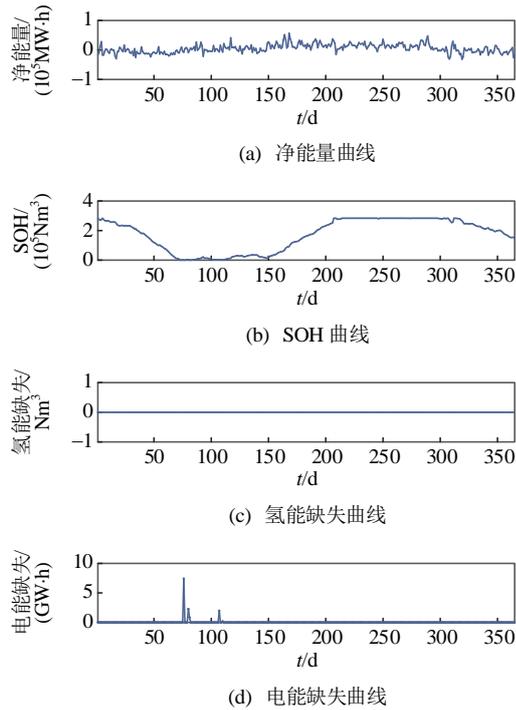


图 12 逐日净能量、SOH 状态与能量缺失

Fig. 12 Daily net energy, SOH status and energy loss

能量缺失 3110.57MW·h, 第 107 天与第 110 天分别缺失 1978.3 与 180.9MW·h。

规划储氢量为 2.9067 亿 Nm^3 时, 系统连续 6h 以上的能量缺失情况如图 13, 最大连续能量缺失电能 8844.7MW·h, 最大连续缺失氢能 1699 Nm^3 , 最

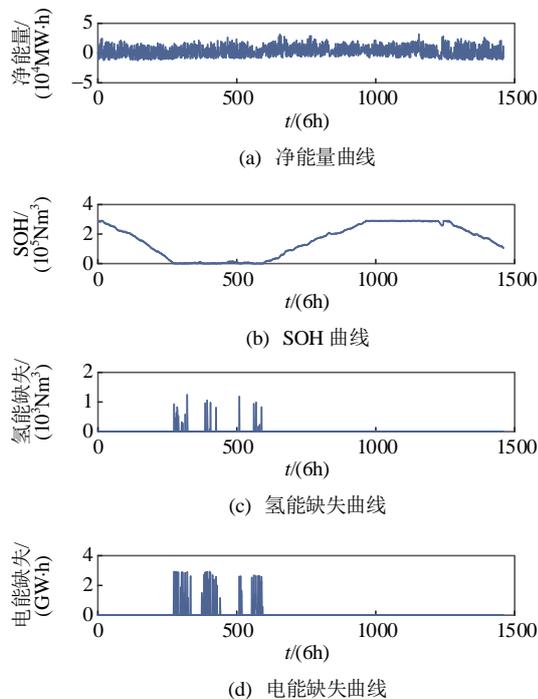


图 13 $M=6\text{h}$ 时, 净能量、SOH 状态与能量缺失曲线

Fig. 13 Daily net energy, SOH status and energy loss when $M=6\text{h}$

大能量连续缺失氢/电能的时间 12h/36h。经计算储氢量 3.9516 亿 Nm^3 时, 系统无 6h 以上的连续能量缺失。

上述结果显示, 系统要求连续能量缺失时间越短, 季节性氢储能规划容量越大。示范区本地氢储能空间的上限为 3.3713 亿 Nm^3 , 不足以支撑系统 6h 以上无能量缺失运行(3.9516 亿 Nm^3), 可通过城市管网存储或需增加系统发电量, 减小储能需求。本文以光伏为例, 计算支撑系统 6h 以上无连续能量缺失运行, 需增加的光伏规模。图 14 为光伏装机规模与储氢需求关系曲线。

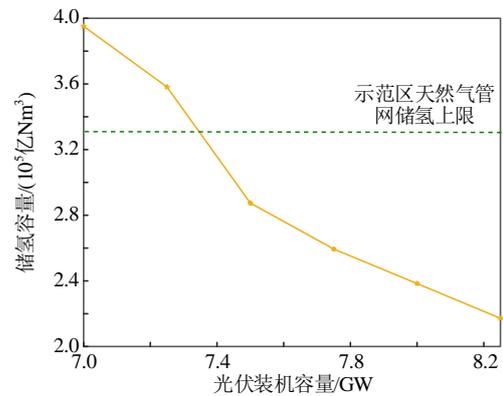


图 14 光伏装机规模与储氢容量需求的关系曲线

Fig. 14 Curve of relationship between PV capacity and hydrogen storage demand capacity

3.3 季节性氢储能经济性评估

由图 14 知, 若规划水平年示范区光伏装机容量 7500MW, 储氢量 2.874 亿 Nm^3 (全部存储于示范区天然气管网内, 天然气运输量 $210.78 \times 10^8 \text{Nm}^3/\text{年}$), 可保证系统无 6h 以上的连续能量缺失; 按步骤 1—7 计算, 所需电解槽与燃料电池额定功率为 358、495.8MW。按式(19)—(23)计算季节性氢储能内部收益率, 计算参数如表 2^[17,35-36]。经计算, 运行方式“富余可再生电—电解槽制氢(141.89MW)—储氢(1.1391 亿 Nm^3)—氢负荷”, 若按照质量分数分摊天然气管道建造成本, 季节性储能系统内部收益率为 11.5%, 大于示范区火电投资项目内部收益率要求 8%; 若按照体积分摊天然气管道建造成本, 季节性储能系统内部收益率小于 0.05%, 不具有投资可行性。运行方式为“富余可再生电—电解槽制氢(216.11MW)—储氢(1.7349 亿 Nm^3)—燃料电池发电(495.8MW)—电负荷”的季节性储能系统不论选用何种方式分摊天然气管道的建造成本内部收益率均小于 0.05%, 即不具有投资可行性, 经济性可

表 2 仿真参数
Table 2 Simulation parameters

	参数	数值
电解槽	投资成本/(元/kW)	3500
	制氢电成本/(元/Nm ³)	0.45
	其他运行成本/(元/Nm ³)	0.03
	寿命/年	10
储氢	质量分数/%	0.136
	体积占比/%	1.36
	运行成本/(元/(kg·km))	0.02
燃料电池	氢气成本/(元/(kW·h))	0
	其他运行成本/(元/(kW·h))	0.03
	投资成本/(元/kW)	7000
	寿命/年	10
	售电价格/(元/(kW·h))	0.5
	售氢价格/(元/kg)	20

行的主要制约是储氢与燃料电池发电系统的一次性投资成本与电-氢-电转换过程的低效率。

4 结论

本文首先提出氢能系统架构及其支撑统一能源系统本质清洁、可靠运行的基本模式；并针对统一能源系统中长时间尺度供能可靠性问题，提出季节性氢储能规划框架。特别地，通过分析统一能源系统对储能功能的不同需求，制定储能互补机制，以短时储能调节时间的上限作为季节性储能能量调节的时间分辨率，进而提出季节性氢储能的配置方法，确保季节性氢储能配置后系统无长时能量缺失。最后，实例验证所提方法的有效性，实验结果显示：季节性氢储能支撑统一能源系统可靠运行技术可行，储氢设施与燃料电池高额投资成本与电-氢-电转换过程的低效率是季节性氢储能经济可行的主要制约。

上述研究主要提出了季节性氢储能规划的范式与方法，案例研究主要讨论了季节性氢储能支撑电、氢可靠供给的场景，是对氢能系统规划的初探。在未来的工作中将进一步探究：统一能源系统背景下，氢储能支撑电、热、气、氢能耦合运行场景下的氢能系统规划，以期补充统一能源系统规划理论。

参考文献

[1] WILBERFORCE T, EL-HASSAN Z, KHATIB F N, et al. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(40): 25695-25734.

[2] 许世森, 张瑞云, 程健, 等. 电解制氢与高温燃料电池

在电力行业的应用与发展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2531-2536.

XU Shisen, ZHANG Ruiyun, CHENG Jian, et al. Application and development of electrolytic hydrogen production and high temperature fuel cell in electric power industry[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2531-2536(in Chinese).

[3] 魏繁荣, 随权, 林湘宁, 等. 考虑制氢设备效率特性的煤风氢能源网调度优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1428-1439.

WEI Fanrong, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Energy control scheduling optimization strategy for coal-wind-hydrogen energy grid under consideration of the efficiency features of hydrogen production equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1428-1439(in Chinese).

[4] 张红, 袁铁江, 谭捷. 统一能源系统氢负荷中长期预测[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3364-3372.

ZHANG Hong, YUAN Tiejia, TAN Jie. Medium and long-term forecast of hydrogen load in unified energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3364-3372(in Chinese).

[5] MAYYAS A, WEI M, LEVIS G. Hydrogen as a long-term, large-scale energy storage solution when coupled with renewable energy sources or grids with dynamic electricity pricing schemes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(33): 16311-16325.

[6] OZAKI M, TOMURA S, OHMURA R, et al. Comparative study of large-scale hydrogen storage technologies: is hydrate-based storage at advantage over existing technologies? [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(7): 3327-3341.

[7] OZARSLAN A. Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(19): 14265-14277.

[8] ANDERSSON J, GRÖNKVIST S. Large-scale storage of hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(23): 11901-11919.

[9] 王天宏, 李奇, 韩莹, 等. 燃料电池混合发电系统等效氢耗瞬时优化能量管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4173-4182.

WANG Tianhong, LI Qi, HAN Ying, et al. Fuel cell hybrid power generation system equivalent hydrogen consumption instantaneous optimization energy management method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4173-4182(in Chinese).

[10] CLÚA J G G, MANTZ R J, BATTISTA H D. Optimal sizing of a grid-assisted wind-hydrogen system[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 166, 402-408.

- [11] DENG Zhihong, JIANG Yuewen. Optimal sizing of wind-hydrogen system considering hydrogen demand and trading modes[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(20): 11527-11537.
- [12] MARCHENKO O V, SOLOMIN S V. Modeling of hydrogen and electrical energy storages in wind/PV energy system on the Lake Baikal coast[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(15): 9361-9370.
- [13] LI Bei, ROCHE R, MIRAOU I A. Microgrid sizing with combined evolutionary algorithm and MILP unit commitment[J]. *Applied Energy*, 2017, 188: 547-562.
- [14] GABRIELLI P, POLUZZI A, KRAMER G J, et al. Seasonal energy storage for zero-emissions multi-energy systems via underground hydrogen storage[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 121: 109629.
- [15] QIU Yue, ZHOU Suyang, WANG Jihua, et al. Feasibility analysis of utilising underground hydrogen storage facilities in integrated energy system: case studies in China[J]. *Applied Energy*, 2020, 269: 115140.
- [16] BREY J J. Use of hydrogen as a seasonal energy storage system to manage renewable power deployment in Spain by 2030[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, doi: 10. 1016/j. ijhydene. 2020. 04. 089.
- [17] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(19): 194-207.
- JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. Review and prospect of seasonal energy storage for high proportion renewable energy power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(19): 194-207(in Chinese).
- [18] 肖晋宇, 侯金鸣, 杜尔顺, 等. 支撑电力系统清洁转型的储能需求量化分析模型与案例分析[J/OL]. *电力系统自动化*, (2020-07-20)[2020-08-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200720.1309.002.html>.
- XIAO Jinyu, HOU Jinming, DU Ershun, et al. Quantitative analysis model and case study of energy storage demand supporting clean transformation of power system[J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*, (2020-07-20)[2020-08-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200720.1309.002.html>(in Chinese).
- [19] VAN DER ROEST E, SNIP L, FENS T, et al. Introducing power-to-H₃: combining renewable electricity with heat, water and hydrogen production and storage in a neighbourhood[J]. *Applied Energy*, 2020, 257: 114024.
- [20] SAMY M M, BARAKAT S, RAMADAN H S. Techno-economic analysis for rustic electrification in Egypt using multi-source renewable energy based on PV/wind/FC[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(20): 11471-11483.
- [21] HUMAN G, VAN SCHOOR G, UREN K R. Power management and sizing optimisation of renewable energy hydrogen production systems[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2019, 31: 155-166.
- [22] GHARIBI M, ASKARZADEH A. Size and power exchange optimization of a grid-connected diesel generator-photovoltaic-fuel cell hybrid energy system considering reliability, cost and renewability[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(47): 25428-25441.
- [23] AL-SHAALAN A M. Reliability evaluation in generation expansion planning based on the expected energy not served[J]. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2012, 24(1): 11-18.
- [24] AYOP R, ISA N M, TAN C W. Components sizing of photovoltaic stand-alone system based on loss of power supply probability[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2731-2743.
- [25] BENAVENTE-ARAOZ F, LUNDBLAD A, CAMPANA P E, et al. Loss-of-load probability analysis for optimization of small off-grid PV-battery systems in Bolivia[J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 3715-3720.
- [26] ACUÑA L G, LAKE M, PADILLA R V, et al. Modelling autonomous hybrid photovoltaic-wind energy systems under a new reliability approach[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 172: 357-369.
- [27] LI Jinghua, FANG Jiakun, ZENG Qing, et al. Optimal operation of the integrated electrical and heating systems to accommodate the intermittent renewable sources[J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 244-254.
- [28] BORNAPOUR M, HOOSHMAND R A, KHODABAKHSHIAN A, et al. Optimal stochastic coordinated scheduling of proton exchange membrane fuel cell-combined heat and power, wind and photovoltaic units in micro grids considering hydrogen storage[J]. *Applied Energy*, 2017, 202: 308-322.
- [29] CHEN Zhanfeng, CHEN Yipeng, WANG Wen, et al. Failure pressure analysis of hydrogen storage pipeline under low temperature and high pressure[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(43): 23142-23150.

- [30] NIERMANN M, BECKENDORFF A, KALTSCHMITT M, et al. Liquid organic hydrogen carrier (LOHC)-assessment based on chemical and economic properties[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(13): 6631-6654.
- [31] WITKOWSKI A, RUSIN A, MAJKUT M, et al. Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2018, 166: 24-34.
- [32] FANG Ruiming, LIANG Yin. Control strategy of electrolyzer in a wind-hydrogen system considering the constraints of switching times[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(46): 25104-25111.
- [33] ZHANG Anan, ZHANG Hong, QARDAN M, et al. Optimal planning of integrated energy systems for offshore oil extraction and processing platforms[J]. Energies, 2019, 12(4): 756.
- [34] 天然气管道建设成本每公里 1000 万 [EB/OL]. 2013[2013-12-09]. <http://vnetcj.jrj.com.cn/2013/12/09115516296654.shtml>.
- [35] 电解水制氢成本究竟有多少? [EB/OL]. 2019[2019-07-04]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20190704/990552.shtml>.

shtml.

- [36] 全球最大质子交换膜燃料电池发电站落户华南理工大学 [EB/OL]. 2010[2010-04-16]. <http://www.membranes.com.cn/xingyedongtai/kejidongtai/2015-01-20/16600.html>.



张红

在线出版日期：2021-04-07。

收稿日期：2020-10-13。

作者简介：

张红(1996)，女，博士研究生，研究方向为氢能与电力、化石能源系统集成，1244001267@qq.com；

*通信作者：袁铁江(1975)，男，教授，博士生导师，研究方向为氢能与电力、化石能源系统集成、储能与新能源发电并网技术，ytj1975@dlut.edu.cn；

谭捷(1995)，男，博士研究生，研究方向为储能与新能源发电并网技术；

开赛江(1967)，男，高级工程师，研究方向储能与新能源发电并网技术；

周专(1987)，男，工程师，研究方向储能与新能源发电并网技术。

(责任编辑 李泽荣)

《中国电机工程学报》连续 19 年荣获 “百种中国杰出学术期刊”称号

2021 年 12 月 27 日，科技部中国科学技术信息研究所通过网络直播方式召开中国科技论文统计结果发布会，发布了中国科技论文整体情况、中国卓越科技论文产出状况报告以及《2021 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》等。

据发布的《2021 年版中国科技期刊引证报告(核心版)自然科学卷》显示，《中国电机工程学报》连续 19 年保持学科综合排名第一，并连续 19 年荣获“百种中国杰出学术期刊”称号，是电气工程学科唯一入选的期刊。

据会上公布的 2020 年度“中国百篇最具影响国内学术论文”和“领跑者 5000——中国精品科技期刊顶尖学术论文”名单显示，《中国电机工程学报》有 2 篇论文入选 2020 年度“中国百篇最具影响国内学术论文”(1. 舒印彪，张智刚，郭剑波，等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(1): 1-8; 2. 谢小荣，刘华坤，贺静波，等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报，2016，36(9): 2366-2372)，有 19 篇论文入选“领跑者 5000——中国精品科技期刊顶尖学术论文”。

《中国电机工程学报》多年来坚持质量导向，致力于发表高水平、有引导力的论文。未来，将一如既往为业内广大科技工作者提供良好的学术交流平台，促进先进科研成果的传播。

Hydrogen Energy System Planning Framework for Unified Energy System

ZHANG Hong¹, YUAN Tiejia^{1*}, TAN Jie¹, KAI Saijiang², ZHOU Zhuan²

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd.)

KEY WORDS: unified energy system; reliability; complementary energy storage mechanism; seasonal hydrogen storage planning

Hydrogen production by electrolysis of clean electric energy, expanding the application of hydrogen energy from the traditional industrial field to power system, thermal system, and transportation system, is an important means to achieve emission reduction and temperature control. A unified energy system (UES) that relies on hydrogen production and storage from renewable energy, coupled with coal/petroleum refining and transportation, provides users with clean electricity, heat, gas, and oil/chemical products are proposed, and the medium and long-term hydrogen energy demand in various fields is also predicted, which provides direction and basis for future clean energy system planning. However, the electricity of the unified energy system comes from a power generation system with a high proportion of renewable energy with volatility and intermittent, therefore, on medium and long-term scales, it is necessary to consider the reliability of random renewable energy supply power/heat/gas. At present, there are little literature on the planning of UES.

How to consider the impact of the randomness of renewable energy on the reliability of the unified energy system, use multi-energy complementary and seasonal energy storage technology to improve energy efficiency, and ensure the reliable supply of electricity/heat/gas/oil chemical products on medium and long-term scales. Firstly, the basic structure of the unified energy system supported by a hydrogen energy system which consists of P2H-HES-H2X (hydrogen to X), and its operating modes are proposed. The unified energy system supported by hydrogen consists of clean energy input, hydrogen production, hydrogen storage, and hydrogen energy conversion, transmission networks are for the transmission of electricity, heat, natural gas, and hydrogen, and load, as shown in Fig. 1, where P2H, HES, H2P, H2G, H2H, and H2T are power to hydrogen, hydrogen storage, hydrogen to gas, hydrogen to hydrogen, and hydrogen to thermal, respectively.

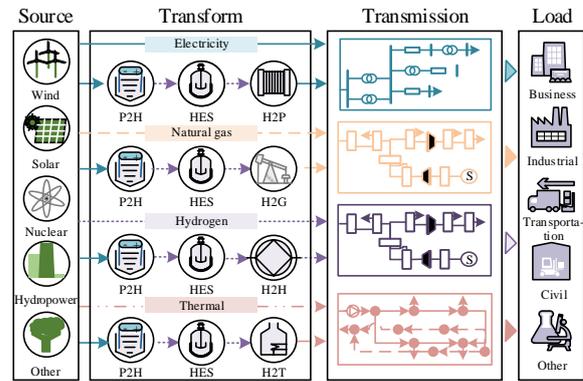


Fig. 1 Structure of unified energy system supported by hydrogen

Then, the seasonal hydrogen storage planning framework is proposed, which mainly analyzes the key characteristics of seasonal hydrogen storage, establishes its operation analysis and energy regulation models, and a complementary energy storage mechanism for the different energy storage functions requirements in unified energy system is developed, which take the upper limit of the short-term energy storage adjustment time as the time resolution of a seasonal energy storage energy adjustment. Based on it, the configuration method of seasonal hydrogen storage system is proposed to ensure that the system has no long-term energy insufficient after seasonal hydrogen storage configuration, as shown in Equations (1)–(3), furthermore conducts a comprehensive evaluation of the seasonal hydrogen storage planning scheme.

$$T_- = \{t_1^-, t_2^-, \dots, t_l^-\} \tag{1}$$

$$T_-^{\max} = \max(T_-) \tag{2}$$

$$T_-^{\max} \leq T_M \tag{3}$$

where: T is the collection of periods of continuous loss of system energy (t_l^-); T_-^{\max} and T_M are the longest period of continuous energy loss, and the maximum period of reliable short-term energy storage M , respectively.

Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed seasonal hydrogen storage planning method are verified by an example of the UES in Xinjiang.