

基于氢能的风-火耦合多能系统设计与综合评估

袁铁江¹,高玲玉¹,谢永胜²,周 专²

(1. 大连理工大学 电气工程学院,辽宁 大连 116024;2. 国网新疆电力有限公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:为了提高火电机组深度调峰极限,挖掘其提升新能源消纳能力的潜力,构建了基于氢能的风-火耦合多能系统。建立了风-火耦合多能系统的设计框架,包括设计原则、系统组成及评价指标体系等,提出了富裕风电制氢支撑的风-火耦合多能系统的总体结构;考虑经济性、能源利用、“双碳”目标、可靠性这4个方面的影响因素,提出了风-火耦合多能系统的多尺度评价指标及其数学模型,并基于模糊层次分析-熵权法确定各指标的权重占比;以某地区拟建的风-火耦合多能系统结构设计为例,验证了所提方法的有效性,可为实际工程建设提供了一定的参考。

关键词:风-火耦合多能系统;调峰;氢能;系统设计;综合评估

中图分类号:TM 711

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110032

0 引言

随着能源革命进程的加快推进,新能源将迎来爆发式增长,但由于受传统发电系统的影响,现阶段仍以火力发电为主^[1]。然而因为风、光等新能源具有间歇性、波动性等特点,新能源接入电力系统后,会对传统火电机组的运行产生较大影响,具体而言,对其调峰提出了更高的要求。特别是在供暖期间,承担一定热负荷的火电机组失去了一部分调峰能力,挤占了风电的消纳空间。如何提高火电机组调峰能力极限,挖掘新能源的大幅消纳潜力,成为国内外关注的课题。氢能作为一种储能方式,具有大规模存储、跨季存储、清洁等特点,可满足资源、环境和可持续发展的要求^[2]。基于氢能的多能耦合系统成为当下的理想系统。

目前,大多数研究着重于新能源制氢以实现其大规模消纳,如文献[3]以高比例可再生能源消纳为目标,建立以电、氢为能源载体,满足冷、热、电等多种负荷的能源系统,并以电氢子系统、氢氢子系统以及各负荷分布来描述电氢能源系统的结构;文献[4]将光伏、电池储能系统、电解槽和燃料电池等元件通过直流母线连接起来,构建了供电、供热、供冷的光伏/电解槽/燃料电池混合系统;文献[5]构建了基于能源供应、转化、传输与存储环节的综合能源系统,对区域内剩余新能源加以利用,实现了能源的梯级利用和互补耦合。目前学者们对新能源与氢能结合的多能系统结构设定及性能分析研究较多,但是对基于氢能的风-火耦合多能系统的结构优化设计

研究较少。而关于能源系统的评估,也有国内外学者进行了诸多研究。文献[6]综合描述了可再生能源参与的多能系统的评价方法,包括层次分析法AHP(Analytic Hierarchy Process)、模糊综合评价法和组合评价法等;文献[7]采用AHP对区域能源供应系统的综合性能进行评价,考虑了经济、能耗和环境等指标;文献[8]基于经济、能源、环保和可靠性这4项指标,运用AHP对含新能源的冷热电联供系统进行评价。上述多层评价指标的选择具有一定的主观性,若有一定的选择参考,评价结果将更具有可靠性。

为此,本文构建了基于氢能的风-火耦合多能系统并对其进行了综合评估:提出系统设计框架,分析各设备工作特性,建立系统总体结构;基于设计原则,考虑经济性、能源利用、“双碳”目标、可靠性这4个方面的影响因素,形成多能系统评价指标体系。

1 多能系统结构设计

1.1 设计框架

针对多能耦合系统的总体结构设计,首先确定设计步骤并设计多能系统结构的框架;其次,基于设计框架,给定含氢能和风电以及火电的供电、冷、热的多能系统设计原则,为后续多能系统结构设计提供坚实依据;然后,分析各部分性能特性,构建多能耦合系统总体结构;最后,基于设计原则提出多能系统的评价指标,对所设计的多能系统进行评价分析。综上,风-火耦合多能系统设计分析框架如图1所示。

1.2 设计原则

基于氢能的风-火耦合多能系统应用场景多变,运行和控制需求也有所不同,且多能系统的负荷形式较多,因此在对其进行结构设计时应考虑以下原则。

收稿日期:2021-06-07;修回日期:2021-09-07

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT20RC(5)021)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(DUT20RC(5)021)

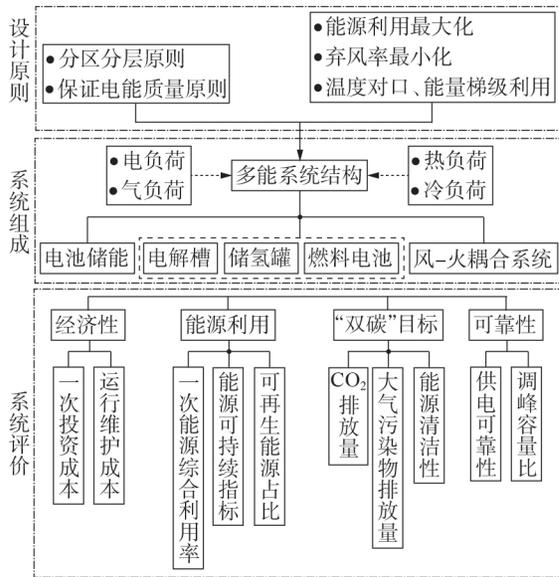


图1 多能耦合系统设计分析框架

Fig.1 Design and analysis framework of multi-energy coupling system

1.2.1 分区分层原则

电源、负荷电压等级相匹配,结构上应有主次之分,为了满足经济性要求,减小网损,采用分区原则^[9]。在保证系统稳定运行的情况下,针对不同的负荷,接入不同的电源。如分布较为分散的小容量负荷,采用分布式风电与氢能系统联合供电,而一般主要负荷地区则与大电网相连,低负荷地区应连接到较低电压等级的电网上。

1.2.2 能源利用最大化

利用能源互补性实现能源利用最大化。首先时间上互补,若多能系统中存在光伏电站,考虑风、光资源分别在夜晚和白天相对充足^[10],将二者接于同一电压等级的馈电线上,实现“白天+黑夜”的能源互补模式,减少供给电源的输出功率波动,提高可再生能源的利用率;再者,利用氢能系统跨季存储的特点^[11],存储在储氢罐内的多余电能实现跨地区的电能运输,从而实现空间上的跨地区能源互补模式。

1.2.3 弃风率最小化

在高比例新能源系统中,应确定合理的弃风率,从而提高系统整体的经济性。合理利用氢能系统中各元件的容量,考虑氢能系统安装的地理位置、系统特性、电源特性以及负荷特性等因素,确保多能系统的总体设计在满足稳定并网运行的情况下,最大化消纳风电,进而实现弃风率最小。

1.2.4 保证电能质量原则

电能质量问题会给电力系统的稳定运行带来不利的影响,通过增加改善电能质量的辅助设备以改善电能质量,如储能装置和无功补偿装置^[12]。氢能作为一种特殊的储能方式,可以平抑新能源的功率波动,吸收系统并网发电的剩余功率,保证负荷不间

断供电等,具有良好的改善电能质量作用。

1.2.5 温度对口、能量梯级利用

一般情况下,由动力子系统产生的高品位能量对应的高温热力系统,主要应用于生产电能并供给电负荷,中品位能量对应的中温热力系统主要用于供热、制冷负荷,其他低品位能量对应的低温热力系统主要用于生活热水等,由此实现能量的梯级利用。氢能系统的接入使系统供应更加多元化,除了具有消纳剩余新能源以及供电的作用外,还承担着供给冷、热负荷以及供氢的任务。其中高温燃料电池工作温度高,其余热可以实现热能的梯级利用。

1.3 系统组成

基于氢能的风-火耦合多能系统由风电机组、火电机组、电解水制氢系统、高温燃料电池系统、余热锅炉、热交换器、吸收式制冷机等部分组成,以满足供能地区冷、热、电等多种负荷需求,其系统架构如图2所示。电负荷需求主要由风电机组和火电机组承担,热负荷需求由热交换器满足,冷负荷需求由吸收式制冷机满足,氢能系统的氢气来自富裕风电,固体氧化物燃料电池SOFC(Solid Oxide Fuel Cell)产生的电能辅助供给电负荷。

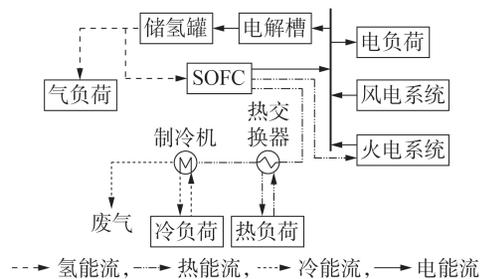


图2 基于氢能的风-火耦合多能系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of wind-thermal power coupling multi-energy system based on hydrogen energy

1.3.1 电解水制氢系统

电解槽的类型主要有碱性电解槽AE(Alkaline Electrolyzer)、质子交换膜电解槽PEME(Proton Exchange Membrane Electrolyzer)、固体氧化物电解槽SOE(Solid Oxide Electrolyzer)等^[13]。现阶段,AE的调节速度可以达到毫秒级,最小运行功率限制在额定功率的5%~10%,适合应用于规模化、高比例风光制氢场景,其成本较低,技术成熟,应用范围较为广泛^[14],综合考虑,本文选取AE。风电制氢已获得广泛研究,本文参考文献[3],使电解水制氢系统输入端口与风电机组直流母线相连,输出端口则与储氢装置相连。

1.3.2 储氢装置

目前大规模储氢的方式主要有高压储氢罐、盐穴中储存气态氢、低温液态储氢、液态有机载体储氢

等^[13]。高压气态储氢现阶段应用最广泛,国内主要采用 35 MPa 碳纤维复合钢瓶,其具有成本低、存储能耗低及充放氢速度快等优点^[15],与燃料电池联合应用广泛。因此本文首选的储氢装置为高压气态储氢罐。

1.3.3 高温燃料电池系统

高温燃料电池系统主要包括换热器、SOFC 及后燃室等^[16]。高温燃料电池系统输入端连接储氢装置和空气输入装置,输出端电能部分与功率变换器相连,进而向电网输送交流电。

SOFC 工作温度为 800~1000 ℃,其燃料的化学能 50%~80% 转化为电能^[16],其余热随高温废气排放到环境中。燃烧后的废气温度可高达 800 ℃,当 SOFC 的电池堆后置有燃烧室时,废气温度将会更高。在本文系统中,利用 SOFC 余热与火电机组的汽轮机联合发电,SOFC 产生的废气和剩余燃料通入后燃室充分燃烧,得到的高温废气首先对 SOFC 电堆输入气体加热,随后经过余热锅炉通入火电机组汽轮机,以减少火电机组燃料的使用量,提高能源利用效率。根据文献^[17],SOFC 的启动时间较长,约为 20~30 min,且在启动时间段内,少量燃料用于输出功率,故总体效率很低。因此,本文利用火电机组的高温蒸汽,对 SOFC 进行启动前的预热,可以有效减少高温燃料电池的启动时间和 SOFC 电堆燃料的使用,提高了系统的运行效率。

1.4 多能系统总体结构

根据上述设计思路、原则及相关设备经济技术问题,设计了某地区拟建的基于氢能的风-火耦合多能系统的总体结构,如图 3 所示。当产生富裕风电且火电机组出力无法下调时,电解水制氢系统中的 AE 将多余电能转换为氢气,消纳剩余新能源,相当于降低了火电机组出力,即缓解了火电机组的深度调峰压力;当电能供给不足时,SOFC 利用储氢罐内存储的氢气发电,保证基于氢能的风-火耦合多能系

统的供电可靠性。图 3 所示的拟建系统中,给定火电机组容量为 200 MW,风电机组容量为 48 MW,氢能系统 AE 额定功率为 20 MW,储氢罐为 35 MPa 碳纤维复合钢瓶,容量为 100 kg,SOFC 额定功率为 100 MW。

2 系统结构评价方法

2.1 评价指标体系分析

以 1.2 节多能系统设计原则为依据,并结合多能系统的特性建立评价指标体系。以经济性对应分区分层原则,以能源利用对应能源利用最大化以及温度对口、能源梯级利用,以“双碳”指标对应弃风率最小化,以可靠性对应保证电能质量原则。至此,将经济性、能源利用、“双碳”目标、可靠性这 4 个指标作为评价指标的第一层次。然后,根据第一层次指标,将一次投资成本、运行维护成本、CO₂ 排放量、供电可靠性等 10 项指标作为第二层次指标,建立基于氢能的风-火耦合多能系统评价指标体系,如图 1 中系统评价所示。

2.1.1 经济性指标

1) 一次投资成本。

一次投资成本 C_1 包括初始投资时各设备的总投资费用,计算公式如式(1)所示。

$$C_1 = \sum_{i=1}^I C_i P_i \quad (1)$$

式中: C_i 为设备 i 的单位费用; P_i 为设备 i 的额定功率; I 为多能系统内关键设备(如火电机组、风电机组、氢能设备、电池储能设备等)总数。

将上述成本现值转换为等年值 C'_1 :

$$C'_1 = C_1 \frac{k_1(1+k_1)^T}{(1+k_1)^T - 1} \quad (2)$$

式中: k_1 为折现率; T 为多能系统的寿命。

2) 运行维护成本。

运行维护成本 C_2 包括运维固定成本 C_{21} 及运维

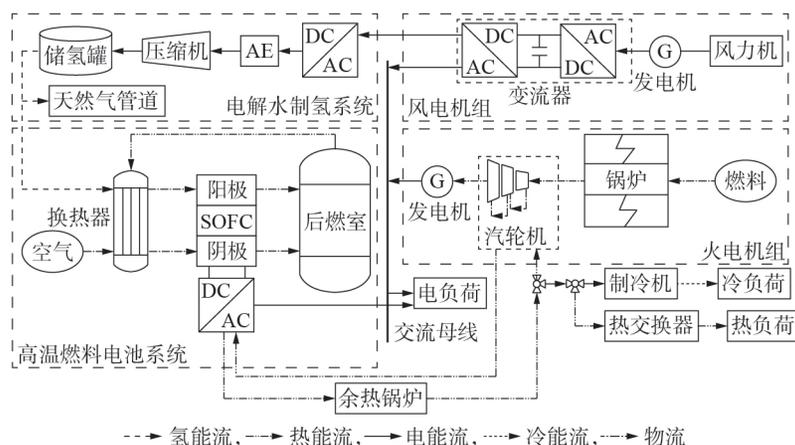


图 3 基于氢能的风-火耦合多能系统结构图

Fig.3 Structure diagram of wind-thermal power coupling multi-energy system based on hydrogen energy

可变成本 C_{22} ,计算公式如式(3)所示。

$$C_2 = C_{21} + C_{22} \quad (3)$$

2.1.2 能源利用指标

1) 一次能源综合利用率。

一次能源综合利用率 η 计算公式如式(4)所示,该指标越高,非可再生一次能源消耗量越低,可再生资源消耗量越高。

$$\eta = \frac{W_{e,t} + W_{h,t} + W_{c,t}}{W_{G,t}} \quad (4)$$

式中: $W_{e,t}$ 、 $W_{h,t}$ 、 $W_{c,t}$ 分别为 t 时段多能系统电、热、冷供应量; $W_{G,t}$ 为 t 时段火电机组发电量。

2) 能源可持续指标。

能源可持续指标是评价能源效益、环境压力及自给能力的综合性指标,代表了多能系统的可持续发展能力。

3) 可再生能源占比。

可再生能源占比指的是风、光等可再生能源的供电量占多能系统冷热电负荷的需求总量的比例。可再生能源占比 β_{RE} 体现了风、光等可再生能源的利用情况,计算公式如式(5)所示。

$$\beta_{RE} = \frac{W_{RE,t}}{W_{e,t} + W_{h,t} + W_{c,t}} \quad (5)$$

式中: $W_{RE,t}$ 为 t 时段多能系统风、光等可再生能源供电量。

2.1.3 “双碳”目标指标

1) CO₂排放量。

考虑多能系统内火电机组等运行过程中产生的碳排放量,主要指CO₂排放量 D_{CO_2} ,记排放CO₂的设备总数为 J ,则 D_{CO_2} 的计算公式如式(6)所示。

$$D_{CO_2} = \sum_t \sum_{j=1}^J \alpha_j W_{j,t} \quad (6)$$

式中: α_j 为设备 j 的CO₂排放系数; $W_{j,t}$ 为 t 时段设备 j 的发电量、发热量或制冷量。

2) 大气污染物排放量。

多能系统的污染物主要来源于火电机组、燃气轮机等设备,本文主要考虑的大气污染物是NO_x等气体,其排放量 D_{NO_x} 的计算公式如式(7)所示。

$$D_{NO_x} = \sum_t \sum_{m^*=1}^M \varepsilon_{m^*} W_{m^*,t} \quad (7)$$

式中: ε_{m^*} 为设备 m^* 的NO_x排放系数; $W_{m^*,t}$ 为 t 时段设备 m^* 的发电量、发热量或制冷量; M 为多能系统内排放NO_x等大气污染物的设备(如火电机组、吸收式制冷机等)总数。

3) 能源清洁性。

能源清洁性指标是评价能源开发、利用等过程中对环境的清洁友好度指标,代表了多能系统从传统能源系统迈向清洁能源系统的能力。

2.1.4 可靠性指标

1) 供电可靠性。

供电可靠性是指供电系统持续供电的能力,系统的可靠性通过能源供应缺额 ΔW_{LOSS} 来表示,定义为:

$$\Delta W_{LOSS} = \frac{\Delta W_{e,t} + \Delta W_{h,t} + \Delta W_{c,t}}{W_{e,t} + W_{h,t} + W_{c,t}} \quad (8)$$

式中: $\Delta W_{e,t}$ 、 $\Delta W_{h,t}$ 、 $\Delta W_{c,t}$ 分别为 t 时段电、热、冷负荷的供应偏差量。

2) 调峰容量比。

调峰容量比 δ 定义为系统内运行机组的可调容量与机组额定总容量的比值,体现了系统调峰能力的可靠性,计算公式如式(9)所示。

$$\delta = \frac{\sum_t \sum_{r=1}^R P_{flex,t,r}}{\sum_{r=1}^R P_{N,r}} \quad (9)$$

式中: R 为运行机组的数量; $P_{flex,t,r}$ 为 t 时段机组 r 的可调容量; $P_{N,r}$ 为机组 r 的额定容量。

2.2 指标计算处理方法

若指标计算只采用主观评价法,则评价结果易受专家主观意愿主导;若只采用客观评价法,则过于依赖指标数学规模,缺少决策者的引导作用。因此,本文采用模糊AHP与熵权法结合的组合法,这既能体现专家的主观决策意见,又能考虑事物发展的客观事实规律。

2.2.1 基于模糊AHP的主观评价法

定性指标具有难以量化的特点,可以基于模糊AHP的主观评价法对其赋权,具体步骤如下^[18]。

1) 建立指标矩阵。

将评估指标体系中的 n 个一级指标记为:

$$U = [U_1, U_2, \dots, U_n] \quad (10)$$

将 m 个二级指标记为:

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_m] \quad (11)$$

2) 构建判断矩阵。

为确定各层指标间的关系,基于指标的相对重要程度,构建两两判断矩阵 A ,如式(12)所示。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: a_{ij} 为指标 a_i 与指标 a_j 的隶属度程度。 a_i 与 a_j 之间的重要程度用1—9及其倒数表示。将矩阵 A 进行归一化处理,即可得到指标权重,直观显示各指标间的重要程度关系。

3) 确定权重。

计算判断矩阵的最大特征值 λ_{max} ,归一化处理得到所求权重向量 W 。

4) 检验矩阵一致性。

基于判断矩阵的最大特征根及其特征向量检验矩阵一致性。若矩阵的一致性指标 γ_{CI} 、 γ_{CR} 通过检验,则所求的特征向量即为其权重;若不能通过检验,则该判断矩阵构建不合理,需要重新构建矩阵。

$$\gamma_{CI} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (13)$$

$$\gamma_{CR} = \frac{\gamma_{CI}}{\gamma_{RI}} \quad (14)$$

式中: γ_{RI} 为随机一致性指标。若 $\gamma_{CR} < 0.1$,则该矩阵通过一致性检验;若没有满足上述条件,则继续进行判断,直到满足一致性检验条件。

5) 构建模糊变换矩阵。

对评价指标体系中各指标进行评价,得到评价指标与评分语句集的对对应关系,构建模糊变换矩阵 $R=[r_{ij}]$,本文采用专家评价法确定 r_{ij} 取值,评分集等级为优、良、差,分别对应的分数为 95、65、35 分。

6) 确定综合评分。

根据权重向量 W 与模糊变化矩阵 R 进行模糊运算,得到综合评价结果。

2.2.2 基于熵权法的客观评价法

为避免模糊 AHP 的主观性太强,提出基于熵权法的客观评价法对其进行修正,熵权法具体步骤参考文献[19-20]。

3 算例分析

本文以某地区拟建的风-火联合发电系统为例,该地区是风能资源丰富的地区之一,春季风速较大,夏秋季风速较小,平均风速为 3.5 m/s。选取该地区典型日,利用 MATLAB 拟合冷、热、电负荷曲线,夏季典型日冷、热、电负荷曲线见图 4。

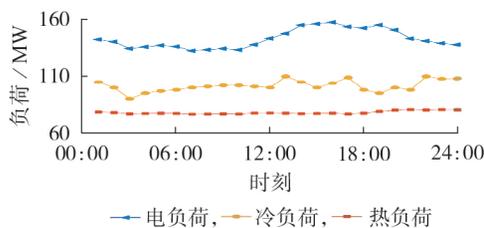


图 4 夏季典型日冷、热、电负荷

Fig.4 Typical daily cooling,heating and power load in summer

对传统风-火联合系统、基于电池储能及基于氢能的风-火耦合系统进行评价比较,氢能系统包括 AE、高压储氢罐和 SOFC,具体系统方案如表 1 所示。参考文献[16]中各设备参数及该地区实际能源情况,得到各系统方案的定量指标计算结果如表 2 所示。

首先运用模糊 AHP 对各指标进行权重计算,构

表 1 多能系统具体方案

方案	多能系统具体方案
1	200 MW 火电机组+48 MW 风电机组
2	200 MW 火电机组+48 MW 风电机组+20 MW / 40 MW·h 铅酸电池储能
3	200 MW 火电机组+48 MW 风电机组+20 MW / 100 kg / 100 MW 氢能系统

表 2 各方案评价指标计算结果

指标	方案 1	方案 2	方案 3
一次投资成本 / 亿元	13.68	13.92	17.95
运行维护成本 / 亿元	1.5641	1.5645	1.5870
一次能源综合利用率	1.2540	1.2472	1.2903
可再生能源占比	0.1380	0.1456	0.2159
CO ₂ 排放量 / kg	1234.4980	1241.2328	1199.7624
大气污染物排放量 / kg	2.2085	2.2205	2.1464
供电可靠性	0.1781	0.0815	0.0010
调峰容量比	0.5968	0.6269	0.7282

建一级指标判断矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 & 3 \\ 3 & 1 & 3 & 3 \\ 2 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

经过归一化处理得到权重向量为:

$$W = [0.1895, 0.4768, 0.2262, 0.1076]$$

由此可知,在一级指标中,能源利用指标最为重要,经济性其次,这也呼应了本文在考虑一定经济性的情况下,以能源利用为主要考虑指标的中心思想。然后,建立二级指标判断矩阵为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1/3 \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}, A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

经过归一化及一致性检验后,得到准则层对指标层的权重向量分别为:

$$W_1 = [0.66667, 0.33333]$$

$$W_2 = [0.58889, 0.25185, 0.15926]$$

$$W_3 = [0.29726, 0.16378, 0.53896]$$

$$W_4 = [0.75, 0.25]$$

再基于模糊综合评价法,得到各方案二级指标权重图如图 5 所示,图中二级指标 1 对应图 1 中一次投资成本,其他依此类推。

基于主观评价,未加入储能的传统风-火耦合系统在经济性方面最优,在“双碳”目标和可靠性方面权重占比一般,而在能源利用方面权重占比较小,因此在构建风-火耦合系统时考虑引入储能系统。对比方案 2、3,电池储能和氢能在经济性、可靠性和

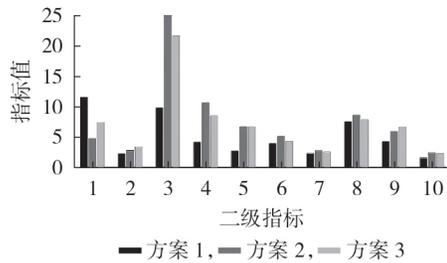


图5 基于模糊AHP的二级指标值

Fig.5 Second level index values based on fuzzy AHP

“双碳”目标方面的效果相差较小,需要进一步分析研究。下面利用上述熵权法步骤求取各指标的客观权重,如式(15)所示。

$$\lambda=[0.0713, 0.0713, 0.1231, 0.0812, 0.1403, 0.1220, 0.1221, 0.0812, 0.0790, 0.1085] \quad (15)$$

最后,依照2.2节中所提的指标权重计算方法,得到各指标的主观、客观及组合权重结果,见表3。

表3 二级指标权重计算结果

Table 3 Calculation results of second level index weights

二级指标	属性	主观权重	客观权重	组合权重
1	极小型	0.1263	0.0713	0.095783
2	极小型	0.0632	0.0713	0.060728
3	极大型	0.2808	0.1231	0.209407
4	极大型	0.1201	0.0812	0.093943
5	极大型	0.0759	0.1403	0.105894
6	极小型	0.0672	0.1220	0.092258
7	极小型	0.0370	0.1221	0.092054
8	极大型	0.1219	0.0812	0.095040
9	极小型	0.0807	0.0790	0.071854
10	极大型	0.0269	0.1085	0.083038

各方案一级指标权重见图6。由图可知,在构建风-火耦合系统时,应积极利用储能系统优势,不

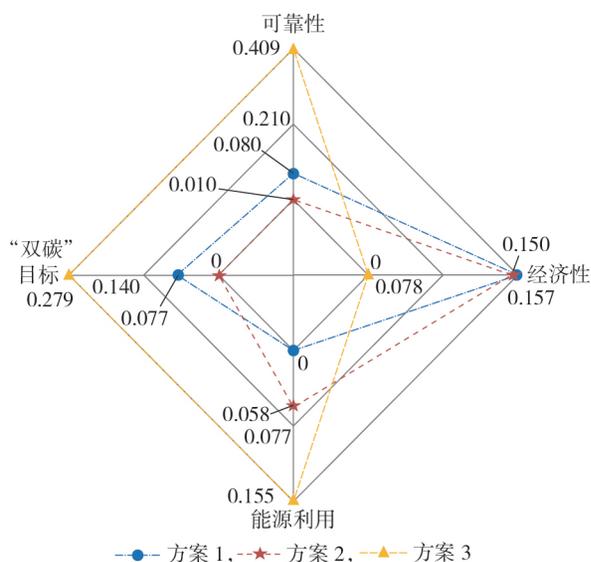


图6 各方案一级指标权重

Fig.6 First level index weights of each scheme

同情景下加入不同类型的储能系统。当传统电源供给可靠、充足时,选择电池储能具有良好的经济性;当在追求“双碳”目标、确保能源实现有效利用时,考虑选择经济性较差的氢能系统。相比于传统风-火联合发电系统,加入氢能后的风-火耦合多能系统的可再生能源占比提高了56.45%,调峰容量提高了22.02%。

为验证本文所选方案的合理性,将模糊AHP、熵权法和组合权重法计算结果进行比较,结果如表4所示。

表4 3种方法的评价结果比较

Table 4 Comparison of evaluation results among three methods

方案	模糊AHP		熵权法		组合权重法	
	评分	排序	评分	排序	评分	排序
1	50.117	3	0.1776	2	0.2340	3
2	71.447	2	0.1305	3	0.2801	2
3	74.948	1	0.6918	1	0.3393	1

由表4可知,采用模糊AHP和组合权重法得到的结果均为方案3>方案2>方案1。虽然采用模糊AHP所得结果与最终结果相同,但是其主观色彩过于浓烈,缺少客观性;而熵权法过度依赖数据,忽略了决策者的意见导向作用,因此与组合权重法的结果存在偏差。相比之下,组合权重法同时考虑了主观与客观权重,评价结果较为合理。

4 结论

为响应国家能源政策,推动能源清洁低碳利用,氢能逐渐获得广泛应用。针对风-火联合发电系统存在的弃风及火电机组深度调峰困难等问题,设计了基于氢能的“双碳”目标风-火耦合多能系统。本文探索性地提出了基于氢能的“双碳”目标风-火耦合多能系统的基本结构,从设计框架出发,按步分析建立多能系统,并给出多能流动方式,为未来氢能耦合传统发电的新型电力系统的构建提供设计思路;基于设计原则建立系统综合评价体系,有效证明了氢能系统在能源利用、可靠性及“双碳”目标方面的优势。在未来的研究工作中,笔者将进一步探讨基于氢能的“双碳”目标风-火耦合多能系统的参数设计,更加完善地评估氢能加入传统风-火联合系统后给其带来的影响。

参考文献:

- [1] 黄子硕,何桂雄,闫华光,等. 园区级综合能源系统优化模型功能综述及展望[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):10-18. HUANG Zishuo, HE Guixiong, YAN Huaguang, et al. Overview and prospect of optimization model function for community-scale integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 10-18.
- [2] 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.
- [3] 潘光胜, 顾伟, 张会岩, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电气能源系统[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23):1-10.
PAN Guangsheng, GU Wei, ZHANG Huiyan, et al. Electricity and hydrogen energy system towards accommodation of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23):1-10.
- [4] CEYLAN C, DEVRIM Y. Design and simulation of the PV / PEM fuel cell based hybrid energy system using MATLAB / Simulink for greenhouse application[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(42):22092-22106.
- [5] 刘晓鸥, 葛少云. 区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8):8-18.
LIU Xiaou, GE Shaoyun. Definition and correlation analysis on energy utilization efficiency of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8):8-18.
- [6] 王庆刚, 杨谋存, 朱跃钊, 等. 可再生能源多能互补热电气联产系统评价方法综述[J]. 电网技术, 2021, 45(3):937-950.
WANG Qinggang, YANG Moucun, ZHU Yuezhao, et al. Review on evaluation methods of combined heating, power and biogas system coupled with renewable energy[J]. Power System Technology, 2021, 45(3):937-950.
- [7] 张英婕, 王洪强. 基于组合赋权和灰色关联投影法的区域能源供应系统评价研究[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(7):26-34.
ZHANG Yingjie, WANG Hongqiang. Evaluation research of regional energy supply system based on combination weight and grey relation projection method[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2021, 51(7):26-34.
- [8] 张世翔, 吕帅康. 面向园区微电网的综合能源系统评价方法[J]. 电网技术, 2018, 42(8):2431-2439.
ZHANG Shixiang, LÜ Shuaikang. Evaluation method of park-level integrated energy system for microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2431-2439.
- [9] 肖峻, 蒋迅, 郭伟, 等. 分区柔性互联城市电网的最大供电能力分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8):66-73.
XIAO Jun, JIANG Xun, GUO Wei, et al. Total power-supply capability of urban power grid with flexibly-interconnected partitions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):66-73.
- [10] 刘乔波, 谢平平, 欧阳金鑫, 等. 基于异质能源多时间尺度互补的动态经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6):55-64.
LIU Qiaobo, XIE Pingping, OUYANG Jinxin, et al. Dynamic economic dispatch strategy based on multi-time scale complementarity of heterogeneous energy sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):55-64.
- [11] 张红, 袁铁江, 谭捷, 等. 面向统一能源系统的氢能规划框架[J/OL]. 中国电机工程学报. [2021-06-07]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201904>.
- [12] RAJAMAND S. Loss cost reduction and power quality improvement with applying robust optimization algorithm for optimum energy storage system placement and capacitor bank allocation[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(14):11973-11984.
- [13] 曹军文, 郑云, 张文强, 等. 能源互联网推动下的氢能发展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(4):302-311.
CAO Junwen, ZHENG Yun, ZHANG Wenqiang, et al. Hydrogen energy development driven by the energy internet[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(4):302-311.
- [14] 沈小军, 聂聪颖, 吕洪. 计及电热特性的离网型风电制氢碱性电解槽阵列优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3):463-472.
SHEN Xiaojun, NIE Congying, LÜ Hong. Coordination control strategy of wind power-hydrogen alkaline electrolyzer bank considering electrothermal characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3):463-472.
- [15] 单彤文, 宋鹏飞, 李又武, 等. 国际氢供应链与氢贸易的储运技术支撑[J]. 现代化工, 2020, 40(1):8-13.
SHAN Tongwen, SONG Pengfei, LI Youwu, et al. Storage and transportation technical support for international hydrogen supply chain and hydrogen trade[J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(1):8-13.
- [16] 李争, 张蕊, 孙鹤旭, 等. 可再生能源多能互补制-储-运氢关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3):446-462.
LI Zheng, ZHANG Rui, SUN Hexu, et al. Review on key technologies of hydrogen generation, storage and transportation based on multi-energy complementary renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3):446-462.
- [17] SOLANGI Y A, CHENG L, SHAH S A A. Assessing and overcoming the renewable energy barriers for sustainable development in Pakistan: an integrated AHP and fuzzy TOPSIS approach[J]. Renewable Energy, 2021, 173:209-222.
- [18] 吴涵, 陈彬, 管霖, 等. 供电可靠性提升措施优选的量化评价方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5):126-130.
WU Han, CHEN Bin, GUAN Lin, et al. Quantitative evaluation and optimized selection of power supply reliability enhancement measures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5):126-130.
- [19] LI Rongbo, LIU Dan, ZHANG Yanke, et al. Comprehensive evaluation of load adjustment plans for cascade hydropower stations based on moment estimation method and grey target model[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(6):1609-1617.
- [20] 金璐, 何伟, 闫华光, 等. 基于改进TOPSIS的乡镇综合能源系统效益综合评价方法[J/OL]. 电测与仪表. [2021-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210429.1417.020.html>.

作者简介:



袁铁江

袁铁江(1975—),男,辽宁大连人,教授,博士研究生导师,主要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(E-mail:ytj1975@dlut.edu.cn);

高玲玉(1996—),女,吉林长春人,硕士研究生,研究方向为氢能与电力、储能与新能源发电并网技术(E-mail:gly101309@mail.dlut.edu.cn);

谢永胜(1968—),男,重庆人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统规划与分析(E-mail:1319124529@qq.com);

周专(1987—),男,新疆乌鲁木齐人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统规划(E-mail:zhouzhuang916106@163.com)。

(编辑 李玮)

(下转第 255 页 continued on page 255)

Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality

QIU Weiqiang¹, WANG Maochun², LIN Zhenzhi¹, YANG Li¹, WANG Lianfang², SUN Jianying²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

Abstract: Driven by the carbon peak and carbon neutrality target, SES (Shared Energy Storage), as a novel business mode combining energy storage technology and shared economy principle, has the potential to play an important role in the new energy accommodation scenario. However, how to evaluate the development and operation of SES business mode is still lack of unified evaluation standards and methods. Therefore, the basic elements of SES business mode in the new energy consumption scenario are analyzed, the comprehensive evaluation index system of SES is designed, and the definition and connotation of each index in the index system are summarized in detail. Then, the fuzzy analytic hierarchy process is used to assign weights to indexes, and the horizontal comparison evaluation between different evaluation schemes and the vertical comparison evaluation between evaluation scheme and target scheme are realized by designing target scheme and adopting improved TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution). Finally, the actual data of a SES trading pilot is taken as an example to analyze and verify that the designed index system can effectively reflect the operation status, existing problems and changing trends of SES.

Key words: shared energy storage; carbon emission target; new energy accommodation; comprehensive evaluation index system; fuzzy analytic hierarchy process; TOPSIS; business modes

(上接第 233 页 continued from page 233)

Design and comprehensive evaluation of wind-thermal power coupling multi-energy system based on hydrogen energy

YUAN Tiejia¹, GAO Lingyu¹, XIE Yongsheng², ZHOU Zhuan²

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

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: In order to improve the deep peak shaving limit of thermal power units and tap their potentials to improve the consumption capacity of new energy, a wind-thermal power coupling multi-energy system based on hydrogen energy is constructed. The design framework of wind-thermal power coupling multi-energy system is established, including design principle, system composition, evaluation index system, etc. The overall structure of wind-thermal power coupling multi-energy system supported by affluent wind power producing hydrogen is proposed. Considering the four influence factors of economy, energy utilization, “double carbon” target and reliability, the multi-scale evaluation index and its mathematical model of wind-thermal power coupling multi-energy system are proposed, and the weight proportion of each index is determined based on fuzzy analytic hierarchy process entropy weight method. Taking the structural design of the proposed wind-thermal power coupling multi-energy system in an area as an example, the effectiveness of the proposed method is verified, which provides a certain reference for practical engineering construction.

Key words: wind-thermal power coupling multi-energy system; peak shaving; hydrogen energy; system design; comprehensive evaluation