

基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置

司 杨^{1,2}, 陈来军¹, 陈晓孜¹, 高梦宇¹, 麻林瑞¹, 梅生伟^{1,2}

(1. 青海大学 启迪新能源学院 青海省清洁能源高效利用重点实验室, 青海 西宁 810016;

2. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:氢储能系统受地理、气候条件限制较小,在构建面向高比例新能源电力系统的风-储混合系统中极具发展潜力。然而,由于风电场的出力具有不确定性,氢储能系统需要在储能、释能、热备用等工况下频繁切换,内部热能供需平衡也呈现出不确定性,进而影响其响应速度甚至实际可用容量。为此,设计了考虑热平衡的风-氢混合系统,构建了考虑电解槽、燃料电池间歇工作模式热平衡的氢储能系统模型;在此基础上,综合考虑风电场功率的不确定性和氢储能系统的投资成本,提出了考虑热平衡不确定性的风-氢混合系统氢储能容量优化配置方法。采用分布鲁棒方法对风电场功率的不确定性进行建模,并将其转化为一组线性风险机会约束进行求解。基于实际风电场数据构建算例,对所提模型和方法进行验证和分析。结果表明,氢储能系统中电解槽和燃料电池的散热系数对系统实际可用容量具有重要的影响,在风-氢混合系统的氢储能容量配置中考虑热平衡约束可以有效提升氢储能系统的实际可用容量和混合系统的经济性。

关键词:氢储能;风-氢混合系统;容量配置;分布鲁棒;热平衡

中图分类号:TM 732;TK 02

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110012

0 引言

随着世界能源生产、消费格局的变革,以新能源为主体的新型电力系统已成为未来我国电力系统转型发展的重要方向^[1]。近年来,以风能、光伏为代表的新能源产业得到了快速的发展。在一些资源富集地区,新能源装机容量已超过常规机组^[2]。然而,新能源的输出功率具有间歇性、波动性特征,已成为高比例新能源电网安全、稳定、经济运行面临的主要挑战^[3]。

新能源与储能系统构成的混合系统成为解决这一问题的重要技术路线,得到了国内外学者的广泛关注 and 深入研究,其中优化配置储能系统的容量已成为这一领域的研究热点。现有研究从不同储能系统的角度,探讨了新能源与电化学储能、压缩空气储能、抽水蓄能、氢储能等所构成的混合系统的容量配置问题^[4-5],并通过鲁棒优化^[6]、随机优化^[7]以及分布鲁棒优化^[8]对混合系统中的不确定性进行建模。其中,分布鲁棒方法能够在保守性和计算效率之间取

得平衡,近年来得到了广泛的关注。文献[9]给出了将 Wasserstein 散度构成的模糊集转化为风险机会约束的方法。文献[10]进一步证明了基于 Wasserstein 散度分布鲁棒方法的性能。文献[11]针对多区域电网的经济调度问题,构建了基于矩的分布鲁棒降维模糊集,提高了计算效率,降低了电网成本。文献[12]针对高比例风电电力系统,提出了考虑动态功率调节裕度的水-火-荷混合系统的分布鲁棒调度方法。

对于高比例新能源电力系统而言,氢储能作为完全清洁的储能方式,既具备电化学储能响应速度快的特点,又具备物理储能规模大、能跨季节存储的优势,成为近年来储能系统研究的新热点^[13]。氢储能系统通过配置电解槽和燃料电池吸收和发出功率,为新能源场站提供正、负备用,实现调峰服务。文献[14]对含氢储能的混合风电系统进行了建模和分析,搭建仿真模型并通过物理实验验证了模型原理。文献[15]设计了一种包含风电、光伏和氢储能的混合新能源系统,并采用目标适应度函数建模,取得了较好的容量优化效果。文献[16]进一步提出了一种面向高渗透率新能源电网的电-氢综合能源系统的规划模型。

然而,氢储能系统的响应速度和输出效率均与电解槽以及燃料电池工作时的电化学反应温度密切相关。文献[17]通过对电化学反应过程建立详细的热交换模型,构建了电解槽间歇运行的热-氢效率模型,并基于此提出了风-氢混合系统的容量优化方

收稿日期:2021-05-30;修回日期:2021-08-16

基金项目:国家自然科学基金智能电网联合基金资助项目(U1766203);青海省重点研发与转化计划项目(2021-GX-109);青海省基础研究计划项目(2021-ZJ-948Q)

Project supported by the Smart Grid Joint Fund of National Natural Science Foundation of China(U1766203), the Key R&D and Transformation Plan Program of Qinghai Province(2021-GX-109) and the Basic Research Plan Project of Qinghai Province(2021-ZJ-948Q)

法。现有研究表明,当电化学反应温度低于或者高于额定温度时,设备的工作效率都将下降,从而导致设备的实际可用容量减少。因此,维持电解槽和燃料电池处于额定反应温度可以有效地提高氢储能系统响应功率波动的速度和效率。由于受到新能源功率波动的影响,氢储能系统的运行模式具有间歇特性,使得电解槽和燃料电池的反应温度与风电场功率的不确定性相耦合,呈现动态热平衡的特征。由此可见,保持系统间歇工作模式的热平衡是改善氢储能系统响应速度以及经济运行的关键。这使得在配置氢储能系统容量时,不仅需要满足产氢-耗氢平衡,还需要考虑系统运行状态产热与备用状态耗热的不确定性。

已有研究忽略了间歇工作模式下氢储能系统的动态热平衡对系统性能的影响,使得容量配置结果过于乐观,在实际运行中难以达到预期效果。相较于光伏-氢混合系统,风电场长时间连续运行使得风-氢混合系统受氢储能系统热平衡的影响更大。为此,本文以风-氢混合系统为研究对象,首先根据氢储能系统的运行特征,设计了考虑风-氢混合系统间歇工作模式下持续热备用工况热平衡的氢储能系统结构,并给出了系统各组成部分的数学模型;在使用分布鲁棒方法对风电场输出功率的不确定性进行建模的基础上,进一步提出了降低储能系统投资成本的分布鲁棒容量优化配置方法;以实际风电场数据为例对所提模型和方法进行验证;并对影响系统容量和热平衡的关键参数进行分析。

1 考虑热平衡的风-氢混合系统的结构以及模型

考虑热平衡的风-氢混合系统的结构示意图如图1所示,其由风电场、含热平衡系统的氢储能系统和能量管理系统构成。在能量管理系统的协调下,氢储能系统通过电解槽将风电场超发的电能转化为氢能存贮在储氢罐中。当风电功率不足时,通过燃料电池向电网提供电能,从而达到平抑风电波动的目的。

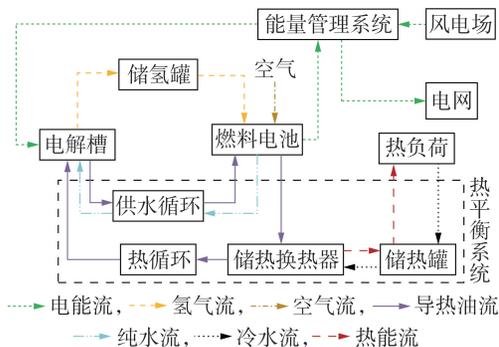


图1 风-氢混合系统的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of wind-hydrogen hybrid system

1.1 含热平衡系统的氢储能系统模型

氢储能系统由电解槽、燃料电池、储氢系统以及热平衡系统构成。其中电解槽采用技术成熟、响应速度快的碱池电解槽作为产氢装置。根据碱池电解槽的工作温度,选取质子膜燃料电池与之相匹配。储氢系统包括储氢罐、空气系统以及供水循环系统。热平衡系统由储热罐、储热换热器以及热循环系统构成,其中热循环系统在电解槽、燃料电池、供水罐以及储热罐之间建立供热/冷却循环,以维持系统温度稳定。氢储能系统各组成部分的数学模型分析如下。

1.1.1 碱池电解槽模型

碱池电解槽的响应时间短,非常适用于与风电场构成氢储能系统,其简化模型^[18]可表示为:

$$\begin{cases} P_{\text{ele}}^t = \dot{n}_{\text{H}_2}^t H_{\text{HHV}} + Q_{\text{ele}}^t \\ \eta_{\text{ele}} = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2}^t H_{\text{HHV}}}{P_{\text{ele}}^t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{ele}^t 、 Q_{ele}^t 分别为 t 时刻碱池电解槽的耗电功率、产热功率,单位为kW; $\dot{n}_{\text{H}_2}^t$ 为 t 时刻的产氢速率,单位为mol/h; H_{HHV} 为氢气的高热值,单位为kJ/mol; η_{ele} 为碱池电解槽的效率。

1.1.2 质子膜燃料电池模型

质子膜燃料电池的工作温度与碱池电解槽相匹配,便于热平衡系统协调控制运行工况散热和备用工况保温,其基本模型可表示为:

$$\begin{cases} \dot{m}_{\text{H}_2}^t H_{\text{HHV}} = P_{\text{fuel}}^t + Q_{\text{fuel}}^t \\ \eta_{\text{fuel}} = \frac{P_{\text{fuel}}^t}{\dot{m}_{\text{H}_2}^t H_{\text{HHV}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{fuel}^t 、 Q_{fuel}^t 分别为 t 时刻质子膜燃料电池的发电功率、产热功率,单位为kW; $\dot{m}_{\text{H}_2}^t$ 为 t 时刻质子膜燃料电池的耗氢速率,单位为mol/h; η_{fuel} 为质子膜燃料电池的效率。

1.1.3 储氢系统模型

储氢系统在电解水过程中将产生的氢气存储于储氢罐中,在发电过程中将氢气和氧气输送到燃料电池进行发电。同时,储氢系统通过供水循环为电解槽供水并回收燃料电池的发电产物。以储氢罐存储的总能量作为参数,可以得到储氢罐的能量平衡模型为:

$$S_{\text{H}_2}^t = S_{\text{H}_2}^{t-1} + \left(\eta_{\text{ele}} P_{\text{ele}}^t - \frac{P_{\text{fuel}}^t}{\eta_{\text{fuel}}} \right) \Delta \tau \quad (3)$$

式中: $S_{\text{H}_2}^{t-1}$ 、 $S_{\text{H}_2}^t$ 分别为 $t-1$ 时刻、当前 t 时刻储氢罐存储的总能量,单位为kW·h; $\Delta \tau$ 为时间间隔。

1.1.4 热平衡系统模型

热平衡系统用于在间歇工作模式下平衡氢储能系统各环节的热能需求,回收余热,并利用氢储能系

统产生的多余热能为其他热负荷供热。由于风电具有波动性和间歇性,氢储能系统中的电解槽和燃料电池需要始终保持热备用工况,随时吸收超发功率或提供缺额功率。这就要求热平衡系统在制氢时存储电解槽产生的多余热能,一方面为进入电解槽的工质预热,另一方面为燃料电池提供热能以维持额定温度。同理,在燃料电池发电时,热平衡系统在回收其产生热能的同时,也需要为电解槽提供热能。热平衡系统的模型可表示为:

$$S_{\text{thermal}}^t = S_{\text{thermal}}^{t-1} + \left[\eta_{\text{ex}} (Q_{\text{ele}}^t + Q_{\text{fuel}}^t - Q_{\text{con}}^t) - \frac{Q_{\text{load}}^t}{\eta_{\text{ex}}} \right] \Delta \tau \quad (4)$$

式中: S_{thermal}^{t-1} 、 S_{thermal}^t 分别为 $t-1$ 时刻、当前 t 时刻储热罐存储的热能,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$; Q_{con}^t 、 Q_{load}^t 分别为 t 时刻系统消耗的热功率、为供热负荷提供的热功率,单位为 kW ; η_{ex} 为储热换热器的效率。

系统消耗的热功率 Q_{con}^t 由电解槽散热功率、燃料电池散热功率、供水循环预热功率三部分组成,如式(5)所示。

$$\begin{cases} Q_{\text{con}}^t = (T_{\text{ele}}^t - T_{\text{atm}}^t) \lambda_{\text{ele}} P_{\text{ele}} + (T_{\text{fuel}}^t - T_{\text{atm}}^t) \lambda_{\text{fuel}} P_{\text{fuel}} + \\ \quad \dot{n}_{\text{water}}^t c_p (T_{\text{ele}}^t - T_w^t) \\ \lambda_{\text{ele}} = \frac{A_{\text{ele}}}{R_{\text{ele}}}, \lambda_{\text{fuel}} = \frac{A_{\text{fuel}}}{R_{\text{fuel}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{ele}^t 、 T_{fuel}^t 、 T_{atm}^t 分别为 t 时刻电解槽的工作温度、燃料电池的工作温度、环境温度,单位为 K ; λ_{ele} 、 λ_{fuel} 分别为电解槽、燃料电池单位容量的散热系数^[19],定义其为单位容量散热面积与单位面积热阻的比值; A_{ele} 、 A_{fuel} 分别为电解槽、燃料电池单位容量的散热面积,单位为 m^2 ; R_{ele} 、 R_{fuel} 分别为电解槽、燃料电池的单位面积热阻,单位为 $\text{m}^2\cdot\text{K}$; P_{ele} 、 P_{fuel} 分别为电解槽、燃料电池的装机容量,单位为 kW ; \dot{n}_{water}^t 为 t 时刻进入电解槽的水的摩尔质量流量,单位为 mol/h ; T_w^t 为 t 时刻进入电解槽的水的温度,单位为 K ; c_p 为水的比热容,单位为 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。本文研究热平衡系统连续稳定运行状态下的容量配置,系统工作温度 T_{ele}^t 、 T_{fuel}^t 和 T_w^t 可假定为常数。

1.2 风电场输出功率模型

根据文献[8]建立风电场输出功率模型,如式(6)所示。

$$\tilde{P}_w^t = \lambda_w^t P_w \quad (6)$$

式中: P_w 为风电场的装机功率,单位为 kW ; λ_w^t 为根据风速得到的 t 时刻的功率系数; \tilde{P}_w^t 为 t 时刻风电场的实际输出功率,单位为 kW 。而风电场参与电网调度的可信并网功率可通过预测功率与可用系数的乘积表示,即:

$$P_w^t = \delta \tilde{P}_w^t \quad (7)$$

式中: P_w^t 、 \tilde{P}_w^t 分别为 t 时刻风电场的可信并网功率、日前预测输出功率,单位为 kW ; δ 为风电功率的可用

系数,表示风电场运营者利用风电功率预测值制定发电计划的决策, $\delta=1$ 表示运营者按功率预测值制定发电计划, δ 值越小表示运营者的决策越谨慎,实际输出功率高于调度曲线的概率越大, δ 值越大表示运营者的决策越乐观,实际输出功率低于调度曲线的概率越大。

2 基于分布鲁棒的氢储能容量优化建模与求解

在给定现有风电场容量的基础上,风-氢混合系统需要优化配置氢储能系统,使其在满足调度曲线跟踪偏差考核要求的前提下,最小化投资成本,并达到降低风电场功率波动对电网影响的目的。

2.1 氢储能系统容量配置的目标函数

风电出力的不确定性会导致电解槽/燃料电池在制氢/发电过程中的产热功率存在波动。热能供需的动态平衡与运行特性紧密耦合,最终会影响氢储能系统的容量配置。因此,氢储能容量配置的优化目标为:在现有风电场装机容量的基础上,以电解槽、燃料电池和储氢罐的容量作为优化变量,在由风电场功率不确定性导致的最坏情况下,满足电网调度曲线跟踪偏差要求的同时,最小化系统投资成本,如式(8)所示。

$$F = \max_{P_w^t} \min_{P_{\text{ele}}^t, P_{\text{fuel}}^t, S_{\text{H}_2}} \{ c_{\text{ele}} P_{\text{ele}} + c_{\text{fuel}} P_{\text{fuel}} + c_{\text{sh}} S_{\text{H}_2} \} \quad (8)$$

式中: F 为系统投资成本,单位为 $\$$; S_{H_2} 为储氢罐的容量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$; c_{ele} 、 c_{fuel} 分别为电解槽、燃料电池的单位功率投资系数,单位为 $\$/\text{kW}$; c_{sh} 为储氢罐的单位容量投资系数,单位为 $\$/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

2.2 氢储能系统容量配置的约束条件

氢储能系统容量配置需要满足容量约束、运行约束和风电场调度曲线跟踪偏差约束。其中,风-氢混合系统的容量配置约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ele}}^t \leq P_{\text{ele}} \\ 0 \leq P_{\text{fuel}}^t \leq P_{\text{fuel}} \\ 0 \leq S_{\text{H}_2}^t \leq S_{\text{H}_2} \end{cases} \quad (9)$$

同时,系统运行还应满足热平衡和电功率平衡约束,其中系统运行热平衡可用电解槽、燃料电池与储热罐的热功率交换进行建模,即:

$$Q_{\text{ele}}^t + Q_{\text{fuel}}^t = Q_{\text{con}}^t + \frac{Q_{\text{load}}^t + Q_{\text{storage}}^t}{\eta_{\text{ex}}} \quad (10)$$

式中: Q_{storage}^t 为 t 时刻储热换热器与储热罐交换的热功率,单位为 kW 。

风-氢混合系统的输出电功率平衡约束可表示为:

$$P_w^t + P_{\text{fuel}}^t - P_{\text{ele}}^t = \tilde{P}_w^t \quad (11)$$

本文采用文献[8]所提方法对风电场调度曲线

跟踪偏差的不确定性进行建模,定义风电场调度曲线跟踪偏差约束为:

$$\sum_{i=1}^T \tilde{P}_w^i - \sum_{i=1}^T P_w^i < (1-d) \sum_{i=1}^T \tilde{P}_w^i \quad (12)$$

式中: d 为调度曲线跟踪偏差率指标; T 为运行周期,单位为h。

此外,由于技术和环境场地的限制,各参数在实际运行中还应满足上下限约束,限于篇幅,此处不再一一列出。

2.3 风电不确定性的分布鲁棒建模

从博弈论的角度来看,风电功率的不确定性建模问题可看作为容量配置决策者和大自然之间的博弈。鲁棒优化为大自然采用纯策略集和容量配置决策者进行的零和博弈,其对最坏场景的刻画过于保守,导致系统为应对极端场景而配置了大量的冗余容量。而随机优化则可看作大自然采取混合策略的贝叶斯博弈。由于无法获知风电功率的准确概率分布函数,使得大自然不满足理性,最终导致容量配置结果过于乐观。分布鲁棒方法在随机优化的基础上,采用数据驱动方法构建不确定性的概率分布作为大自然的混合策略集,从而保证了大自然的理性,所构成的博弈格局能够在置信区间内保证系统在大自然采用最坏概率分布策略下的鲁棒性。可见,分布鲁棒方法刻画的最坏运行场景的保守性介于鲁棒优化和随机优化之间,使得系统的容量配置既能够满足置信区间内的鲁棒性,又降低了应对极端场景的系统冗余容量。

式(8)~(12)描述的优化问题是一个含有不确定性变量的最大最小化问题,无法对其进行直接求解^[9]。为此,本文首先利用分布鲁棒方法刻画风电功率不确定性的最坏场景,然后采用 Wasserstein 散度作为分布鲁棒方法不确定性度量的模糊集 M^ε ,建立氢储能系统的运行不确定性模型,如式(13)所示。

$$M^\varepsilon = \{ P_{\hat{p}} \in M(\xi); d_w(P_{\hat{p}}, \hat{P}) \leq \varepsilon \} \quad (13)$$

式中: $P_{\hat{p}}$ 为风电场实际输出功率的概率分布; \hat{P} 为风电场输出功率的经验分布; $M(\xi)$ 为所有定义在 Wasserstein 散度 d_w 下的概率分布空间; ε 为模糊集的半径^[10]。

2.4 氢储能容量配置优化问题的求解

对于式(13)所给出的不确定集合,可将其转化为一组线性风险机会约束,如式(14)所示。

$$\begin{cases} \varepsilon d + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s^k - \gamma \alpha \leq 0 \\ s^k \geq d \sum_{i=1}^T \tilde{P}_w^{k,i} - \sum_{i=1}^T P_w^{k,i} + \gamma \\ s^k \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: K 为数据样本总数; α 为置信度; $\tilde{P}_w^{k,i}$ 、 $P_w^{k,i}$ 分别

为 t 时刻样本 k 的实际风电场输出功率、可信并网功率,单位为kW; s^k 、 γ 为对偶变量。由于采用数据驱动的方法对风电场的功率不确定性进行约束,式(11)所示风-氢混合系统的电功率平衡约束可改写为:

$$P_w^{k,i} + P_{\text{fuel}}^{k,i} - P_{\text{ele}}^{k,i} = \tilde{P}_w^{k,i} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{fuel}}^{k,i}$ 、 $P_{\text{ele}}^{k,i}$ 分别为 t 时刻样本 k 的燃料电池发电功率、电解槽耗电功率,单位为kW。

至此,本文所建风-氢混合系统中氢储能容量配置模型被转化为求解一组混合整数线性优化问题,可采用 MATLAB 2016b 和 CPLEX 12.6 进行建模和求解。

3 算例分析

3.1 算例系统及参数

本文基于青海省某 90 MW 风电场的实际数据构建算例,对所提氢储能容量配置方法进行验证。系统各环节的参数如附录 A 表 A1 所示。选取实际风电场春、夏、秋、冬典型日的数据作为风电场的预测功率,并根据现有风电预测水平取预测误差为 20%,利用拉丁超立方方法进行采样,最终随机生成 100 个样本用于构建分布鲁棒模型。风电场预测功率、可用功率以及功率不确定性上下界如附录 A 图 A1 所示。

3.2 容量配置结果

分别对考虑热平衡和不考虑热平衡 2 种工况下,风-氢混合系统中氢储能容量进行优化配置,结果如表 1 所示。由表 1 可知:为了满足热备用工况的热能需求,需要增加氢储能系统的容量配置;相较于不考虑热平衡需求的理想工况,考虑热平衡工况下的电解槽、燃料电池的容量分别增加了 31.67%、3.77%,储氢罐体积减小了 23.38%。

表 1 容量配置结果

是否考虑 热平衡	燃料电池 容量 / MW	电解槽 容量 / MW	储氢罐体积 / m ³
是	8.24	2.91	4.84
否	7.96	2.21	6.33

在附录 A 表 A1 中所给燃料电池、电解槽单位容量散热系数条件下,热平衡系统中储热罐内储热工质的质量变化情况如图 2 所示。由图可以看出:在风电出力较小的夏季,氢储能系统需要消耗储热罐中的热能才能维持额定工作温度;同样,在冬季由于气温较低,氢储能系统自身产热不足以维持热平衡,此时电解槽和燃料电池的实际工作点将偏离额定工况,导致运行效率降低,系统的响应时间增加,无法快速高效地跟踪风电功率波动。

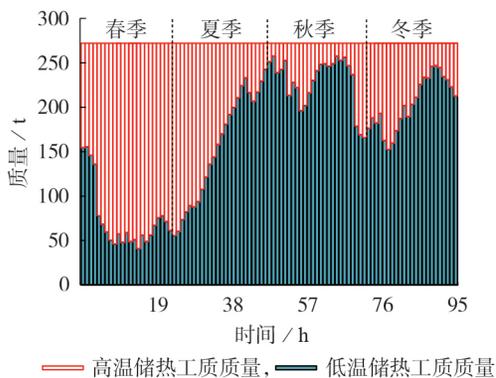


图2 热平衡系统的运行结果

Fig.2 Operation results of thermal balance system

风-氢混合系统的整体运行结果如图3所示。电解槽为风电场提供负备用,而燃料电池为风电场提供正备用,风-氢混合系统在电网中可等效为1台可调用机组,其可调用容量由风电功率可用系数 δ 决定。可用系数 δ 值越大,则风电超发概率和功率幅值越小,所需负备用(电解槽的耗电功率)越少;可用系数 δ 值越小,则实际风电欠发概率越小,配置氢储能系统时所需正备用(燃料电池的发电功率)越少。进一步分析储氢罐中的氢气质量变化情况可发现,当 $\delta=0.95$ 时,电解槽生产的氢气不能满足燃料电池的发电耗氢需求,导致氢储能系统的实际可用容量不足以满足风-氢混合系统的需求。

由上述分析可以知道,风电功率可用系数与氢储能系统散热系数对系统氢储能容量配置和热平衡具有关键影响,3.3节将对这2个关键参数进行详细分析。

3.3 关键参数影响分析

3.3.1 风电功率可用系数对氢储能系统容量配置的影响

如前文所述,氢储能系统的发电能力受限,难以支撑平抑风电功率波动的需求。因此,进一步降低风电功率可用系数 δ 的值,以增大风电超发的概率,

使系统能够通过电解槽获得足够的氢气,达到产氢-耗氢平衡。 δ 取值不同时风-氢混合系统的容量配置结果如表2所示。

表2 δ 取值不同时的容量配置结果
Table 2 Results of capacity allocation with different values of δ

δ	燃料电池容量 / MW	电解槽容量 / MW	储氢罐体积 / m ³	氢储能投资成本 / \$
0.90	5.63	4.50	12.71	6.47×10 ⁶
0.91	6.15	4.04	10.47	6.28×10 ⁶
0.92	6.68	3.59	8.14	6.10×10 ⁶
0.93	7.30	3.43	4.93	6.23×10 ⁶
0.94	7.73	3.21	4.07	6.21×10 ⁶
0.95	8.24	2.91	4.84	6.16×10 ⁶

由表2可以看出:随着风电功率可用系数 δ 值的减小,风电场的可信容量降低,导致风电场的并网功率减少,在实际运行过程中会减小风电场欠发的概率和功率幅值,从而使正备用需求下降,进一步降低了燃料电池的容量配置;而当风电超发功率随风电功率可用系数 δ 减小而增加时,调用负备用的概率增加,电解槽的容量配置相应增加。由表2还可以看出,储氢罐体积和系统投资成本在 $\delta < 0.92$ 时明显较大。这是因为当 $\delta < 0.92$ 时,电解槽所产生的氢气在满足燃料电池需求后存在大量剩余,此时在满足系统氢平衡后,多余的氢气增加了储氢罐体积配置。考虑储氢罐中剩余氢气的价值,当 $\delta=0.92$ 时,氢储能系统能够满足产氢-耗氢平衡,且投资成本最小。由此可见,当氢储能系统分别按照风电场容量的1/25、1/13配置电解槽容量、燃料电池容量时,可同时满足热平衡和氢平衡需求,能够在实际运行中为风-氢混合系统平抑风电场功率波动以及提供充足的备用容量。不同季节典型日储氢罐中氢气质量的变化情况如图4所示。

3.3.2 散热系数对氢储能系统容量配置的影响

由图2和图3可知,当风-氢混合系统运行时,电解槽和燃料电池间歇运行,特别是在风电功率较小

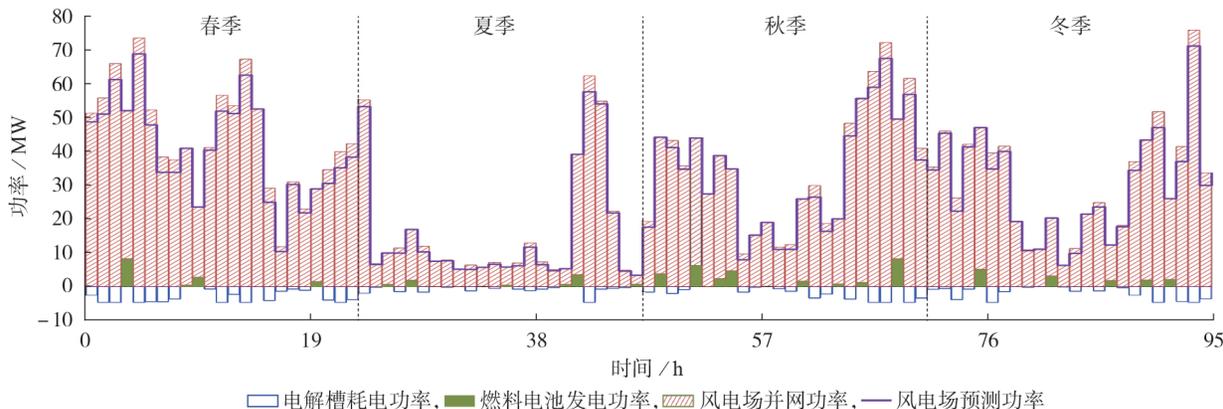


图3 风-氢混合系统的运行结果

Fig.3 Operation results of wind-hydrogen hybrid system

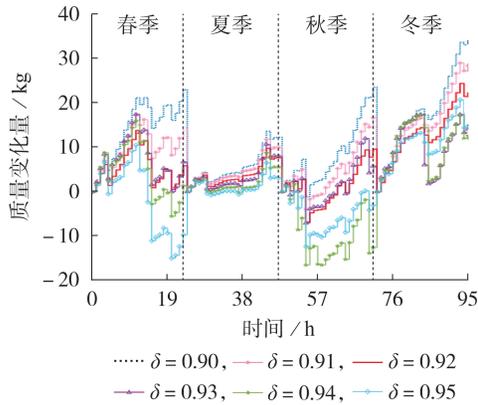


图4 储氢罐中氢气质量变化结果

Fig.4 Variation results of hydrogen mass in hydrogen storage tank

的夏季,电解槽不能满功率运行,燃料电池长时间处于热备用工况,系统产生的热能不能满足热平衡需求。因此,有必要减小系统的散热系数,以改善系统的热平衡性能,实现快速响应风电功率波动的作用。为此,在表2所示 $\delta=0.92$ 时所得氢储能容量配置结果的前提下,设定燃料电池、电解槽单位容量散热系数均分别取值为 $1/1\ 000$ 、 $1/1\ 500$ 、 $1/2\ 000$ / K对热平衡系统进行分析,结果如附录A图A2所示。由图可以看出:当散热系数大于 $1/2\ 000$ / K时,在无风、少风的夏季,运行区间内储热罐的储热量出现负值,表示储热罐存储的热能无法满足氢储能系统的热平衡需求;而当散热系数小于 $1/2\ 000$ / K时,系统中配置的电解槽和燃料电池能够始终保持热平衡。因此,在风-氢混合系统中配置氢储能系统的容量时,设备的保温措施对提高氢储能系统的实际可用容量以及实现快速平抑风电波动能起到至关重要的作用。

3.4 不确定性建模方法对容量配置的影响

基于 Wasserstein 散度的分布鲁棒方法是一种采用实际历史数据驱动的优化方法,能够充分利用风电数据隐含的信息,得到保守性适中的容量配置结果。

当风电功率可用系数 δ 取不同值时,分别采用鲁棒优化、随机优化、分布鲁棒方法对氢储能系统进行容量优化配置,所得电解槽容量配置结果如图5所示。

由图5可知,采用随机优化方法得到的电解槽容量最小,分布鲁棒方法得到的电解槽容量次之,鲁棒优化方法得到的结果最大。这进一步说明随机优化方法得到的结果过于乐观,仅配置较小容量的电解槽就期望满足风-氢混合系统的运行需要;而鲁棒优化方法得到的结果过于保守,为了应对最恶劣的场景,与随机优化方法相比,其配置了近2倍的电解槽容量,使系统经济性不佳;而分布鲁棒方法所得结

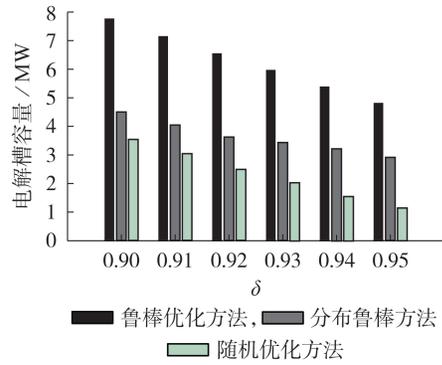


图5 不同优化方法下电解槽的容量配置结果

Fig.5 Capacity allocation results of electrolyzer based on different optimization methods

果介于随机优化方法和鲁棒优化方法所得结果之间,在保守性和经济性之间取得了平衡,且能够在置信度意义下保证系统的鲁棒性。采用这3种方法分析系统其他单元的容量配置结果也能得到相同的结论,限于篇幅,不再一一讨论。

4 结论

本文以面向高比例新能源电力系统的风-氢混合系统为研究对象,首先设计了含热平衡系统的氢储能系统,并建立了风-氢混合系统各组成部分的数学模型;进一步,提出了在风电场功率不确定性最坏场景下,以满足电网调度曲线跟踪偏差要求且最小化系统投资成本为目标的氢储能容量配置方法。该方法考虑了氢储能系统间歇工作模式中的热平衡约束,采用分布鲁棒方法对风电场功率不确定性进行建模,并将其转化为一组线性风险机会约束,从而使氢储能系统的容量优化配置模型可转化为混合整数线性优化问题进行求解。最后,基于青海省某实际风电场的数据进行算例分析,结果表明:降低风电功率可用系数有利于保持氢储能系统运行时的氢平衡和热平衡,减少了燃料电池的配置容量,增加了电解槽的配置容量,降低了氢储能系统的投资成本;但是较小的风电功率可用系数也降低了风电场的并网率,这会影响到风电场的经济性。氢储能系统自身的散热功率对氢储能系统配置电解槽和燃料电池能否提供热备用以及快速响应风电功率波动具有重要影响,较高的散热热阻使氢储能系统的容量配置能够满足热平衡,从而达到快速响应风电功率波动的目的。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张运洲,张宁,代红才,等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力,2021,54(3):1-11.
ZHANG Yunzhou, ZHANG Ning, DAI Hongcai, et al. Model construction and pathways of low-carbon transition of China's

- power system[J]. *Electric Power*, 2021, 54(3): 1-11.
- [2] 杨宇, 于宏源, 鲁刚, 等. 世界能源百年变局与国家能源安全[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(11): 2803-2820.
YANG Yu, YU Hongyuan, LU Gang, et al. Interview on the unprecedented changes of energy geopolitics and national energy security[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(11): 2803-2820.
- [3] 赵书强, 索珊, 马燕峰. 高比例可再生能源的多点容量规划方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(5): 8-18.
ZHAO Shuqiang, SUO Xun, MA Yanfeng. Multi-point capacity planning method for high proportion of renewable energy[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(5): 8-18.
- [4] 何俊强, 师长立, 马明, 等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(7): 157-167.
HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(7): 157-167.
- [5] 贾成真, 王灵梅, 孟恩隆, 等. 风光氢耦合发电系统的容量优化配置及日前优化调度[J]. *中国电力*, 2020, 53(10): 80-87.
JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, et al. Optimal capacity configuration and day-ahead scheduling of wind-solar-hydrogen coupled power generation system[J]. *Electric Power*, 2020, 53(10): 80-87.
- [6] 谢敏, 罗文豪, 吉祥, 等. 随机风电接入的电力系统动态经济调度多场景协同优化[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(11): 27-33.
XIE Min, LUO Wenhao, JI Xiang, et al. Multi-scenario collaborative optimization for dynamic economic dispatch of power system with stochastic wind power integration[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(11): 27-33.
- [7] 田坤鹏, 孙伟卿, 韩冬, 等. 满足非水可再生能源发电量占比目标的“源-网-储”协调规划[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(1): 98-108.
TIAN Kunpeng, SUN Weiqing, HAN Dong, et al. Coordinated planning of “generation-grid-storage” to satisfy proportion target of non-hydro renewable energy generation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(1): 98-108.
- [8] GUO Z J, WEI W, CHEN L J, et al. Sizing energy storage to reduce renewable power curtailment considering network power flows: a distributionally robust optimisation approach[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(16): 3273-3280.
- [9] HOTA A R, CHERUKURI A, LYGEROS J. Data-driven chance constrained optimization under Wasserstein ambiguity sets[C]// 2019 American Control Conference (ACC). Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2019: 1501-1506.
- [10] MOHAJERIN E P, KUHN D. Data-driven distributionally robust optimization using the Wasserstein metric: performance guarantees and tractable reformulations[J]. *Mathematical Programming*, 2018, 171(1/2): 115-166.
- [11] 李运龙, 李志刚, 郑杰辉. 考虑风电不确定性和相关性的多区域电网分布鲁棒经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(8): 97-104.
LI Yunlong, LI Zhigang, ZHENG Jiehui. Distributionally robust economic dispatch of multi-regional power grid considering uncertainty and correlation of wind power[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(8): 97-104.
- [12] 杨洪明, 刘俊梁, 梁芮, 等. 考虑动态功率调节裕度的高比例风电系统水-火-荷分布鲁棒优化调度[J/OL]. *系统工程理论与实践*. (2021-06-28)[2021-07-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20210628.1321.002.html>.
- [13] 孙鹤旭, 李争, 陈爱兵, 等. 风电制氢技术现状及发展趋势[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(19): 4071-4083.
SUN Hexu, LI Zheng, CHEN Aibing, et al. Current status and development trend of hydrogen production technology by wind power[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(19): 4071-4083.
- [14] 尹文良, 刘琳, 张存山, 等. 含制氢储能的混合传动风电系统建模与运行特性分析[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(10): 64-70.
YIN Wenliang, LIU Lin, ZHANG Cunshan, et al. Modeling and operation performance analysis of hybrid drive wind power generation system with hydrogen energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(10): 64-70.
- [15] BAKHTIARI H, NAGHIZADEH R A. Multi-criteria optimal sizing of hybrid renewable energy systems including wind, photovoltaic, battery, and hydrogen storage with ϵ -constraint method[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(8): 883-892.
- [16] PAN G S, GU W, LU Y P, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(4): 2662-2676.
- [17] 邓智宏, 江岳文. 考虑制氢效率特性的风氢系统容量优化[J]. *可再生能源*, 2020, 38(2): 259-266.
DENG Zhihong, JIANG Yuewen. Optimal sizing of a wind-hydrogen system under consideration of the efficiency characteristics of electrolyzers[J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(2): 259-266.
- [18] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(3): 507-516.
XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen storage in industrial park integrated energy system based on stackelberg game[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(3): 507-516.
- [19] 辛英超. PEM燃料电池热电联供系统设计与分析[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
XIN Yingchao. Design and analysis of PEM fuel cell cogeneration system[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.

作者简介:



司 杨

司 杨(1982—),男,四川绵阳人,副教授,博士研究生,主要研究方向为清洁能源综合利用(**E-mail**:siyang@qhu.edu.cn);

陈来军(1985—),男,湖北天门人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统稳定与控制、新能源发电与储能技术(**E-mail**:chenlaijun@qhu.edu.cn);

陈晓波(1982—),男,青海湟中人,副教授,博士,主要研究方向为大规模物理储能(**E-mail**:chenxiaotao@qhu.edu.cn);

高梦宇(1987—),男,青海西宁人,讲师,博士,主要研究方向为表面材料(**E-mail**:gmy-dhxy111@163.com);

麻林瑞(1989—),男,青海德令哈人,讲师,博士,主要研究方向为新能源与工程热物理(**E-mail**:mlr19890922@126.com);

梅生伟(1964—),男,河南新野人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、工程博弈论、大规模储能技术等(**E-mail**:meishengwei@tsinghua.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Optimal capacity allocation of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system based on distributionally robust

SI Yang^{1,2}, CHEN Laijun¹, CHEN Xiaotao¹, GAO Mengyu¹, MA Linrui¹, MEI Shengwei^{1,2}

(1. Qinghai Key Laboratory of Efficient Utilization of Clean Energy, Tus-Institute for Renewable Energy, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: HESS (Hydrogen Energy Storage System) is less restricted by geographical and climatic conditions, so it has great development potential in constructing wind-storage hybrid system oriented to high proportion of new energy power system. However, due to the uncertainty of wind farm output power, HESS needs to switch frequently among the conditions of energy storage, energy release and heat reserve, and the balance of internal heat energy supply and demand also presents uncertainty, which affects its response speed and even actual available capacity. Therefore, a wind-hydrogen hybrid system considering heat balance is designed, and the HESS model considering heat balance of electrolyzer and fuel cell during intermittent operation mode is established. On this basis, comprehensively considering the uncertainty of wind farm power and the investment cost of HESS, an optimal capacity allocation method of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system considering the uncertainty of heat balance is proposed. The distributionally robust method is used to model the uncertainty of wind farm power, which is transformed into a set of linear risk opportunity constraints to solve. Based on the actual wind farm data, the proposed model and method are verified and analyzed. The results show that the heat dissipation coefficient of electrolyzer and fuel cell in the HESS has an important influence on the actual available capacity of the system, and considering the heat balance constraint in the capacity allocation of the hydrogen energy storage can effectively improve the actual available capacity of the HESS and the economy of the hybrid system.

Key words: hydrogen energy storage; wind-hydrogen hybrid system; capacity allocation; distributionally robust; heat balance

附录 A

表 A1 系统参数
Table A1 System parameters

参数	取值	参数	取值
燃料电池投资系数/(\$·kW ⁻¹)	430 ^[14]	换热器效率/%	80
电解槽投资系数/(\$·kW ⁻¹)	900 ^[14]	氢气高热值/(kJ·mol ⁻¹)	282
储氢罐投资系数/(\$·kg ⁻¹)	10 ^[6]	燃料电池单位容量散热系数/K ⁻¹	1/750
燃料电池效率/%	60	电解槽单位容量散热系数/K ⁻¹	1/750
电解槽效率/%	60	储氢压力/MPa	10
燃料电池工作温度/°C	80	可用系数	0.8~1
电解槽工作温度/°C	80	置信度	0.05

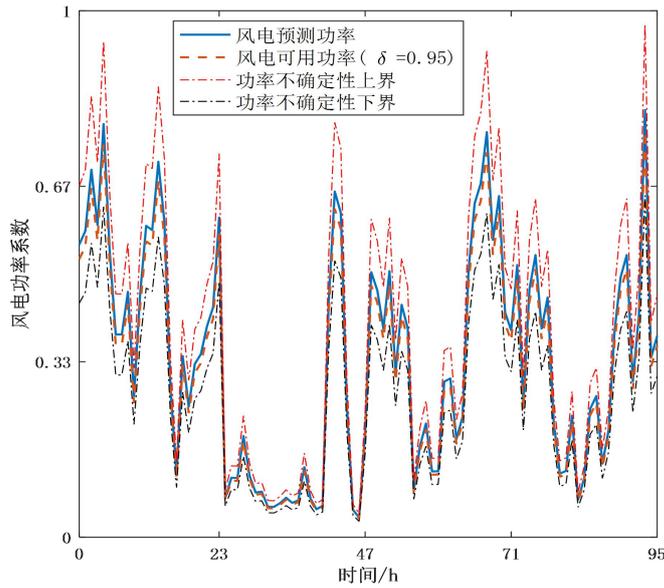


图 A1 风电场功率曲线
Fig.A1 Power curves of wind farm

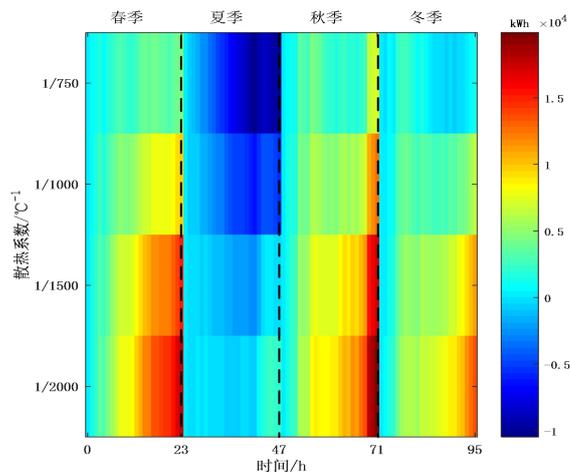


图 A2 不同散热系数下的热平衡结果
Fig.A2 Heat balance results with different heat dissipation coefficient values