

提高风电并网系统调度计划可信度的 HES经济收益计算

蔡高雷¹, 刘桂龙², 蔡静静³

(1. 国电投长江氢能科技有限公司, 上海 200120; 2. 中国海诚工程科技股份有限公司, 上海 200031;
3. 上海电力大学, 上海 200090)

摘要: 针对风电-氢储能系统的经济性, 文中提出利用氢储能系统(HES)提高风电并网调度计划的可信度, 分析了HES提高风电并网调度计划的可信度的机理; 然后, 构建了计及风电预测出力、实际出力及调度出力的氢储能系统提高风电并网调度计划可信度的充放电价格策略体系; 最后, 建立了HES收入及成本数学模型。在此基础上, 构建了提高风电并网调度计划可信度的HES全生命周期的经济效益计算数学模型。以某风电场为例对所提模型进行了验证, 并分析了经济效益对调度误差和电价的敏感性, 结果表明所建立的HES经济效益计算模型的正确性。研究结果为风电-氢储能系统前期投建的经济性评价提供了参考。

关键词: 风力发电; 氢储能; 调度计划可信度; 充放电; 经济效益

中图分类号: TM 734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)01-0030-09

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230106

Economic Benefit Calculation of HES for Improving Credibility of Dispatching Plan of Wind Power Grid-Connection

CAI Gaolei¹, LIU Guilong², CAI Jingjing³

(1. State Power Investment Yangtze River Hydrogen Technology Co., Ltd., Shanghai 200120, China;
2. China Haisum Engineering Co., Ltd., Shanghai 200031, China;
3. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at the economic of wind power and hydrogen energy storage system (HES), HES is proposed to improve the credibility of dispatching plan of wind power grid-connection. The mechanisms for improving the credibility of dispatching plan of wind power grid-connection is analyzed, and the charging and discharging pricing strategy system is proposed considering output prediction, actual output and dispatching output of wind power of HES to improve the credibility of dispatching plan of wind power grid-connection. A mathematical model for income and cost of HES is established, and on this basis, a mathematical model for economic benefit calculation of HES life-cycle is constructed to improve the credibility of dispatching plan of wind power grid-connection. Taking a wind farm for example, the proposed model is verified, and the sensitivity of economic benefit to dispatching error and electricity price is analyzed. The results show that the proposed economic benefit calculation model for HES is right and effective, which can provide a reference for the economic evaluation of early construction of HSEE.

Key words: wind power generation; hydrogen energy storage; credibility of dispatching plan; charging and discharging; economic benefit

0 引言

以风能为代表的大规模清洁能源发电并网已成为当今世界各国应对资源枯竭及环境污染压力的

必然手段^[1-4], 然而风电出力具有的波动性、随机性及间歇性是困扰清洁能源大规模发电并网的主要技术“瓶颈”; 与此同时, 风能、光伏等宝贵的清洁能源无法大规模有效低成本存储等原因制约了新能源消纳水平。因此, 能量的合理存储与释放是解决风电

等新能源上网难的方案之一^[5]。具有高能量密度的氢储能系统因其灵活的电功率吞吐特性及实现电能“时空转移”特性被广泛应用于平滑新能源发电出力波动、削峰填谷及辅助服务等领域^[6-7]。合理利用储能技术实现能量“时空转换”,可有效缓解风电并网系统大幅波动,减少对大电网安全稳定运行的影响;同时,可有效拓宽新能源消纳路径及大幅提高新能源消纳水平^[8-9],减缓电网设备扩容,增加设备利用率^[10]。但是,氢储能的接入必然引起系统投资及运营资本结构的变化。因此,如何在突破风电并网难等技术瓶颈的同时兼顾氢储能系统经济性的问题亟待解决。

目前,国内对风电-氢储能研究较少,公开资料显示,研究多集中于风电/光伏制氢储能-燃料电池发电系统架构及其可行性分析^[11-14]。文献[11]提出风-氢耦合发电系统架构;文献[12-13]建立了基于微电网的氢氧联合循环与风能耦合发电系统,并对系统的效率与经济可行性进行了分析;文献[14]提出了风电-氢储能耦合燃料电池发电系统,并通过净现值等经济指标对系统的经济可行性进行评估;文献[15]构建了风电-氢储能与煤化工多能耦合系统架构并对氢储能子系统基于能量宏观表示法建模、仿真研究。国外对氢储能的研究多集中于耦合氢储能的独立混合式新能源发电系统^[16-22],对于耦合氢储能的大规模风电并网系统的研究较少。文献[16-18]提出了含氢储能子系统的风电并网系统,并从氢储子系统可操作性及能量泄漏率方面讨论储氢方法;文献[19-20]重点研究了独立混合式电源发电系统中氢储能系统的能量分配方法;文献[21-22]搭建了耦合氢储能的独立混合式新能源发电系统仿真模型。综上分析,国内外对于氢储能系统(hydrogen energy storage system, HESS)用于提升风电并网系统调度计划可信度的研究鲜见,对其经济性计算的研究几乎空白。

下面,在分析了 HESS 用于风电并网系统调度计划可信度作用机理的基础上,依据风电预测出力、实际出力及调度出力将风电-氢储能-广义负荷(含输配电系统及用电负荷)运营工况进行合理的区间划分。针对不同运营工况区间划分了提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 充放电区间及充放电价格,并进一步建立了其全寿命周期时间尺度的经济效益计算模型,再以某地风电场实际运行数据对

所提方法进行验证。研究成果为氢储能系统投建前期的经济可行性分析提供了参考依据,对于推动中国风电等清洁能源发电并网具有重要的理论和实践价值。

1 提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 充放电作用机理

1.1 作用机理概述

风电并网系统调度计划可信度可定义为:风电调度出力跟踪风电实际出力的程度。众所周知,风电调度计划的制定依据风电上报预测出力及负荷需求状况,风电出力“难调、难控”的特征给系统调度计划可信度的提升带来了挑战^[23]。HESS 不仅具有传统储能的上述特性,还可在 0~100% 额定功率范围内自适应风电功率变化及整个工作过程中的环境友好性^[15]。因此,HESS 被认为是较优的用于提升风电并网系统调度计划可信度的技术手段。

如图 1 所示,HESS 主要包含电解槽、氢氧燃料电池堆和储气系统 3 部分,通过交/直流逆变装置连接于风电场出口及广义负荷(含输配电线路及用电负荷)之间。当风电实际出力值超出调度出力计划值可容忍上限,电解槽利用富余风电电解水并将得到的氢、氧气体通过加压等处理存储于储气系统,即 HESS“充电”,提高风电消纳能力;当风电实际出力值超出调度出力计划值可容忍下限,同时风资源匮乏、风电出力出现缺额时,燃料电池堆将氢气、空气等存储的化学能转化为电能,最大限度补充风电缺额,即 HESS“放电”,提高了风电并网系统调度计划的可信度。

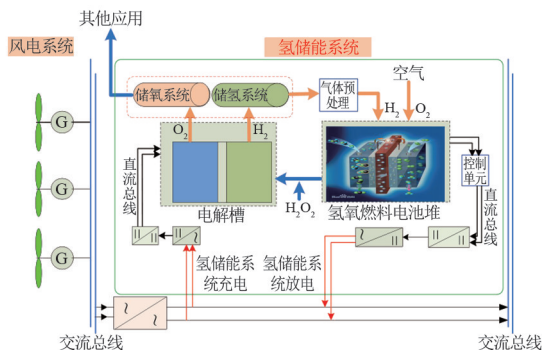


图 1 耦合氢储能的风电并网系统结构

1.2 充放电区间划分

基于上面所述,HESS 提升风电并网系统调度

计划可信度的关键在于其充、放电区间的准确划分及充放电功率的确定。

如图 2 所示,在时间尺度 t 上存在风电场预测出力值 $P'_{w,y}$ 、风电场实际出力 $P'_{w,s}$ 及调度出力 $P'_{w,d}$ 3 个物理量,因调度出力依据风电场上报的预测出力制定,故以调度出力为基准,定义调度误差为 $e_{sd} = P'_{w,s} - P'_{w,d}$,并假定在误差 e_{sd} 范围内风电并网不会威胁系统安全稳定运行。图 2 中所标误差带上限为 $P_t = P'_{w,d} + |e_{sd}|$,误差带下限为 $P_l = P'_{w,d} - |e_{sd}|$,根据三者数值关系并结合现实运营场景,可将整个风电-氢储能-广义负荷实际运营过程划分为 3 个大区域和 8 个子区域,具体划分如下:

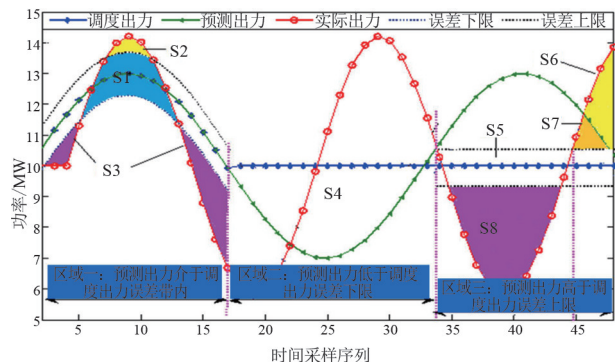


图 2 氢储能充放电区间划分

1) 区域 1: $P'_{w,y} \in [P'_{w,d} - |e_{sd}|, P'_{w,d} + |e_{sd}|]$, 即风电场预测出力处于绝对调度误差可忍受的上、下限范围内。考虑风电场实际出力 $P'_{w,s}$, 将本区域进一步划分为如下 3 个子区域。

子区域 S1: $P'_{w,s} \in [P'_{w,d} - |e_{sd}|, P'_{w,d} + |e_{sd}|]$, 风电场实际出力波动处于电网可忍受范围 e_{sd} 内, HESS 此时不充、不放电, 处于待机状态, 如图 2 中 S1 区域所示。

子区域 S2: $P'_{w,s} > P'_{w,d} + |e_{sd}|$, 风电场实际出力超出电网忍受的范围上限, 此时为避免风电场减出力弃风, HESS 处于深度充电状态, 如图 2 中 S2 区域所示。

子区域 S3: $P'_{w,s} < P'_{w,d} - |e_{sd}|$, 风电场实际出力超出电网忍受范围下限, 此时为保证系统潮流平衡, 氢储能处于放电状态, 如图 2 中 S3 区域所示。

2) 区域 2: $P'_{w,y} < P'_{w,d} - |e_{sd}|$, 即风电场预测出力低于其调度出力下限值, 根据现实运营场景, 风电调度计划的制定依据风电上报预测出力及负荷需求状况, 即至少有 $P'_{w,y} \geq P'_{w,d} - |e_{sd}|$, 因此该场景不符合实际, 故落在本部分的子区域 S4 不予考虑。

3) 区域 3: $P'_{w,y} > P'_{w,d} + |e_{sd}|$, 即风电调度出力上限低于其预测出力, 风电场实际出力 $P'_{w,s}$, 将本区域进一步划分为如下 4 个子区域。

子区域 S5: $P'_{w,s} \in [P'_{w,d} - |e_{sd}|, P'_{w,d} + |e_{sd}|]$, 风电实际出力处于调度误差 e_{sd} 范围内, 但是实际出力高于调度出力, HESS 处于待机状态, 如图 2 中 S5 区域所示。

子区域 S6: $P'_{w,s} \geq P'_{w,y}$, 风电实际出力值高于预测出力值, HESS 处于深度充电状态, 如图 2 中 S6 区域所示。

子区域 S7: $P'_{w,d} + |e_{sd}| < P'_{w,s} < P'_{w,y}$, 风电实际出力处于调度误差上限及预报出力值之间, 储能处于充电状态, 如图 2 中 S7 区域所。

子区域 S8: $P'_{w,s} < P'_{w,d} - |e_{sd}|$, 风电场实际出力低于其调度出力误差下限值, 为保证系统潮流平衡, 储能必须深度放电, 将风电有功输出波动修正至电网可忍受的范围 e_{sd} 内。

综上所述, 图 2 中区域 2 不符合现实运营场景, S4 不予考虑; 区域 1 和区域 3 中, HESS 充电区域为 S2、S6 和 S7, 其中 S2 和 S6 为深度充电状态, 是正常充电状态; 区域 S3 和 S8 为放电状态; 区域 S1 和 S5 为氢储能待机状态。

2 提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 充放电电价策略体系

在电力市场环境下, HESS 与风电场及广义负荷并列作为独立的经济个体, 共同受市场价格规律调控。HESS 充电电源为风电场, 放电对象为广义负荷, 计算 HESS 经济效益应充分讨论所述不同充放电区间所对应的充放电电价。

根据第 1.2 节划分的储能充放电区间, 遵循市场价格规律和“谁受益, 谁买单”的原则, 确定 HESS 充放电电价。假设等效荷电状态(即氢储能实时剩余容量)和最大充放电功率能够满足系统对氢储能装置的要求, 依据所设规定的系统安全稳定运行可忍受的有功绝对误差 e_{dy} , 确定 HESS 充放电功率, 以此建立的提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 充放电电价及充放电功率模型如式(1)~式(4)所示。

1) HESS 充电时的价格及最大充电功率

$$\begin{cases} P_{p,s}^{\text{in}} = \kappa_1 \min\{P_{p,f}, P_{p,h}, P_{p,w}\} + \kappa_2 P_{p,pc} \\ \max P_{s,\text{in}}^l = P_{w,s}^l - (P_{w,d}^l + e_{sd}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, κ_1, κ_2 为价格控制因子, 由式(2)确定。

$$\begin{cases} \kappa_1 = 1, \kappa_2 = 0; P_{w,y}^l \in [P_{w,d}^l - |e_{sd}|, P_{w,d}^l + |e_{sd}|], \\ P_{w,s}^l > P_{w,d}^l + |e_{sd}| \\ \kappa_1 = 1, \kappa_2 = 0; P_{w,y}^l \geq P_{w,d}^l + |e_{sd}|, \\ P_{w,d}^l + |e_{sd}| \leq P_{w,s}^l \leq P_{w,y}^l \\ \kappa_1 = 0, \kappa_2 = 1; P_{w,y}^l \geq P_{w,d}^l + |e_{sd}|, P_{w,s}^l \geq P_{w,y}^l \end{cases} \quad (2)$$

2) HESS 放电时的价格及最小放电功率

$$\begin{cases} P_{p,s}^{\text{out}} = \kappa_3 P_{p,w} + \kappa_4 P_{p,vf} \\ \min P_{s,\text{out}}^l = P_{w,d}^l - e_{sd} - P_{w,s}^l \end{cases} \quad (3)$$

式中, κ_3, κ_4 为价格控制因子, 由式(1)确定。

$$\begin{cases} \kappa_3 = 1, \kappa_4 = 0; P_{w,y}^l \in [P_{w,d}^l - |e_{sd}|, P_{w,d}^l + |e_{sd}|], \\ P_{w,s}^l \leq P_{w,d}^l - |e_{sd}| \\ \kappa_3 = 0, \kappa_4 = 1; P_{w,y}^l \geq P_{w,d}^l + |e_{sd}|, \\ P_{w,s}^l \leq P_{w,d}^l - |e_{sd}| \end{cases} \quad (4)$$

式(1)一式(4)中: $P_{p,w}, P_{p,f}, P_{p,h}$ 分别为风电、火电及水电上网电价; $P_{p,pc}, P_{p,vf}$ 分别为系统调峰、填谷电价, HESS 此时如果担当了系统削峰或者填谷的角色, 则认为 HESS 的充放电电价就可以采用系统削峰或者填谷电价。

3 提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 经济效益计算建模

基于第 2 章所述作用机理及价格区间判断, 得到各区间氢储能系统充放电电价, 作为输入量, 进一步通过以下所建收入、成本和经济效益计算数学模型, 输出经济效益指标。已实现经济效益计算软件编制, 整个过程由计算软件自动实现。计算流程见图 3。

3.1 收入数学模型

3.1.1 直接经济收入

HESS 提升风电并网系统调度计划可信度的直接经济收入由电量收入和补贴收入两部分组成。其中电量收入 I_{EE} 为 HESS 在作用过程中“低充高放”产生的资金积累, 如式(5)所示。

$$I_{EE} = \frac{100t}{6} \cdot (P_{p,s}^{\text{out}} \cdot P_{s,\text{out}}^i - P_{p,s}^{\text{in}} \cdot P_{s,\text{in}}^i) + 250 \sum_f P_{FC} \cdot P_{p,wrc} \quad (5)$$

式中: $P_{s,\text{out}}^i, P_{s,\text{in}}^i$ 分别为 i 时段氢储能充、放电功率, MW; $P_{p,s}^{\text{out}}$ 为氢储能放电电价, 元/kWh; $P_{p,s}^{\text{in}}$ 为氢储能充电电价, 元/kWh; P_{FC} 为氢储能系统中单个燃料电池的额定功率, MW; $P_{p,wrc}$ 为风电备用容量电价, 元/kWh。

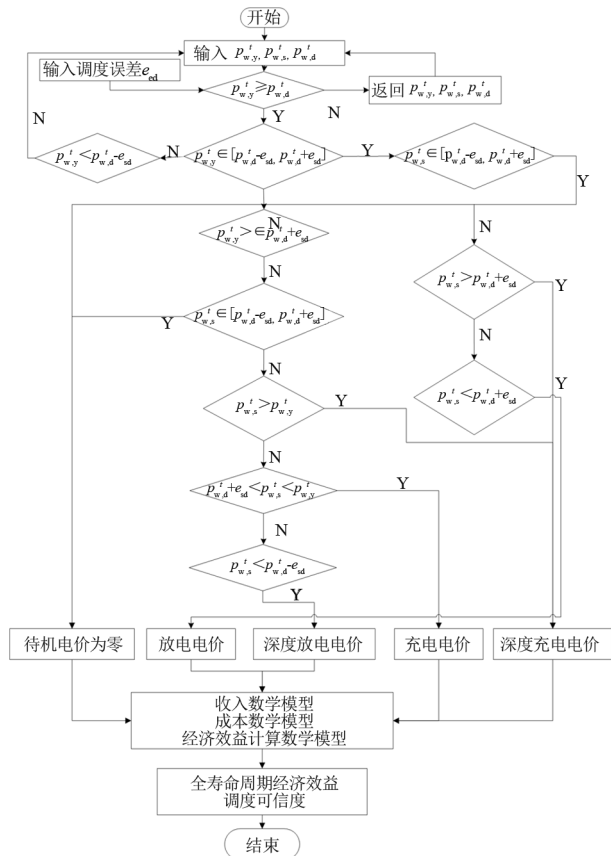


图 3 经济效益计算流程

根据财政部、国家发改委关于印发的《电力需求侧管理城市综合试点中央财政奖励资金管理暂行办法》通知中明确指出对通过实施能效电厂和削峰填谷等技术实现永久性节约电力负荷和转移高峰电力负荷。现将该部分补贴纳入储能电站提升风电并网系统调度计划可信度作用过程的收入中, 能量转移补贴收入如式(6)所示。

$$I_{PCS} = 1000 \frac{24}{NT_{pcs}} \sum_{i=1}^n P_{s,\text{out}}^i \cdot P_{UP} \quad (6)$$

式中: I_{PCS} 为氢储能能量转移补贴; P_{UP} 为减少单位峰荷补贴的现金; T_{PCS} 为 HESS 年运行小时数; N 为氢储能装置寿命年限。

可中断负荷为调度部门根据事先签订的合同在负荷高峰时段或系统出现故障时向用户发出中断请

求信号,用户根据请求减少或中断的负荷并获得相应的补贴。可中断负荷补贴 I_{ILS} 为因氢储能的能量转移作用而减少的系统可中断负荷次数所节省的费用,如式(7)所示。

$$I_{\text{ILS}} = F(C_{\text{IL}}, \Delta T_{\text{IL}}, N_{\text{IL}}, T_{\text{PIL}}) \quad (7)$$

式中: C_{IL} 为可中断负荷容量; ΔT_{IL} 为可中断负荷时间段; N_{IL} 为可中断负荷次数; T_{PIL} 为可中断负荷提前通知时间。

3.1.2 间接经济收入

用于提升风电并网系统调度计划可信度的氢储能系统引致的环境成本可视为 0, 因此 HESS 的间接经济收益等价于因 HESS 实现能量“时空转移”而节省的煤炭等发电厂发电排放的环境污染物治理费用^[22], 如式(8)所示。

$$I_{\text{EC}} = \frac{1000t}{60} \sum_{q=1}^Q (C_{\text{EC},q} \times Q_q) P_{\text{s,out}}^i \quad (8)$$

式中: I_{EC} 为氢储能系统提升风电并网系统调度计划可信度的环境经济效益, 元; Q_q 为常规燃煤发电厂第 q 种污染物排放量, kg/kWh; $C_{\text{EC},q}$ 为治理第 q 种污染物单位环境成本, 元/kg; Q 为排放污染物种类总数。

综上所述, HESS 提升风电并网系统调度计划可信度的全寿命周期上的收入模型如式(9)所示。

$$I_{\text{Tot}} = 365N \left[\sum_{k=1}^k (I_{\text{EE}} + I_{\text{PCS}}) + I_{\text{ILS}} + I_{\text{EC}} \right] \quad (9)$$

式中, k 为采样周期序号, $k=1, 2, 3 \dots k$ 。

3.2 成本数学模型

3.2.1 HESS 各子系统成本数学模型

氢储能系统主要由电解槽、储气系统及燃料电池组子系统 3 部分组成(暂时忽略各联接系统、交直流逆变装置等), 下面针对上述各子系统分别建立其物理参数数学模型。

1) 电解槽额定功率数学模型

氢储能系统中电解槽的额定功率应该满足式(10)。

$$\begin{cases} P_{\text{EC}} = \max\{P_{\text{s,in}}^1, P_{\text{s,in}}^2, \dots, P_{\text{s,in}}^i, \dots, P_{\text{s,in}}^n\} \\ 0 < P_{\text{EC}} \leq P_{\text{EC}}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{EC} 为氢储能系统中电解槽的额定功率, MW; P_{EC}^{\max} 为氢储能系统中电解槽的额定功率上限(受限于现有技术指标), MW; $P_{\text{s,in}}^i$ 为氢储能系统在第 i 个时段的充电功率, MW。

2) 燃料电池组额定电流数学模型

同样的道理, 燃料电池的功率模型为

$$\begin{cases} \eta_{\text{FC}} \sum_{f=1}^F P_{\text{FC}} = \max\{P_{\text{s,out}}^1, P_{\text{s,out}}^2, \dots, P_{\text{s,out}}^i, \dots, P_{\text{s,out}}^n\} \\ 0 < P_{\text{FC}} \leq P_{\text{FC}}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{FC} 为氢储能系统中单个燃料电池的额定功率, MW; f 为燃料电池的个数; η_{FC} 为燃料电池电堆转换效率; P_{FC}^{\max} 为氢储能系统中燃料电池的额定功率上限(受限于现有技术指标), MW; $P_{\text{s,out}}^i$ 为氢储能系统在第 i 个时段的放电功率, MW;

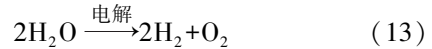
3) 储气系统额定容量数学模型

电解槽电解水制氢的速率, 可用式(12)表示。

$$V_{\text{H}_2} = 418\eta_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{s,in}}^i / \sum_{j=1}^J U_j \quad (12)$$

式中: η_{H_2} 为电解槽电解水制氢效率, m^3/h ; J 为电解槽电解单元总数; U_j 为第 j 个电解槽单元电压。

由相关化学知识可知, 电解水生成氢气和氧气的气体比为 2:1, 如式(13)所示。



则电解槽电解水产生氧气的体积为

$$V_{\text{O}_2} = \frac{1}{2} V_{\text{H}_2} \quad (14)$$

储氢罐的体积为

$$V_{\text{GSH}} = \max \frac{1}{60} \left\{ \int_{t_1}^{t_2} V_{\text{H}_2} dt, \int_{t_3}^{t_4} V_{\text{H}_2} dt, \dots, \int_{t_{n-1}}^{t_n} V_{\text{H}_2} dt \right\} \quad (15)$$

储氧罐的体积为

$$V_{\text{GSO}} = \max \frac{1}{60} \left\{ \int_{t_1}^{t_2} V_{\text{O}_2} dt, \int_{t_3}^{t_4} V_{\text{O}_2} dt, \dots, \int_{t_{n-1}}^{t_n} V_{\text{O}_2} dt \right\} \quad (16)$$

3.2.2 HESS 成本数学模型

提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 成本分为初装成本 C_{FC} 和运行维护成本 C_{VC} 。由图 1 可知, HESS 主要由电解池、储气系统及燃料电池 3 部分组成, 因此初装成本计算可表示为

$$\begin{cases} C_{\text{FC}} = C_{\text{F,EC}} + C_{\text{F,GS}} + C_{\text{F,FC}} \\ C_{\text{F,EC}} = K_{\text{UC,EC}} \cdot P_{\text{EC}} \\ C_{\text{F,GS}} = K_{\text{UC,GSH}} \cdot V_{\text{GSH}} + K_{\text{UC,GSO}} \cdot V_{\text{GSO}} \\ C_{\text{F,FC}} = K_{\text{EC,FC}} \cdot P_{\text{FC}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: C_{FC} 、 $C_{\text{F,EC}}$ 、 $C_{\text{F,GS}}$ 、 $C_{\text{F,FC}}$ 分别为 HESS 总初装成本、电解池成本、储气系统成本和燃料电池成本, 元; $K_{\text{UC,EC}}$ 、 $K_{\text{UC,GSH}}$ 、 $K_{\text{UC,GSO}}$ 、 $K_{\text{UC,FC}}$ 分别为电解

池、储氢系统、储氧系统、燃料电池单位功率成本,元/kW; P_{EC} 、 V_{GSH} 、 V_{GSO} 、 P_{FC} 分别为电解池额定功率、储氢系统额定容量、储氧系统额定容量、燃料电池额定功率。

分析文献[15]可知,HESS 运行维护成本主要是工作过程中频繁启停各工作单元引起的机械损失,如电解液消耗、离子交换膜老化等。这部分费用一般在 HESS 的折旧费用中已经考虑,因此 HESS 的运行维护成本可表示为

$$C_{VC} = (1 - \alpha - \beta) C_{FC} \quad (18)$$

式中: α 为氢储能系统残值回收费用系数; β 为氢储能系统残值清理费用系数;且 $\alpha + \beta < 1$ 。

HESS 全寿命周期成本为

$$C_{Tot} = C_{FC} + C_{VC} \quad (19)$$

3.3 经济效益数学模型

1) 全寿命周期经济效益

全寿命时间尺度上项目的经济效益是反映一项投资活动的整体可行性优良的重要经济指标。提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 经济效益数学模型为

$$R_{Tot} = I_{Tot} - C_{Tot} \quad (20)$$

2) HESS 可信度数学模型

限于氢储能系统中电解槽子系统和燃料电池子系统技术性能,现实场景中,氢储能系统并不能 100%完全消纳风电实际出力超出调度出力计划误差带上限部分,以及完全满足风电实际出力低于调度出力计划误差带下限部分,也就是说氢储能系统并不能 100%提升风电调度计划的可信度,这样就存在一个提升度的问题,具体如下:

氢储能系统充电过程中,由式(21)可知,若 $P_{s,in}^t > P_{EC}^{\max}$,超出部分氢储能系统并不能继续充电,即这一过程中的功率损失为

$$\Delta P_{s,in} = \sum_{t=1}^T (P_{s,in}^t - P_{EC}^{\max}) \quad (21)$$

氢储能系统放电过程中,由式(22)可知,若 $P_{s,out}^t > P_{FC}^{\max}$,超出部分氢储能系统并不能继续放电,即这一过程中的功率损失为

$$\Delta P_{s,out} = \sum_{t=1}^T (P_{s,out}^t - P_{FC}^{\max}) \quad (22)$$

则调度计划可信度的提升度计算模型表示为

$$\Phi = \left[\sum_{t=1}^T P_{w,s}^t - (\Delta P_{s,in} + \Delta P_{s,out}) \right] / \sum_{t=1}^T P_{w,s}^t \quad (23)$$

式中: Φ 为调度计划可信度的提升度; $\sum_{t=1}^T P_{w,s}^t$ 为风电场统计周期内实际总出力。

4 算例分析

针对某风电场实际运行数据并配置 HESS 装置,校验所建提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 经济效益计算模型的正确性和有效性。

4.1 参数设置

1) 电解槽子系统参数设置。通过对目前国内市场上各大厂家电解水制氢设备的统计,采用的电解槽规格为外送压力 5000 Pa、25 °C 的电解温度、单个电解槽电解额定电压为 2 V,各厂家的价位如表 1 所示。

表 1 国内电解水制氢设备参数及厂家报价

厂家名称	产品型号	制氢纯度/ %	制氧纯度/ %	单价/ (万元·kW ⁻¹)
扬州中电制氢设备公司	SDQ 系列	99.999	99.700	0.900
苏州竞立制氢设备公司	DQ 系列	99.800	99.300	2.200
中船重工七一八研究所	HG 系列	99.990	99.500	2.700

2) 储气子系统参数设置。经调研统计,目前国内市场上储气设备(储氢、储氧设备)的规格、参数及价格统计情况如表 2 所示,拟选择表中上海申江压力容器有限公司的产品。

表 2 储氢设备参数及厂家报价

厂家名称	产品容积/ m ³	压强/ MPa	材料 类型	单价/ (万元·m ⁻³)
青岛信泰容器制造公司	200.00	3.50	S304	4.500
上海申江容器公司	150.00	4.10	S31603	5.000
青岛储气罐制造公司	100.00	3.50	S31603	6.000

3) 燃料电池参数设置。经调研统计,目前国内市场上质子交换膜燃料电池的规格、参数及价格统计情况如表 3 所示,拟选择表中上海攀业氢能源科技有限公司的产品。

4) 电价设置

涉及到的多种电源的电价设置如表 4 所示。

4.2 算例计算

1) 氢储能系统充放电区间期对应的充放电价格划分结果

表 5 为氢储能系统充电区间对应的统计时段、充电功率和充电价格;表 6 为氢储能系统放电区间

对应的统计时段、放电功率和放电价格。

表 3 质子交换膜燃料电池参数及厂家报价

厂家名称	产品型号	额定输出	供氢品质/ %	供氢流量 L/min	电堆温度/ ℃	效率/ %	价格/ (元· kW ⁻¹)
弗尔赛公司	FSE-RDZ3-7K/70-B0110	7.3kW; 70.4V; 100~ 200 A	干燥, ≥99.90	70.7	<55	65	33 000
攀业氢能公司	EOS-5000	5 kW; 72 V; 69.5 A	干燥, ≥99.95	58.40	<75	50	20 000
河森电器公司	H-1000	1 kW; 42 V; 24 A	干燥, ≥99.99	14.00	<65	75	6000

表 4 各类电源的上网电价 单位:元/kWh

电源类型	风电	水电	火电	调峰电价	填谷电价	备用容量电价
电价价格	0.60	0.35	0.45	1.30	0.25	0.60

表 5 e_{sd} 为 6 MW 时氢储能系统充电区间及价格

时段	区域名称	实际充放电功率/ MW	价格/ (元· kWh ⁻¹)	时段	区域名称	实际充放电功率/ MW	价格/ (元· kWh ⁻¹)
00:15	S7	2.625 8	0.45	13:30	S7	1.457 4	0.45
01:00	S2	1.663 7	0.45	14:15	S7	1.786 7	0.45
01:45	S6	3.243 8	0.25	15:15	S7	0.770 8	0.45
03:00	S6	6.000 0	0.25	15:45	S7	0.097 5	0.45
03:30	S7	3.003 0	0.45	16:45	S2	2.980 5	0.45
06:00	S6	4.996 9	0.25	17:00	S7	0.997 7	0.45
06:15	S6	6.000 0	0.25	17:15	S6	6.000 0	0.25
07:00	S2	2.172 1	0.45	17:45	S7	1.756 7	0.45
07:15	S7	0.299 9	0.45	19:00	S6	4.997 2	0.25
08:15	S7	0.124 6	0.45	19:45	S6	1.936 4	0.25
08:45	S2	4.057 3	0.45	20:45	S6	5.998 3	0.25
09:00	S6	5.239 0	0.25	21:15	S6	2.977 5	0.25
10:45	S6	4.956 9	0.25	21:30	S2	2.012 9	0.45
12:00	S2	2.778 9	0.45	22:15	S7	1.264 3	0.45
12:30	S6	2.688 1	0.25	22:30	S6	3.999 9	0.25
12:45	S7	0.734 5	0.45	23:45	S6	2.760 0	0.25

2) 氢储能系统各子系统额定功率

根据上述计算结果和所建立数学模型,计算得到的氢储能系统中电解槽、燃料电池的额定功率和储氢罐、储氧罐的额定容量如表 7 所示。

3) 氢储能系统成本和收入计算

计算得到的 HESS 成本和收入如表 8 所示。

4) HESS 提升风电并网系统调度计划的可信度

基于所建模型,依参数设置,计算氢储能系统提升风电并网系统调度计划可信度的提升度为 99.81%。图 4 为 HESS 全寿命周期内的经济效益与风电并网系统调度计划可信度的提升度的关系,可

以直观地看到 HESS 经济效益随着调度计划可信度的增加而降低。当提升度为 100%极值时,HESS 全寿命周期的经济效益不足 0.18 亿元,提升度在 [90%,93%] 范围变化时,经济效益随提升度的变化下降的敏感性最强。

表 6 e_{sd} 为 6 MW 时氢储能系统放电区间及价格

时段	区域名称	实际充放电功率/ MW	价格/ (元· kWh ⁻¹)	时段	区域名称	实际充放电功率/ MW	价格/ (元· kWh ⁻¹)
00:00	S3	5.251 1	0.7	13:45	S8	3.478 5	0.8
01:15	S8	3.153 4	0.8	14:00	S3	3.422 3	0.7
02:00	S3	0.158 5	0.7	14:30	S8	4.035 0	0.8
02:15	S8	1.905 1	0.8	15:30	S8	4.767 3	0.8
03:45	S8	6.000 0	0.8	16:30	S8	4.692 0	0.8
04:30	S8	5.745 3	0.8	17:30	S8	6.000 0	0.8
04:45	S8	2.667 5	0.8	18:00	S3	2.7364	0.7
05:15	S8	6.0000	0.8	18:15	S3	5.1847	0.7
06:45	S8	4.002 2	0.8	18:45	S8	4.756 9	0.8
08:00	S8	1.651 0	0.8	19:15	S8	1.882 1	0.8
09:30	S3	3.127 0	0.7	20:00	S3	3.743 9	0.7
10:00	S8	2.995 8	0.8	20:15	S8	1.257 2	0.8
10:30	S3	2.806 7	0.7	22:00	S8	4.610 0	0.8
11:00	S8	3.891 0	0.8	22:45	S8	4.890 8	0.8
11:15	S3	4.405 3	0.7	23:15	S3	5.032 8	0.7

表 7 e_{sd} 为 6 MW 时的 HESS 中各子系统的额定值

序号	名称	计算结果
1	电解槽	6 MW
2	燃料电池	6 MW
3	储氢罐	33.962 5 L
4	储氧罐	16.981 2 L

表 8 e_{sd} 为 6 MW 时 HESS 的成本、收入和效益

项目名称	HESS 成本/ 万元	HESS 收入/ 万元	HESS 经济效益/ 万元
全寿命周期	25 709.3	26 182.1	472.8

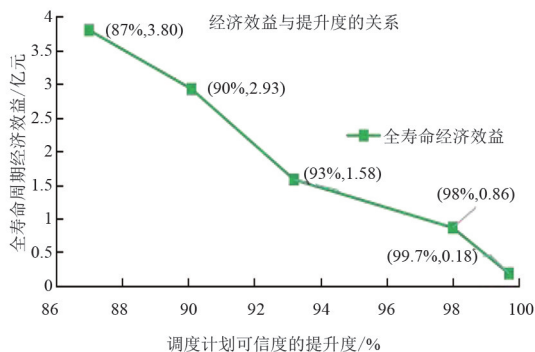


图 4 经济效益与提升度的关系

4.3 HESS 敏感性因素分析

1) 电价对 HESS 经济效益的影响

上面已经提到,氢储能系统通过其“低充、高

放”电能的过程获得经济效益,那么 HESS 经济效益与各类型电源的上网电价有着必然的关系。

图 5 和图 6 为 HESS 经济效益与各类型电源电价变化百分比的关系(以火电为例,电价变化百分比为(电价 1-电价 2)/电价 2×100%)。分析可知,HESS 经济效益对火电、水电和填谷电价具备负相关敏感性,对风电和调峰电价具备正相关敏感性,且 HESS 经济效益对填谷上网电价和调峰电价最为敏感。

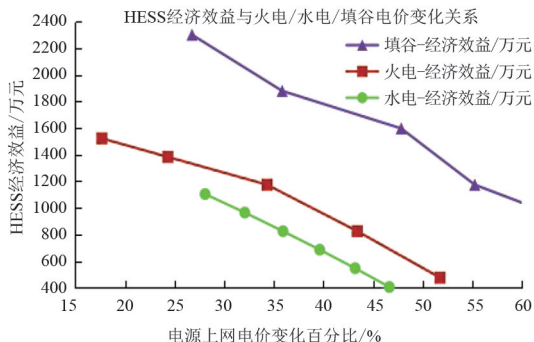


图 5 火电、水电、填谷电价对 HESS 经济效益的影响

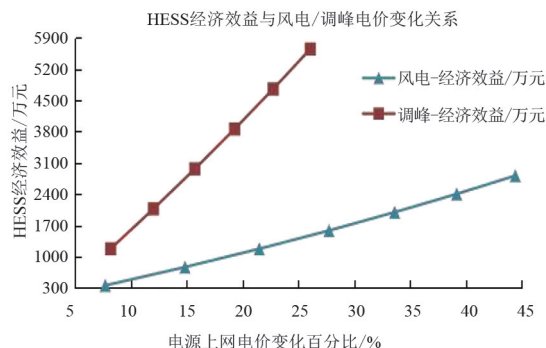


图 6 风电、调峰电价对 HESS 经济效益的影响

2) 调度误差变化对 HESS 经济效益和提升度的影响

上面已经对调度误差做了定义,即允许实际出力偏离调度出力的程度,那么随着调度误差值的增大,需要氢储能系统充放电功率将会减少,意味着 HESS 的作用逐渐被弱化,其经济效益也逐渐降低,具体如图 7 所示。此外,当调度误差在[1 MW, 4 MW]范围变化时,对 HESS 经济效益的影响较小。当调度误差在[4 MW, 6 MW]范围变化时,对 HESS 经济效益影响较明显,呈现急剧下滑态势;随着调度误差的增大,HESS 承受的充放电电压减小,其提升风电并网系统调度计划可信度的提升度逐渐增大。

3) 调度误差和 HESS 额定功率同时变化对 HESS 经济效益的影响

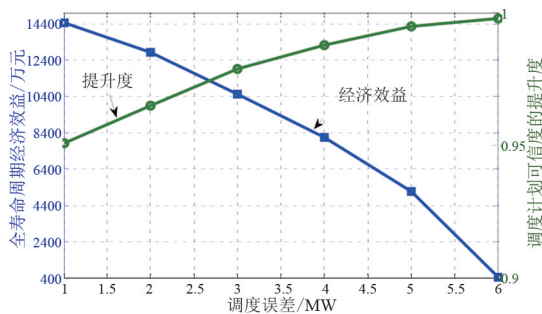


图 7 经济效益、提升度随调度误差变化敏感性变化关系

上面分析了经济效益与 HESS 额定功率和调度误差的单变量关系,得到的结论为提高 HESS 经济效益需最大化调度误差和最小化额定功率。鉴于此并结合实际生产场景,试图在二者之间寻求一个平衡点,图 8 为 HESS 经济效益随其额定功率和调度误差变化的敏感性变化关系。很明显的,图中有个最高点(3.04 MW, 5.89 MW, 17 640 万元),即其他条件不变的前提下,当调度误差和额定功率分别为 3.04 MW 和 5.89 MW 时,HESS 系统可获得最大经济效益 17 640 万元。

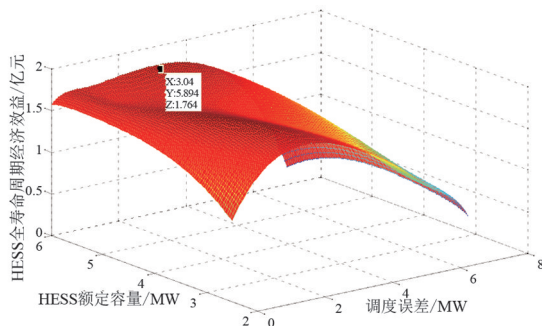


图 8 经济效益随 HESS 额定容量和调度误差的敏感性

5 结 论

所划分的计及风电预测出力、调度出力和实际出力的 HESS 充放电区间、构建的 HESS 充放电价格体系更多地考虑到了电力市场因素,迎合了电力改革导向,具备较强的现实意义并不失理论前瞻性。

上面通过开展对现有市场上 HESS 各子系统购买成本、各类电源上网电价等调研工作,设置了算例参数并得出如下结论:

- 1) 现有经济技术条件下,氢储能系统仍存在成本居高、电-氢转化效率偏低的现象,使得 HESS 陷入经济效益过低的尴尬境地;
- 2) 通过对多种电源上网电价对 HESS 经济效益的影响可知,HESS 经济效益对调峰和填谷电价敏感性较强。

参考文献

- [1] 李亚楼,周孝信,林集明,等.2008 年 IEEE PES 学术会议新能源发电部分综述[J].电网技术,2008,20(32):1-7.
- [2] 刘琳.新能源风电发展预测与评价模型研究[D].北京:华北电力大学,2013.
- [3] SOLANGI K H, ISLAM M R, SAIDUR R, et al. A review on global solar energy policy[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2011, 15(4):2149-2163.
- [4] LIU W, LUND H, MATHIESEN B V, et al. Potential of renewable energy systems in China[J]. Applied Energy, 2011, 88(2):518-525.
- [5] DIAZ-GONZALEZ F, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O, et al. A review of energy storage technologies for wind power applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4):2154-2171.
- [6] 陈星莺,刘孟觉,单渊达.超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J].中国电机工程学报,2001,21(12):63-66.
- [7] LEE T Y. Operating schedule of battery energy storage system in a time-of-use rate industrial user with wind turbine generators: a multipass iteration particle swarm optimization approach[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3):774-782.
- [8] 赵波,韦立坤,徐志成,等.计及储能系统的馈线光伏消纳能力随机场景分析[J].电力系统自动化,2015,39(9):34-40.
- [9] NADEESHANI J, PETER W, MOHAMMADAS M. An optimal management strategy for distributed storages in distribution networks with high penetrations of PV[J]. Electric Power System Research, 2014(116):147-157.
- [10] 汪卫华,张慧敏,陈方.用削峰填谷方法提高供电企业效益的分析[J].电网技术,2004,28(18):79-81.
- [11] 蔡国伟,孔令国,薛宇,等.风氢耦合发电技术研究综述[J].电力系统自动化,2014,38(21):127-135.
- [12] 蒋东方.氢氧联合循环与风能耦合发电系统可行性分析[D].北京:华北电力大学,2012.
- [13] 高小淇.可再生能源电站采用制氢储能解决限电问题的技术分析[C]//2013 电力行业信息化年会论文集.北京:中国电机工程学会电力信息化专业委员会,国网信息通信有限公司,2013.
- [14] 伊立其,闫常峰,郭常青.风电-氢储能耦合燃料电池发电系统的经济性分析[C]//中国化工学会年会论文集.北京:中国化工学会,2015.
- [15] 袁铁江,胡克林,关宇航,等.风电-氢储能与煤化工多能耦合系统及其氢储能子系统的 EMR 建模[J].高电压技术,2015,41(7):2156-2164.
- [16] YU S, MAYS T J, DUNN R W. A new methodology for designing hydrogen energy storage in wind power systems to balance generation and demand[C]// International Conference on 2009 Sustainable Power Generation and Supply, IEEE, 2009:1-6.
- [17] ALI D M. Energy capacity and economic viability assessment of the renewable hydrogen energy storage as a balancing mechanism in addressing the electric system integration issues inherent with variable renewable energy resources[J]. IET Conference on Reliability of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2011), 2011:1-7.
- [18] GARGOOM A, HARUNI A M O, HAQUE M E, et al. Hybrid stand-alone power systems with hydrogen energy storage for isolated communities[C]//2010 IEEE PEST & D, 2010:1-6.
- [19] MENDIS N, SAYEEF S, MUTTAQI K M, et al. Hydrogen energy storage for a permanent magnet wind turbine generator based autonomous hybrid power system[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2011:1-7.
- [20] YU S, MAYS T J, DUNN R W. Hydrogen energy storage in isolated microgrids with wind generation[C]//2010 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), IEEE, 2010:1-5.
- [21] AL-BADI A H, YOUSEF H, ALAAMRI O, et al. Performance of a stand-alone renewable energy system based on hydrogen energy storage[C]//2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), IEEE, 2014:356-359.
- [22] BAGHAEI H R, GHAREHPETIAN G B, KAVIANI A K. Three dimensional Pareto optimal solution to design a hybrid stand-alone wind/PV generation system with hydrogen energy storage using multi-objective Particle Swarm Optimization[C]//2012 Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG), IEEE, 2012:80-85.
- [23] 南晓强,李群湛,赵元哲,等.计及风电预测可信度的经济调度及辅助决策方法[J].电力系统自动化,2013,37(19):61-67.

作者简介:

蔡高雷(1986),男,硕士,工程师,主要研究方向为新能源发电及其并网技术;

蔡静静(1984),女,博士,主要研究方向为偏微分方程;

刘桂龙(1982),男,硕士,高级工程师,从事供配电设计工作。

(收稿日期:2022-11-18)