

台风条件下含混合电氢储能的海上风电场 并网运行智能控制方法

谢善益¹, 仲卫^{2*}, 杨强¹, 谢恩彦², 周刚¹

(1. 广东电网有限责任公司 电力科学研究院, 广东 广州 510080;

2. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 215200)

Intelligent Control Method for Grid-Connected Operation of Offshore Wind Farm with Hybrid Electric Hydrogen Storage under Typhoon Conditions

XIE Shanyi¹, ZHONG Wei², YANG Qiang¹, XIE Enyan², ZHOU Gang¹

(1. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. NARI-TECH Nanjing Control Systems Co., Ltd., Nanjing 215200, China)

Abstract: With the increasing installed capacity of offshore wind power in China, coastal areas with developed economy and large power load increasingly rely on and pay attention to the safe operation of offshore wind power. The problem of friendly access to offshore wind farms becomes particularly prominent in the context of declining capacity of conventional thermal units in the system and low system inertia. Especially during typhoons, offshore wind farms may be quickly disconnected from the power grid before reaching the cut-off wind speed, resulting in a large power deficit in the main network, worsening voltage frequency and other adverse effects. In order to solve the problems of large disturbance caused by wind power inherent fluctuation and typhoon, a grid-connected operation control method of offshore wind farm with hybrid electric hydrogen energy storage is proposed. During the normal operation of offshore wind farms, the method effectively smooth out the fluctuation of wind power during the normal operation of offshore wind farms by rationally arranging energy storage and charging/discharging. While during the transit of typhoons, the method alleviates the sudden drop in offshore wind power output and reduces the adverse impact on the grid at the affected end by rational use of hybrid electric hydrogen energy storage. The validity of the proposed method is verified by simulating the real data of an offshore wind farm in Guangdong.

Key words: typhoon; offshore wind farm; hybrid electric hydrogen energy storage; grid-connected operation

摘 要: 随着我国海上风电装机容量不断增加, 经济发达、电力负荷大的沿海地区越来越依赖和关注海上风电的安全运行。在系统常规火电机组容量下降、系统惯量较低的情况下, 海上风电场的友好接入问题变得尤为突出。特别是在台风期间, 海上风电场在达到截止风速之前可能会与受端电网迅速断开, 导致主网出现大量功率缺额、电压频率恶化等不利影响。为了解决风电固有波动性和台风引起的大扰动问题, 提出了一种含混合电氢储能的海上风电场并网运行控制方法。该方法在海上风电场正常运行期间, 通过合理安排储能和充放能, 有效平抑了风电波动性; 而在台风过境期间, 通过合理使用混合电氢储能, 缓解了海上风电输出骤降, 减少对受端电网的不利影响。通过对广东某海上风电场的真实数据进行仿真研究, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 台风; 海上风电场; 混合电氢储能; 并网运行

0 引言

化石能源的广泛使用带来了其储量不断减少以及环境污染严重的问题。因此, 当今能源正朝着可持续发展的方向转变^[1]。在过去几年里, 风能因其储量丰富和无污染的特点得到了广泛应用^[2]。尤其是在沿海地区, 由于集中了大量的电负荷, 中国政府大力发展海上风能以满足当地的能源需求, 并实现碳中和。但是, 海上风力发电的运营和维护面临一些挑战, 其中主要问题包

基金项目: 南方电网有限责任公司科技项目 (GDKJXM20201996)

Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GDKJXM20201996)

括^[3-4]: (1) 电网吸收能力不足, 由于海上风力发电系统规模较大、输出功率较高以及电网承载能力有限, 可能无法完全吸收并输送所有的风电功率, 从而导致风电场的限电或发电量削减, 影响系统的经济性和可靠性; (2) 远离主要陆地, 海上风电场通常建设在远离主要陆地的海域, 从而导致运维困难, 维修人员和设备需要经过较长的航程才能到达风电场, 增加了维护的成本和时间; (3) 海上环境复杂, 海上环境条件复杂多变, 包括风速、风向、海浪和海洋生物等, 这些因素会影响海上风电设备的运行和维护, 增加了设备的故障率和维修难度。

为了解决海上风电场的稳定、安全、可靠和经济运行等问题, 国内外学者提出了多种方法^[5-10]。文献[5]针对智能电网的不断发展和传统火电比例降低带来的频率安全问题, 提出了一种考虑风-储频率响应的智能电网频率特征分析方法, 仿真结果表明所提方法可以指导风-储参与调频下的电网安全稳定运行。文献[6]提出了一种考虑电池运行状态的储能容量配置方法, 用于解决储能运行中出现的不平衡状态问题, 研究结果表明所提方法在处理电池不平衡状态等方面具有有效性。文献[7]对风电运行的可靠性和性能评估进行了研究。文献[8]针对海上风电技术在并网系统中可能出现的可靠性低、技术成本高及能量浪费等问题, 提出了一种基于主动能量控制的盈余功率主动回收方法, 研究结果表明所提方法可以提高能源利用效率并降低成本。文献[9-10]指出有关海上风电场经济调度模型的研究大多未考虑风电和电池储能系统之间的协调控制机制, 尤其是在台风等极端天气条件下, 在这种情况下, 海上风电场保持收益与频率协调运行, 因此设计合理的协调控制方法变得尤为关键, 这不仅可以提高海上风电场的稳定性和经济性, 还有助于确保电力系统在极端天气条件下的安全运行。因此, 研究海上风电与储能系统的协调控制机制对未来海上风电场的友好接入具有重要意义。

本文提出了一种协调控制方法, 将海上风电场与混合电氢储能系统相结合, 以实现海上风电在台风期间的友好接入。将氢储能作为备用电源, 可以有效解决海上风电输出的随机性。首先, 详细介绍了海上风电场和混合电氢储能系统的物

理建模方法和控制模型, 通过建立准确的数学模型, 可以更好地理解和控制系统的运行情况。其次, 根据台风期间的情况, 提出了海上风电场和混合电氢储能系统之间的协调控制策略, 所提策略可以使海上风电场更灵活、友好地满足台风期间的并网运行需求; 同时, 氢储能系统也可以在正常运行下最大限度地利用风能发电, 并在台风期间作为海上风电的备用电源。最后, 进行了仿真验证, 结果表明所提方法能够使海上风电场在台风期间更好地接入电网, 同时减少对受端电网的负面影响。综上, 本文所提的协调控制方法为海上风电在台风期间的友好接入提供了有效的解决方案, 具有很大的应用潜力。

1 含混合电氢储能的海上风电场建模

1.1 系统结构

图1为含氢能系统的海上风电场结构示意图。

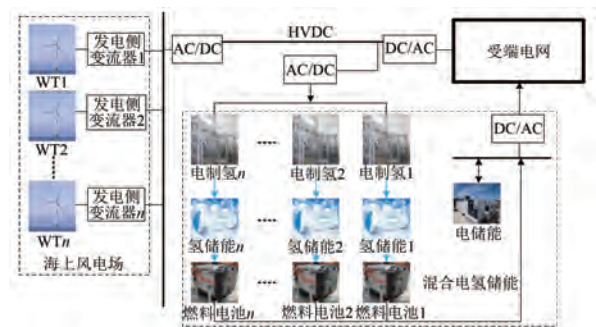


图1 含混合电氢储能的海上风电场结构图

Fig. 1 Structure diagram of offshore wind farm with hybrid electric hydrogen energy storage

根据图1所示, 含混合电氢储能的海上风电场有两种运行场景: 1) 并网运行模式, 海上风电场作为电源向陆上电网提供电能, 在最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 模式下运行, 混合电氢储能将根据运行条件进行充电或放电。当海上风电场的输出功率超过电网所需功率时, 电能将储存在电储能中, 如果还有多余电能, 电解槽装置将启动, 将其转换为氢气储存在氢储能中, 以消除弃风现象。如果电网的需求超过可用的海上风电场的输出功率, 额外的功率差额将由混合电氢储能共同提供; 2) 在台风等极端天气条件下, 海上风电场确实面临快速脱网的风险, 而传统的柴油发电机组启动和响应时间较长, 无

法瞬间弥补功率缺口, 可能导致受端电网发生大规模停电。为了解决这个问题, 在近海陆地安装混合电氢储能系统。混合电氢储能系统将电能转化为氢气储存, 然后在需要时再转化为电能, 提供动态频率支撑, 以维持系统供需平衡。

1.2 物理建模

1.2.1 海上风电机组模型

风机是一种用于将风能转化为电能的发电设备。根据贝茨定律^[11], 风机能够转换的最大能量来自风的运动:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (1)$$

式中: P_m 为最大机械功率; ρ 为空气密度; R 为风轮叶片的半径; v 为风速, 且 $\lambda = \omega_m R/v$, λ 为叶尖速比, ω_m 为风轮的机械角速度; C_p 为风机的功率系数, 通常取 $16/27 \approx 0.593$, $C_p = f(\lambda, \alpha)$, α 为俯仰角, C_p 主要受实际风速和风机的输出功率特性的影响^[12]。

实际工程中为了便于计算和满足实时控制需求, 通常采用简化线性模型来表示^[13]:

$$P_e(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{ci} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_x, & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0, & v_{co} < v \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_e(v)$ 为风速 v 下风机的输出功率; P_x 为固定桨距风机的海上风电机组在额定风速下的输出功率; P_r 为可变桨距的海上风电机组在额定风速下的输出功率; v_{ci} 为海上风电机组的切入风速; v_{co} 为海上风电机组的切出风速; v_r 为海上风机组的额定风速。

根据风机类型不同, P_x 和 P_r 的大小关系不同^[14]。如可变桨距的风机 $P_x = P_r$; 而固定桨距风机 $P_x = P_r + \frac{P_{co} - P_r}{v_{co} - v_r}(v - v_r)$, P_{co} 为 $v = v_{co}$ 时风机的输出功率。

1.2.2 氢储能模型

氢储能系统包括电解槽、燃料电池和储氢罐。为了实现对系统的实时控制, 电解槽和燃料电池都采用恒流模式运行。因此, 可以对电解槽进行建模^[15-16]:

$$U_{cell} = U_{rev} + \frac{r}{A_{el}} I_{el} + s \log \left(\frac{t}{A_{el}} I_{el} + 1 \right) \quad (3)$$

式中: U_{cell} 为每个电解槽的电压; U_{rev} 为可逆电解槽电压; r 为某工作温度下电解液欧姆电阻参数; A_{el} 为电极面积; I_{el} 为电解槽电流; s 和 t 为电极过电压参数。

根据法拉第效率规律, 电解槽的产氢量 m_{H_2} 为

$$m_{H_2} = \eta_F \frac{S_{cell} I_{el}}{zF} \quad (4)$$

式中: $\eta_F = \frac{(I_{el}/A_{el})^2}{f_1 + (I_{el}/A_{el})^2} f_2$ 为实际产氢量与理论最大值之间的比值, f_1 和 f_2 为法拉第效率参数; S_{cell} 为每堆电解槽单元数; z 为每摩尔水转移电子的摩尔数; F 为法拉第常数。

由式(4)可知, 电解槽的产氢量与电解槽电流成正比。可得电解槽的堆叠电压 $V_{el} = S_{cell} U_{cell}$ 。

氢燃料电池可将氢气燃烧产生的能量转换为电能, 故氢燃料电池可建模为^[17]

$$I_{FC} = \frac{2Fm_{H_{2use}}}{N_{cell}} = \frac{4Fm_{O_{2use}}}{N_{cell}} \quad (5)$$

式中: I_{FC} 为氢燃料电池的输出电流; N_{cell} 为电池单元的数量; $m_{H_{2use}}$ 为耗氢速率; $m_{O_{2use}}$ 为耗氧速率。

由式(5)可知, 氢燃料电池的输出电流大小与燃氢量相关, 故燃料电池的输出是由电流控制的。为了增大其输出功率大小, 通常将多电池串联堆叠, 以增加其功率输出。这些单元的堆叠电压 $V_{FC} = N_{cell} V_{cell}$, 其中 V_{cell} 为单电池的输出电压。

生产氢气后, 需要进行储存。目前最常用的方法是将氢气储存在高压氢气罐中^[18]。由于储氢罐是一个封闭的系统, 氢气可以长时间保存而且不会受损。为了方便实时监测储氢量, 通常通过测量罐内氢气的压力来实现。储氢罐的氢气压力的表达式为

$$p_{sto} = \frac{R_{gas} T_{sto}}{V_{sto}} m_{sto} + p_{tank} \quad (6)$$

式中: p_{sto} 为储罐压力; R_{gas} 为通用气体常数, 其值为 0.082 06; T_{sto} 为储罐温度; V_{sto} 为储罐体积; m_{sto} 为储罐氢气消耗量; p_{tank} 为储罐初始压力。

罐内的储氢状态 $SOC_H = \frac{p_{sto}}{p_{sto_{max}}} \in (0, 1)$ 决定了电解槽或燃料电池是否运行, $p_{sto_{max}}$ 为储氢罐最大

压力。考虑到氢储能与电储能相似,不可以过充或深放,本文将罐内的储氢状态 SOC_H 分为五个区域, $SOC_{H,max}$ 和 $SOC_{H,min}$ 分别为 SOC_H 的最大运行极限和最小运行极限^[19]。在正常运行和台风期间,罐内的储氢状态 SOC_H 均在规范范围 $SOC_{H,ref}$ 内运行, $SOC_{H,ref}$ 不大于 $SOC_{H,max}$ 且不小于 $SOC_{H,min}$ 。因此,根据 SOC_H 的状态,以控制氢储能的激活与关闭^[20]。

1.2.3 超级电容器

超级电容器的电压和电流可以用式(7)和式(8)来表示:

$$V_{SC} = N_s V_t \quad (7)$$

$$I_{SC} = I_t N_p \quad (8)$$

式中: N_s 为超级电容器的电压单元数量; V_t 为端口电压; N_p 为超级电容器的电流单元数量; I_t 为端口电流。

因此,通过改变总支路电流可控制流入超级电容器的功率,即:

$$P_{SC} = I_{SC} V_{SC} \quad (9)$$

超级电容器的电荷状态 SOC_{SC} 可表示为

$$SOC_{SC} = \frac{V_{SC} - V_{SCmin}}{V_{SCmax} - V_{SCmin}} \quad (10)$$

式中: V_{SCmin} 和 V_{SCmax} 分别为超级电容器的最小电压和最大电压。

被控电流 I_t 的输入和输出会改变 V_{SC} , 进而改变 SOC_{SC} 。

1.2.4 高压直流输电线路的 AC-DC 功率控制

高压直流 (High Voltage Direct Current, HVDC) 输电线路 AC-DC 功率控制的主要任务是将交流转换为直流。若不考虑整流损耗,可输送的风能为

$$P_{WF} = \frac{3}{2} (v_{AC_d} i_{AC_q} + v_{AC_q} i_{AC_d}) \quad (11)$$

式中: v_{AC_d} 、 v_{AC_q} 分别为交流侧 d 、 q 轴电压; i_{AC_d} 、 i_{AC_q} 分别为交流侧 d 、 q 轴电流。

高压直流侧输出的有功功率 P_{HVDC} 和无功功率 Q_{HVDC} 为

$$P_{HVDC} = \frac{3}{2} (v_{PCC_q} i_{G_q}) \quad (12)$$

$$Q_{HVDC} = \frac{3}{2} (v_{PCC_d} i_{G_d}) \quad (13)$$

式中: v_{PCC_q} 为电网侧 q 轴转换到高压侧的等效电压,

假定电网侧 d 轴转换到高压侧的等效电压 $v_{PCC_d} = 0$, 则 $v_{PCC_q} = |V_{grid}|$, $|V_{grid}|$ 为高压侧受端电网的电压幅值; i_{G_d} 、 i_{G_q} 分别为逆变器 d 、 q 轴等效电流^[21]。

2 海上风电场与混合储能系统的协同控制方法

图2为海上风电场与混合储能系统的协调控制示意图。

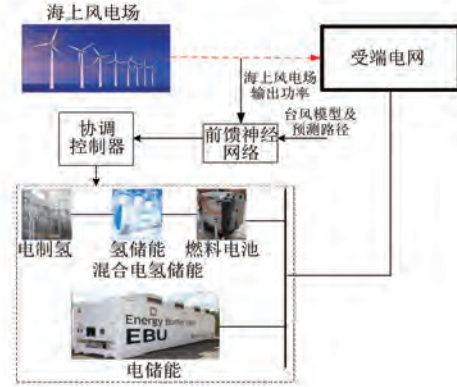


图2 海上风电场与混合储能系统的协调控制示意图

Fig.2 Schematic diagram of collaborative of offshore wind power and hydrogen energy system during typhoon

根据图2,本文设计的海上风电与氢能系统的协调控制流程图如图2所示。

由图3可知,正常运行条件下电网调度中心

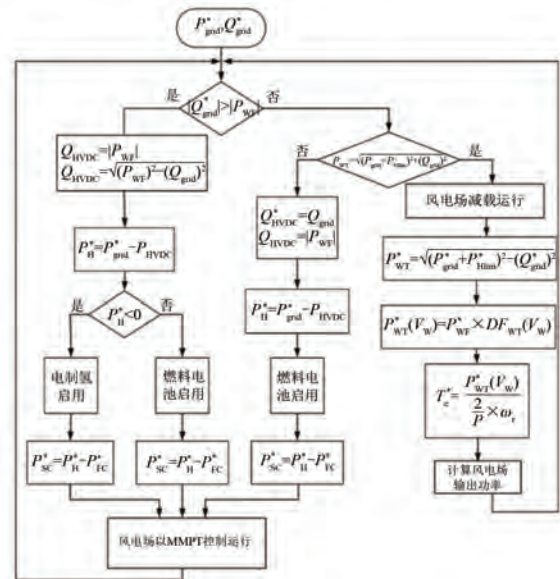


图3 台风期间海上风电与氢能系统的协调控制流程图

Fig.3 Collaborative control flow chart of offshore wind power and hydrogen energy system during typhoon

为海上风电与氢能系统设置有功功率 P_{grid}^* 指令和无功功率 Q_{grid}^* 指令。高压直流系统有功功率输出 P_{HVDC} 、无功功率输出 Q_{HVDC} 和氢能系统的有功功率输出 P_{H} 协调,使整个系统(风电场加上氢能系统)输出尽可能地跟踪和接近受端电网的负荷需求(P_{grid}^* 和 Q_{grid}^*)。

当发生台风极端天气时,海上风机达到截止风速,风机立即脱网,导致海上风电场输出功率不断减少,最终可能减小到 0。假定受端电网有功功率需求为 P_{grid}^* ,则 HVDC 有功功率为

$$P_{\text{HVDC}} = \begin{cases} 0, & |Q_{\text{grid}}^*| > |P_{\text{WF}}| \\ \sqrt{(P_{\text{WF}})^2 - (Q_{\text{grid}}^*)^2}, & |Q_{\text{grid}}^*| \leq |P_{\text{WF}}| \end{cases} \quad (14)$$

式中: Q_{grid}^* 为受端电网无功需求。

混合电氢储能的输出功率为 P_{H} 。此时,混合电氢储能需要填补 P_{grid}^* 与 P_{HVDC} 间的差值,即 $P_{\text{H}}^* = P_{\text{grid}}^* - P_{\text{HVDC}}$ 。 P_{H}^* 为混合电氢储能输出功率的参考值,其表达式为

$$P_{\text{H}}^* = \begin{cases} +P_{\text{FC}}^* + P_{\text{SC}}^*, & P_{\text{H}}^* > 0 \\ -P_{\text{EL}}^* + P_{\text{SC}}^*, & P_{\text{H}}^* \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: P_{FC}^* 为燃料电池的输出功率; P_{SC}^* 为电储能的有功功率; P_{EL}^* 为电解槽的输出功率。

在台风条件下,电解槽吸收的多余功率范围取决于氢荷电状态 SOC_{H} 以及电解槽额定功率。当多余的风电不能被电解槽完全吸收时,应对风电功率进行限制,需指导风力涡轮机增加其桨距角,以减少功率采集(减载)。当需要约束风电场功率时,控制系统将风电场功率 P_{WF}^* 设置为

$$P_{\text{WF}}^* = \sqrt{(P_{\text{grid}}^* + P_{\text{Hlim}}^*)^2 + Q_{\text{grid}}^{*2}} \quad (16)$$

式中: P_{Hlim}^* 为电解槽组可使用的最大功率限制。

若储氢满,则风电场功率设为零,然后分配到每个风机。一般情况下,风速越大,风力机的分配系数加权越高。给定风速下,每台风力机的分配因子 $DF_{\text{WF}}(V_{\omega})$ 可表示为

$$DF_{\text{WF}}(V_{\omega}) = \frac{W(V_{\omega}) \times N(V_{\omega})}{\sum [W(V_{\omega}) \times N(V_{\omega})]} \times \frac{1}{N(V_{\omega})} \quad (17)$$

式中: $W(V_{\omega})$ 为各级风速的权重因子; $N(V_{\omega})$ 为风电场内以 V_{ω} 风速运行的风力机数。

因此,式(17)中分母的总和包括所有可用的风机。利用分配因子,各风力发电机设定为

$$P_{\text{WT}}^*(V_{\omega}) = P_{\text{WT}}^* \times DF_{\text{WT}}(V_{\omega}) \quad (18)$$

式中: $P_{\text{WT}}^*(V_{\omega})$ 为在 V_{ω} 风速下的风电场功率。

由此,得到发电机侧电磁转矩为

$$T_{\text{e}}^* = \frac{P_{\text{WT}}^*(V_{\omega})}{\frac{2}{P}\omega_{\text{r}}} \quad (19)$$

式中: P 为磁极数; ω_{r} 为风力机电转子转速。

台风来临时,海上风电场与主电网断开,风机逐渐关闭。氢能系统负责确保发电和消耗(本地负荷)之间在任何时刻的功率平衡。此外,还要保障受端电网的有功平衡,对于交流电力系统,发电和负载之间的功率平衡表示为恒定的电压幅值和频率。频率控制器通过调节氢能系统的输出有功功率将频率保持在给定参考值 f_{ref} ,例如 50 Hz,电压调节器通过调节氢能系统的输出无功功率将电压幅值 U 保持在给定参考值 U_{ref} 。关键在于如何确定有功和无功功率的参考值(即 P_{ref} 和 Q_{ref})以保持电压和频率恒定。

为了预测海上风电场在台风条件下的输出功率,首先,根据数值天气预报、海上风电位置布局 and 台风预测路径等数据,利用前馈神经网络进行训练。通过此方法,可以获得台风条件下海上风电场输出功率的预测值。然后,设计了一种海上风电场并网运行智能控制器,根据预测值生成混合电氢储能的控制信号。通过准确控制混合电氢储能系统,可以缓解风电大幅波动对电网的冲击,从而提高受端电网的安全稳定性^[22]。图 4 为前馈神经网络结构图。

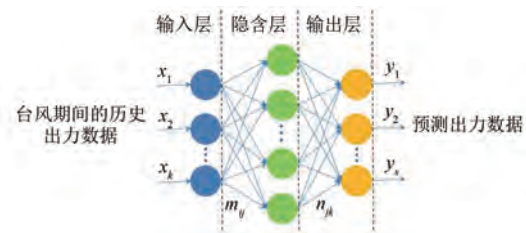


图 4 前馈神经网络结构图

Fig. 4 Structure diagram of feedforward neural network

图 4 中,隐含层网络输入为

$$u_j = \sum_{i=0}^k m_{ij} \cdot x_i, j = 1, \dots, p \quad (20)$$

式中: m_{ij} 为网络权值; x_i 为隐含层输入量; p 为隐

含层神经元数量。

隐含层输出函数为

$$o_j = f(u_j), j = 1, \dots, p \quad (21)$$

输出层网络输入为

$$w_k = \sum_{j=0}^s n_{jk} \cdot o_j, k = 1, \dots, s \quad (22)$$

式中: n_{jk} 为网络权值; s 为输出层神经元数量。

输出层输出函数为

$$y_k = f(w_k), k = 1, \dots, s \quad (23)$$

本文采用极限学习机 (Extreme Learning Machine, ELM) 算法实现神经网络模型的快速训练, 模型参数的学习利用已有风电场的海量历史数据。图 5 为所提神经网络算法流程图。

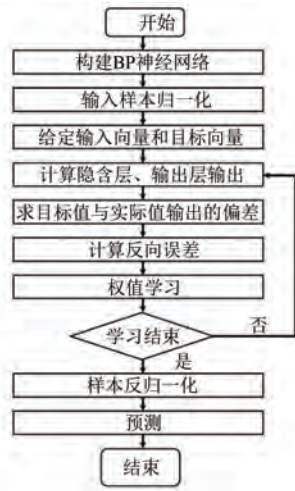


图 5 所提神经网络算法流程图

Fig. 5 Flowchart of the proposed neural network algorithm

为维持电网侧电压, 其控制为

$$i_{G_d} = \frac{2}{3} \frac{Q_{grid}^*}{v_{PCC_q}} \quad (24)$$

i_{G_d} 可以通过比例积分 (Proportional Integral, PI) 调节器适当控制以稳定直流侧电压。

此外, 本文设计了本地自适应模糊推理系统, 实时调整氢能系统的有功、无功功率输出, 以消除海上风电场逐步脱网对受端电网电压频率的影响。与 PI 控制技术相比, 自适应模糊控制技术具有灵活性强、鲁棒性好以及适用于工程应用等优点。所提自适应模糊推理系统共有二个输入量和一个输出量, 输入量分别为受端电网的电压偏差和频率偏差; 输出量为电池储能系统 (Battery Energy Storage System, BESS) 的有功、无功输出。

模糊推理系统的基本控制原理为: 1) 将频率偏差 Δf 和电压偏差 ΔU 通过模糊化转化为模糊变量; 2) 模糊器利用隶属函数提取有效信息。本文选择三角形隶属函数以满足快速调整需求。图 6 为电压偏差和频率偏差的三角形隶属函数图。

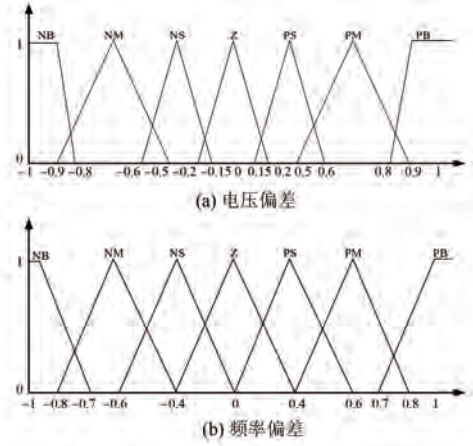


图 6 电压偏差和频率偏差的三角形隶属函数图

Fig. 6 Triangular membership function diagram of voltage deviation and frequency deviation

图 6 中 NB、NM、NS、Z、PS、PM 以及 PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中以及正大。由图 6 可知, 每个隶属函数都定义了自己的权重, 并给出了语言变量。语言变量进入模糊推理系统 (Fuzzy Inference System, FIS), 根据 FIS 中定义的规则库可以给出推理结果。例如, 根据电压偏差 NB 和偏差率 NB 可以得到模糊输出 NB。最后, 在去模糊化后, 得到非模糊输出。此外, 本文针对模糊推理系统还设计了自适应规则调整因子 α , 使控制器能够基于 Δf 和 ΔU 自动调整模糊规则, 以提高控制器的性能。自适应律描述为

$$V = \alpha \Delta f + (1 - \alpha) \Delta U, \alpha \in (0, 1) \quad (25)$$

式中不同 α 值会产生不同的控制规则。

3 仿真实验

3.1 仿真算例设置

为了验证所提方法的有效性, 本文选取广东湛江的下北海风电场作为仿真对象。该风电场位于东经 110.69°、北纬 20.698 9°。参考台风暹芭的历史路径图, 搭建了海上风电运行特性分析模块。根据气象部门提供的台风中心气压、移动速度、经纬度和最大风速等信息, 如图 7 所示。同时参考了风机的额定功率、切入风速、额定风速、切

出风速、风轮半径和推力系数等参数,运用海上风电运行特性分析模块进行计算,从而得到了有功预测出力曲线。BESS 的相关参数如表 1 所示。表 1 中, $SOC_{H,high}$ 为设定 SOC 最大值; $SOC_{H,low}$ 为设定 SOC 最小值。



图 7 台风路径及相关参数
Fig. 7 Typhoon track and related parameters

表 1 BESS 的相关参数

参数名称	参数值
额定容量/MW	6
$SOC_{H,max}$	0.9
$SOC_{H,min}$	0.1
$SOC_{H,high}$	0.8
$SOC_{H,low}$	0.2
额定输出电压/V	400
额定输出频率/Hz	50

3.2 台风来临前夕

在台风来临前夕,海上的风速通常会增加,海上的风力发电通常会以 MPPT 的模式运行。图 8 为台风来临前含有混合电氢储能的海上风电场的运行参数变化图。由图 8 可知,在 1 100 s 左右,控制系统为了满足有功需求,减少风电场输出,由于没有多余的能量产生,储能系统达不到最高储能水平。验证了所提方法的有效性。

图 9 为氢气不充足时受端电网的有功需求和风电场输出功率图。图 10 为混合电氢储能系统的 SOC 图。根据图 9(a)的数据显示,1 100 s 后,HVDC 的实际容量低于受端电网的需求容量。风能不能解决受端电网需求问题。由图 10 可知,在最开始时段,氢储能能够发挥其削峰填谷的作用,有效地解决了海上发电与需求侧之间能量平衡问

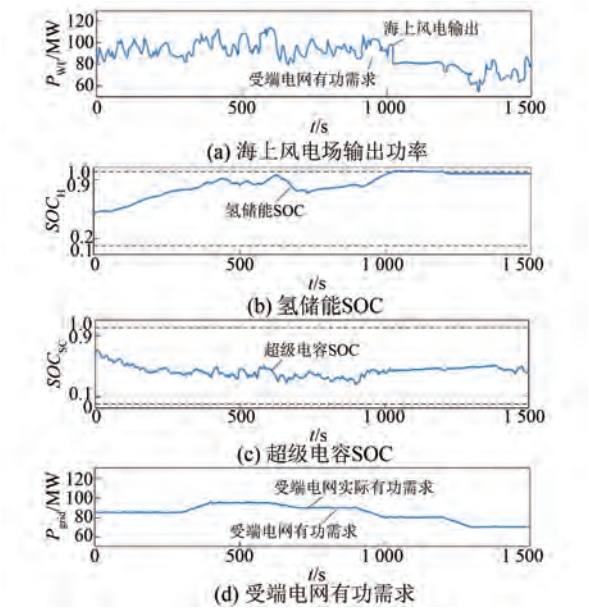


图 8 台风来临前夕含混合电氢储能海上风电场的运行参数变化图

Fig. 8 Variation of operating parameters of offshore wind farm with hybrid electric hydrogen energy storage before typhoons

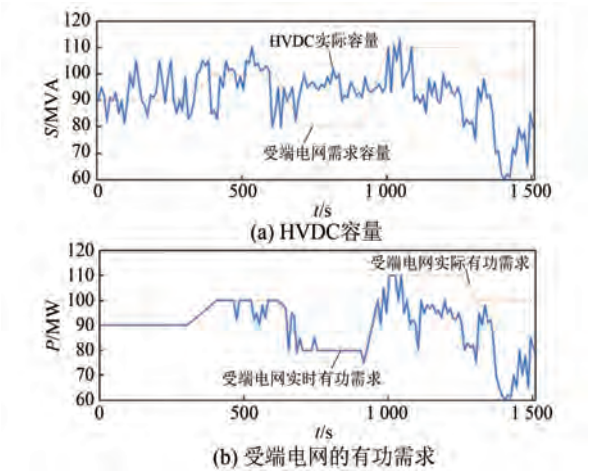


图 9 氢气不足时受端电网有功需求和风电场输出功率图
Fig. 9 Diagram of active power of receiving-end grid and power output of wind farm when hydrogen is insufficient

题。但当氢气的能量不足以满足电网的需求时,这种平衡机制被打破,储能系统的利用也降到最低水平。

3.2 台风期间

在台风条件下,海上风电场的输出特性通常会呈现以下趋势:当风速逐渐增大时,风机的输出功率会逐渐增加;然而,一旦风速达到截止风速

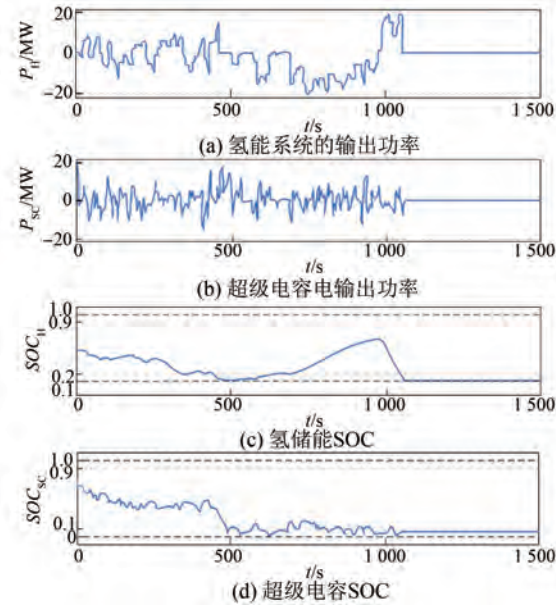


图 10 氢能系统的 SOC 图

Fig. 10 SOC diagram of hydrogen energy system

(例如 20 m/s),风机的输出功率将急剧下降。这是因为风机在截止风速之后,为保护设备安全,会自动停机,避免风速过大以损坏设备。图 11 显示了在台风条件下海上风电的输出特性,其中截止风速为 20 m/s。由图 11 可知,风电出力在 55 min 内从额定值降至零。

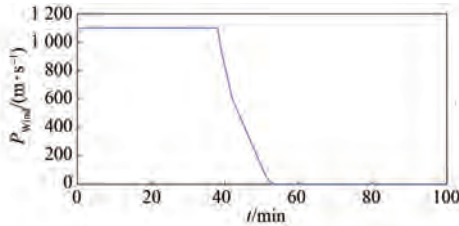


图 11 台风条件下海上风电的输出曲线

Fig. 11 Output curve of offshore wind power under typhoon conditions

图 12 为风-储综合系统的聚合功率输出,由图 12 可得,储能系统可以有效减少风电输出的波

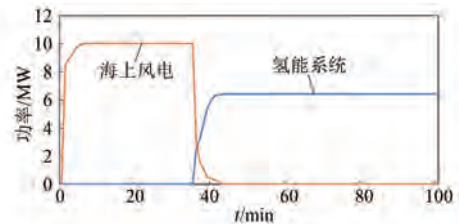


图 12 海上风电与 BESS 平滑效果图

Fig. 12 Smoothing effect of offshore wind power and BESS

动性。在台风来临前,氢储能系统能够事先进行充电操作,在功率需求较高时能够较快提供能量,图中正数表示氢能充电的过程。

4 结语

为了降低台风期间海上风电场与主网断开对受端电网造成的不利影响,本文提出了一种协调控制方法,将海上风电场与混合电氢储能系统相结合,以实现海上风电在台风期间的友好接入。通过将氢储能系统作为备用电源,有效解决了海上风电输出能量的随机性问题。首先,本文详细介绍了海上风电场和混合电氢储能系统的物理建模方法和控制模型。通过建立准确的数学模型,可以更好地理解和控制系统的运行情况。其次,根据台风期间的情况,提出了海上风电场和混合电氢储能系统之间的协调控制策略;同时利用储能系统,削峰填谷,更大程度地利用了海上风能,并在台风期间作为海上风电的备用电源。最后,通过仿真验证了所提方法能够使海上风电场在台风期间更好地接入电网,同时减少对受端电网的负面影响。综上,本文提出的协调控制方法为海上风电在台风期间的友好接入提供了有效的解决方案,具有很大的应用潜力。

参考文献

- [1] 田昕,蔡旭,贾锋. 计及电网频率波动敏感特性的双馈风电机组优化发电控制策略[J]. 电源学报, 2022, 20(1): 141-148.
TIAN X, CAI X, JIA F. Optimal generation control strategy for DFIG considering grid frequency fluctuation sensitivity [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(1): 141-148.
- [2] 陈继平,李刚,刘博,等. 薄膜型海上漂浮式光伏技术现状及展望[J]. 南方能源建设, 2023, 10(2): 1-10.
CHEN J P, LI G, LIU B, et al. Current status and prospect of membrane-based offshore floating photovoltaic technology [J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(2): 1-10.
- [3] HE Q, CHEN H, LIN Z, et al. A cost-based life-cycle pricing model for offshore wind power plants within China's carbon trading scheme [J]. Energy Reports, 2022, 8: 147-155.
- [4] CHEN J, MAO B, WU Y, et al. Green development

- strategy of offshore wind farm in China guided by life cycle assessment [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 188: 106652.
- [5] 杨康, 谢丽军, 熊浩, 等. 考虑风-储频率响应的智能电网频率特征分析[J/OL]. *电测与仪表*, 2022-07-04. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20220630.2229.002.html>.
- YANG K, XIE L J, XIONG H, et al. Analysis of frequency characteristics of smart grid considering wind-storage frequency response [J/OL]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022-07-04. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20220630.2229.002.html>.
- [6] 张小莲, 陈冲, 张仰飞, 等. 考虑电池运行状态的风电场储能容量优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(18): 199-207.
- ZHANG X L, CHEN C, ZHANG Y F, et al. Optimal configuration of wind farm energy storage capacity considering battery operation state [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(18): 199-207.
- [7] 吴晓刚, 吴新华, 季青锋, 等. 计及新能源不确定性的新能源场站与储能电站分布式协同优化[J]. *浙江电力*, 2022, 41(6): 54-61.
- WU X G, WU X H, JI Q F, et al. Distributed collaborative optimization of new energy stations and energy storage power stations taking account of the uncertainty of new energy [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2022, 41(6): 54-61.
- [8] 张浩博, 向往, 文劲宇. 应对受端交流故障的海上风电柔直并网系统主动能量控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(12): 4600-4613.
- ZHANG H B, XIANG W, WEN J Y. Active energy control of offshore wind power MMC-HVDC system to handle AC faults of receiving-end power grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(12): 4600-4613.
- [9] 张磊, 郭语, 石嘉豪, 等. 风火储一体化电站功率特性研究[J]. *动力工程学报*, 2022, 42(6): 568-574+581.
- ZHANG L, GUO Y, SHI J H, et al. Study on power characteristics of wind-coal-battery coupling integrated power station [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(6): 568-574+581.
- [10] 于会群, 帅永生, 靳东辉. 基于调频信号优化的储能调频控制策略[J/OL]. *电源学报*, 2022-05-25. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220524.1612.006.html>.
- YU H Q, SHUAI Y S, JIN D H. Energy storage frequency modulation control strategy based on frequency modulation signal optimization [J/OL]. *Journal of Power Supply*, 2022-05-25. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220524.1612.006.html>.
- [11] 张祥宇, 王玉珂, 付媛. 直流微电网的多端虚拟储能协调控制技术[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(5): 109-119.
- ZHANG X Y, WANG Y K, FU Y. Multi-terminal virtual energy storage coordinated control technology for DC microgrids [J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2022, 38(5): 109-119.
- [12] 严潇, 程杉, 左先旺, 等. 基于目标优选和模型预测控制的风储优化策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(1): 1-10.
- YAN X, CHENG S, ZUO X W, et al. Optimally selected objective and model predictive control based optimal strategy of wind power with energy storage [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1): 1-10.
- [13] 沈阳武, 宋兴荣, 罗紫韧, 等. 基于模型预测控制的分布式储能型风力发电场惯性控制策略[J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(10): 1285-1293.
- SHEN Y W, SONG X R, LUO Z R, et al. Inertial control strategy for wind farm with distributed energy storage system based on model predictive control [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2022, 56(10): 1285-1293.
- [14] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 基于多端直流联网的风电功率协调控制[J]. *高电压技术*, 2014, 40(2): 611-619.
- FU Y, WANG Y, ZHANG X Y, et al. Coordinated control of wind power in multi-terminal DC transmission system [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(2): 611-619.
- [15] HUANG S, WU Q W, GUO Y F, et al. Hierarchical active power control of DFIG-based wind farm with distributed energy storage systems based on ADMM [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1528-1538.
- [16] KIRUBAKARAN A. A review on fuel cell technologies and power electronic interface [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009,

- 13(9): 2430-2440.
- [17] 刘巨,姚伟,文劲宇,等. 一种基于储能技术的风电场虚拟惯量补偿策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1596-1605.
- LIU J, YAO W, WEN J Y, et al. A wind farm virtual inertia compensation strategy based on energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1596-1605.
- [18] FANG J Y, ZHANG R Q, LI H C, et al. Frequency derivative-based inertia enhancement by grid-connected power converters with a frequency-locked-loop [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4918-4927.
- [19] 周校聿,刘尧,鲍福增,等. 百兆瓦级储能参与电网双重辅助服务调度的联合优化模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 60-69.
- ZHOU X Y, LIU R, BAO F Z, et al. Joint optimization model for hundred-megawatt-level energy storage participating in dual ancillary services dispatch of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 60-69.
- [20] 彭勃,张峰,梁军. 考虑风速分区的风-储系统短期频率响应协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 57-65.
- PENG B, ZHANG F, LIANG J. Coordinated control strategy for short-term frequency response of wind-energy storage system considering wind speed partition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 57-65.
- [21] 虞临波,寇鹏,冯玉涛,等. 风储联合发电系统参与频率响应的模型预测控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 36-43.
- YU L B, KOU P, FENG Y T, et al. Model predictive control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 36-43.
- [22] ZHAO T Q, PARISIO A, MILANOVIĆ J V. Distributed control of battery energy storage systems for improved frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3729-3738.

收稿日期:2023-11-16

收到修改稿日期:2023-12-26

作者简介:

谢善益(1971-),男,硕士,教授级高工,研究方向为电力系统自动化及智能化,603933500@qq.com;

* 通信作者:仲卫,(1988-),男,学士,工程师,研究方向为电力调度自动化技术,zzhiquan@126.com。

Intelligent Control Method for Grid-Connected Operation of Offshore Wind Farm with Hybrid Electric Hydrogen Storage under Typhoon Conditions

XIE Shanyi¹, ZHONG Wei^{2*}, YANG Qiang¹, XIE Enyan², ZHOU Gang¹

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. NARI-TECH Nanjing Control Systems Co., Ltd., Nanjing 215200, China)

Key words: typhoon, offshore wind farm; hybrid electric hydrogen energy storage; grid-connected operation

With the increasing installed capacity of offshore wind power in China, coastal areas with developed economy and large power load increasingly rely on and pay attention to the safe operation of offshore wind power. The problem of friendly access to offshore wind farms becomes particularly prominent in the context of declining capacity of conventional thermal units in the system and low system inertia. Especially during typhoons, offshore wind farms may be quickly disconnected from the power grid before reaching the cut-off wind speed, resulting in a large power deficit in the main network, worsening voltage frequency and other adverse effects.

A grid-connected operation control method of offshore wind farm with hybrid electric hydrogen energy storage is proposed in this paper. During the normal operation of offshore wind farms, the method effectively smooth out the fluctuation of wind power during the normal operation of offshore wind farms by rationally arranging energy storage and charging/discharging. While during the transit of typhoons, the method alleviates the sudden drop in offshore wind power output and reduces the adverse impact on the grid at the affected end by rational use of hybrid electric hydrogen energy storage.

There are two operation scenarios for offshore wind farm with hybrid electric hydrogen storage: 1) grid-connected operation mode, in which the offshore wind farm provides electrical energy to the onshore grid as a power source. Operating in maximum power point tracking maximum power point tracking (MPPT) mode, the hybrid electric hydrogen storage will be charged or discharged depending on the

operating conditions. When the output power of the offshore wind farm exceeds the power required by the grid, the electricity will be stored in electric energy storage, and if there is any excess electricity, the electrolytic cell device will be activated to convert it into hydrogen and store it in hydrogen energy storage to eliminate the phenomenon of wind curtailment. If the demand from the grid exceeds the output of the available offshore wind farms, the additional power difference will be provided by hybrid electric hydrogen storage; 2) In extreme weather conditions such as typhoons, offshore wind farms do face the risk of rapid off-grid, while the traditional diesel generator set start-up and response time is long, unable to make up the power gap instantaneously, which may lead to large-scale power outages at the receiving end of the grid. To solve this problem, the solution is to install hybrid electric hydrogen energy storage systems on land offshore. Such a system can provide dynamic frequency support by converting electrical energy into hydrogen for storage and then back into electricity when needed to keep the system supply and demand balanced.

Finally, the validity of the proposed method is verified by simulating the real data of an offshore wind farm in Guangdong. The simulation results show that the energy storage system can effectively reduce the fluctuation of wind power output. Before the arrival of the typhoon, the hydrogen energy storage system can be charged in advance, and can provide energy quickly when the power demand is high. The positive number on the way indicates the process of hydrogen energy charging.