

含制氢储能的混合传动风电系统建模与运行特性分析

尹文良¹, 刘琳², 张存山¹, 芮晓明², 胡玉耀¹

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要:带有发电机前端调速装置的混合传动风电系统可以在没有电力电子变频设备的情况下与电网友好连接,有望解决现有主流变速恒频并网风电机组存在的无功损耗大、低电压穿越能力弱、输出电能质量和动态稳定性不高等问题。为了进一步提高风电机组的并网运行性能,提出一种含制氢储能的混合传动风电系统的基本架构,并对所提系统的能量传输机理与数值建模方法进行详细研究。搭建1.5 MW含制氢储能的混合传动风电系统的仿真模型,并利用物理试验对仿真模型进行原理验证。在随机变化风速输入和电网电压故障下,对所提系统的运行特性展开深入研究,结果表明含制氢储能的混合传动风电系统不仅可以有效平抑输出功率的波动,还可以提高系统的故障穿越能力和持续运行稳定性。

关键词:风力发电;混合传动;制氢储能;运行特性;建模;故障穿越

中图分类号:TM 614;TK 91

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009008

0 引言

在新能源发电中,风电技术日趋成熟、成本逐渐下降,已经成为我国新增电力供应的重要组成部分^[1]。然而由于风速是随机变化的,导致风电输出功率的波动性和间歇性问题突出;随着其应用规模的不断扩大以及风电在电网中渗透率的提升,大规模风电并网势必会增加配电网的调峰压力,降低电网的电能质量和运行稳定性。这也是导致我国风电存在消纳能力不足以及弃风现象严重的重要原因之一^[2-3]。

目前,我国主流风电系统大多采用变速恒频VSCF(Variable Speed Constant Frequency)的运行模式,以求在捕获更多风能的同时,减小风电并网对电网的冲击。但现役机组中采用的大功率电力电子变频设备会带来电压波动与电流谐波等问题,机组的低电压穿越能力不足也会影响电力系统运行的安全、稳定性^[4-5]。为了解决上述问题,一种带有发电机前端调速装置的混合传动型并网风电系统传动方案成为国内外的研究热点^[6-15]。此类系统采用同步发电机,以风轮转速和电网频率为基本参数,通过调速传动与伺服控制技术,使发电机获得同步于电网

频率的输入转矩驱动,从而可以在无变频设备的条件下实现风电机组的友好并网运行。以混合传动型并网风电系统为对象,各国学者(包括笔者所在团队)从总体方案与调速原理^[6-7]、传动特性^[8-10]、调速控制策略^[11-13]以及可行性^[14-15]等方面展开了诸多研究,搭建了相应的仿真模型和实验平台^[10,14-15],很好地验证了此类风电系统的原理可行性和优良的运行性能。

同时,储能技术的发展和规模化应用也为大规模风电友好并网提供了有效的技术途径。基于储能和风电系统的协调运行,不仅能够缓解系统的调频、调峰压力,还可以有效平抑风电输出功率的波动,降低大规模风电接入对配电网频率、电压稳定性的影响^[16-17]。传统的储能技术主要包括机械储能、电磁储能、热力储能和电化学储能等,这些储能技术都可以很好地满足能量在充放电短周期内就地使用,但在大规模、长期的能源存储方面稍显不足^[18]。氢能作为一种理想的二次能源,因具有无污染、热值高、密度小、应用场景多样、可长时间存储等优点,被世界各国广泛重视。风电与制氢储能HES(Hydrogen Energy Storage)系统相耦合可以为解决风能存储提供新思路,具有较好的经济可行性以及重要的研究意义和明确的市场前景^[19-21]。

在前期的研究中,基于单级差动轮系和调速电动机,笔者提出了一种可连续变速的混合传动风电系统方案,可实现机组无变频器并网发电运行,同时验证了此类系统的可行性和优越性^[10,12,14]。为了提高此类风电系统的并网运行性能,缓解风电出力波动以及大规模风电并网对电力系统故障穿越能力和运行稳定性的影响,本文结合大规模储能技

收稿日期:2019-12-17;修回日期:2020-07-12

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2017XS064,2017MS074);山东省高等学校青年创新团队发展计划(人才引进)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2017XS064,2017MS074) and the Youth Innovation Team Development Plan of Colleges and Universities in Shandong Province (Talents Attracting and Cultivating)

术,提出了一种含 HES 的混合传动风电系统方案,并对所提系统的能量传输机理和数值建模方法进行研究。搭建了所提系统的 1.5 MW 仿真模型,并结合试验平台验证了仿真模型的正确性。在随机变化风速输入和电网电压故障下,对含 HES 的混合传动风电系统的能量传输、功率波动、制氢速率和故障穿越能力等运行特性进行深入研究,验证了所提风氢耦合系统的原理可行性及其在能量效率、功率输出和并网运行性能上的优越性。

1 整体方案设计与数学建模

含 HES 的混合传动风电系统的基本结构如图 1 所示。此类风电系统主要包括风轮、增速齿轮联接单元、差动调速系统、同步发电机和电网等部分,而 HES 系统主要由电解槽、空气压缩机、储气罐以及质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 等单元组成。

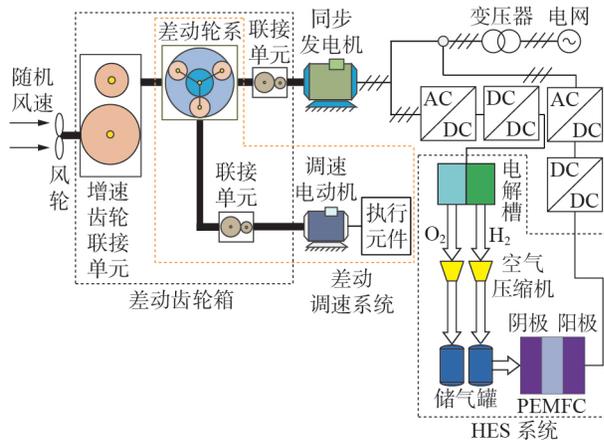


图 1 含 HES 的混合传动风电系统的基本结构

Fig.1 Basic structure of hybrid drive wind power generation system with HES

随机变化的风能经过风轮被转化为旋转的机械能,在经过差动调速系统后,由同步发电机转化为工频电能。当风电机组的输出功率大于其期望的并网功率时,一部分电能可在无需变频设备的条件下并网,同时剩余的电能可用来进行电解制氢。电解过程中产生的 H_2 、 O_2 不仅可以为 PEMFC 充电,同时 O_2 可用于工业和医疗, H_2 也可作为存储能源应用于电子、化工、冶金、玻璃和航空航天等各领域^[19]。当风电机组的输出功率与期望并网功率相等时,储能系统不工作,处于待机状态。当风电机组的输出功率小于期望并网功率时,PEMFC 进行放电操作来快速弥补功率缺额,从而平抑风电输出功率波动,保证电力系统运行的稳定性。此外,该风氢耦合系统还有望提高机组运行的低电压穿越能力,在电网发生故障时,HES 系统可吸收无法并网的一部分能量从而保障设备的安全;同时该风氢耦合系统具有快速放电能力,可支持电网电压的恢复。

1.1 混合传动风电系统的传动原理

差动轮系作为混合传动风电系统的核心,其构件的转速关系和剖面结构如图 2 所示。图中, n_c 、 n_s 、 n_R 、 n_P 分别为行星架、太阳轮、齿圈、行星轮的转速。为了确定差动轮系各构件的转速关系方程,利用反转法,可以假设在整个差动轮系上添加一个反转速,该转速与行星架的转速大小相同、方向相反。在假定的定轴轮系中,太阳轮和齿圈之间的转速比 i_{SR}^C 可根据式(1)计算。

$$i_{SR}^C = \frac{n_S^C}{n_R^C} = \frac{n_S - n_C}{n_R - n_C} = -k \quad (1)$$

其中, k 为差动轮系的结构参数,是一固定值; n_S^C 、 n_R^C 分别为太阳轮、齿圈相对于行星架的转速。

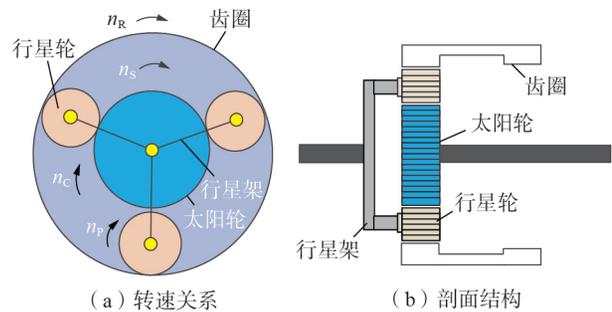


图 2 差动轮系的结构和转速关系

Fig.2 Structure and speed relationships of differential gear train

若设定增速齿轮的传动比为 i_{Cw} , 太阳轮与发电机之间的传动比为 i_{Sg} , 调速电动机与齿圈之间的传动比为 i_{Rm} , 结合式(1), 风轮到同步发电机输入轴之间的传动比 i_{gw} 如式(2)所示。

$$i_{gw} = \frac{n_g}{n_w} = \frac{n_s}{i_{Sg} n_w} = (1+k) \frac{i_{Cw}}{i_{Sg}} - k \frac{i_{Rm}}{i_{Sg}} \frac{n_m}{n_w} \quad (2)$$

其中, n_w 、 n_m 、 n_g 分别为风轮、调速电动机、同步发电机的转速。

对于实际的混合传动风电系统,若其结构确定,则参数 k 及传动比 i_{Cw} 、 i_{Rm} 、 i_{Sg} 均为固定值。由式(2)可知,机组传动系统的转速比 i_{gw} 将随着 n_m/n_w 的变化而不断改变。因此,若设定同步发电机的理想转速为 n_g^* ,同时利用传感器实时采集风轮的转速 n_w ,则调速设备可按照式(3)为调速电动机下达控制指令 n_m^* ,使得同步发电机获得恒定的输入转速驱动。

$$n_m^* = \frac{(1+k)i_{Cw}}{ki_{Rm}} n_w - \frac{i_{Sg}}{ki_{Rm}} n_g^* \quad (3)$$

1.2 传动系统的三轴动力学模型

将差动轮系各个内部联接单元的运动学参数分别等效转化至行星架、齿圈和太阳轮轴上,可建立如图 3 所示的传动系统三轴动力学模型。其中行星架低速轴上的所有构件被简化为带有角位移 θ_c 、转矩 T_c 以及转动惯量 J_c 的集中质量块,对齿圈调速轴和

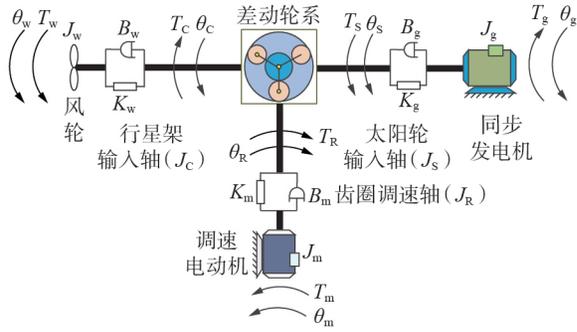


图3 传动系统的三轴动力学模型

Fig.3 Triaxial dynamic model of transmission system

太阳轮高速轴也采用相同的简化方法,最终可推导出所提系统行星架输入轴、太阳轮输出轴、齿圈调速轴的力学方程分别如式(4)~(6)所示。

$$\begin{cases} J_w d^2 \theta_w / dt^2 = T_w - T_C \\ T_C = B_w d\theta_w / dt + K_w (\theta_w - \theta_C) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} J_g d^2 \theta_g / dt^2 = T_s - T_g \\ T_s = B_g d\theta_g / dt + K_g (\theta_g - \theta_s) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} J_m d^2 \theta_m / dt^2 = T_m - T_R \\ T_R = B_m d\theta_m / dt + K_m (\theta_m - \theta_R) \end{cases} \quad (6)$$

其中, θ_w 、 θ_C 、 θ_s 、 θ_R 、 θ_m 、 θ_g 分别为风轮、行星架、太阳轮、齿圈、调速电动机、同步发电机的角位移; J_w 、 J_C 、 J_s 、 J_R 、 J_m 、 J_g 分别为风轮、行星架、太阳轮、齿圈、调速电动机、同步发电机的等效转动惯量; T_C 、 T_s 、 T_R 分别为行星架、太阳轮、齿圈传递的转矩; T_w 为风轮的转矩; T_m 、 T_g 分别为调速电动机、同步发电机的电磁转矩; K_w 、 K_g 、 K_m 以及 B_w 、 B_g 、 B_m 分别为行星架轴、太阳轮轴、齿圈轴的扭转刚度以及阻尼。

根据能量转换理论及传动系统的运动学原理,上述三轴的转速和转矩关系可总结推导如式(7)所示。

$$\begin{cases} T_C \frac{d\theta_C}{dt} + T_R \frac{d\theta_R}{dt} = T_s \frac{d\theta_s}{dt} \\ (1+k) \frac{d\theta_C}{dt} - k \frac{d\theta_R}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

式(4)~(7)可用于搭建含 HES 的混合传动风电系统的专用仿真模型。

1.3 HES 系统原理

电解制氢装置可以在用电低谷时段将剩余的风电用于制取 H_2 并且进行存储,在用电高峰时段为 PEMFC 提供能量产生电力,其结构和原理如附录中图 A1 所示。由图可以看出,在直流电的作用下,水被电解,其中阴极产生 H_2 , 阳极产生 O_2 。对于单体电解槽而言,其在给定温度下的电压 U_{el} 可根据式(8)计算^[22]。

$$U_{el} = U_{rev} + U_{\Omega} + U_J \quad (8)$$

$$\begin{cases} U_{\Omega} = \frac{a_1 + a_2 T_{el}}{A_{el}} I_{el} \\ U_J = (b_1 + b_2 T_{el} + b_3 T_{el}^2) \lg \left(\frac{c_1 + c_2 / T_{el} + c_3 / T_{el}^2}{A_{el}} I_{el} + 1 \right) \end{cases} \quad (9)$$

其中, U_{rev} 、 U_{Ω} 、 U_J 分别为单体电解槽的可逆电压、欧姆电压、极化电压; I_{el} 、 A_{el} 、 T_{el} 分别为电解槽的电感电流、电极面积、工作温度; a_1 、 a_2 为电解质的欧姆参数; b_1 — b_3 和 c_1 — c_3 为电极过电压参数。

将 N_{el} 个单体电解槽进行串联后,电解槽组的端电压 U_{Ael} 为:

$$U_{Ael} = N_{el} U_{el} \quad (10)$$

同时,由 Faraday 定律可知,电解槽组中 H_2 的产生速率 N_{H_2} 与 I_{el} 直接相关,具体关系见式(11)。

$$\begin{cases} N_{H_2} = \eta(T_{el}, I_{el}) \frac{N_{el}}{2F} I_{el} \\ \eta(T_{el}, I_{el}) = d_1 \exp \left[\frac{d_2 + d_3 T_{el} + d_4 T_{el}^2}{T_{el} / A_{el}} + \frac{d_5 + d_6 T_{el} + d_7 T_{el}^2}{(I_{el} / A_{el})^2} \right] \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\eta(T_{el}, I_{el})$ 为电解效率; F 为法拉第常数,取值为 96484600 C/kmol ; d_j ($j = 1, 2, \dots, 7$) 为经验值。电解槽的关键参数取值见附录中表 A1^[22]。

综上,总体 H_2 产生量 A_{H_2} 为:

$$A_{H_2} = \int_{t_1}^{t_2} N_{H_2} dt \quad (12)$$

其中, t_1 、 t_2 分别为电解制氢的开始时间、结束时间。

分析以上各式可知,单体电解槽的电压与工作温度直接相关。图4为不同工作温度下电解槽的电压-电流特性曲线。由图可以看出,随着工作温度的上升,电解槽的电压和能量效率下降。但由于电解制氢过程会产生大量热量,使得电解槽内部的温度上升,一般电解制氢装置需控制其工作温度大约在 $50 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内。

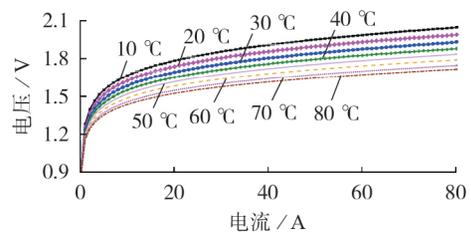


图4 不同工作温度下电解槽的电压-电流特性曲线

Fig.4 Voltage-current characteristic curves of electrolytic cell under different working temperatures

关于 H_2 的物理存储,其空气压缩机的功率 P_{com} 可根据式(13)计算^[23]。

$$P_{com} = \frac{N_{H_2} \mu Q T_{el} \left[\frac{(\mu - 1) p_{H_2}}{\mu P_{el}} - 1 \right]}{\alpha_{com} \mu - 1} \quad (13)$$

其中, α_{com} 为空气压缩机的效率; μ 为多级效率; p_{H_2} 为储氢罐的压强; Q 为气体常数; P_{el} 为电解槽消耗的电功率。

同时, 可以根据生产 H_2 的流量来计算储氢罐的压力, 如式(14)所示^[22-23]。

$$P_t - P_{in} = f_T \frac{N_{H_2} Q T_b}{M_{H_2} V_b} \quad (14)$$

其中, P_t 为存储气体后储氢罐的压力; P_{in} 为储氢罐内部的压力; T_b 为储氢罐的工作温度; V_b 为储氢罐的体积; M_{H_2} 为 H_2 的摩尔分子量大小, 为 2 g/mol ; f_T 为压缩因子, 与工作温度相关。

对于 PEMFC 而言, 根据文献[24]中介绍的输出特性公式, 可得单个电池的输出电压 U_{Cell} 为:

$$U_{Cell} = E_n^0 + \frac{Q T_{Cell}}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} - \frac{Q T_{Cell}}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} - \frac{Q T_{Cell}}{n F} \ln(1 - i/i_L) - i R_{Cell} \quad (15)$$

其中, E_n^0 为电池的标准电动势; P_{H_2} 、 P_{O_2} 、 P_{H_2O} 分别为 H_2 、 O_2 和水蒸气的有效分压; T_{Cell} 为 PEMFC 的工作温度; i 、 i_L 、 i_0 分别为流经 PEMFC 的电流、限制电流密度、交换电流密度; n 为电解过程中电子的计量系数; α 为无量纲的调整参数; R_{Cell} 为燃料电池的内阻。

那么, 包含 N_{Cell} 个单体电池的 PEMFC 的总体输出电压 U_{out} 为:

$$U_{out} = N_{Cell} U_{Cell} \quad (16)$$

2 仿真模型的搭建与试验验证

基于上述分析, 利用 MATLAB / Simulink 软件搭建含 HES 的混合传动风电系统的专用仿真平台, 其主要包括能源转换系统、传动系统、调速电动机、同步发电机、电网、制氢系统、储能系统、燃料电池和控制系统等核心单元, 且各单元的能量转换流程如图 5 所示。其中调速电动机、同步发电机和电网仿

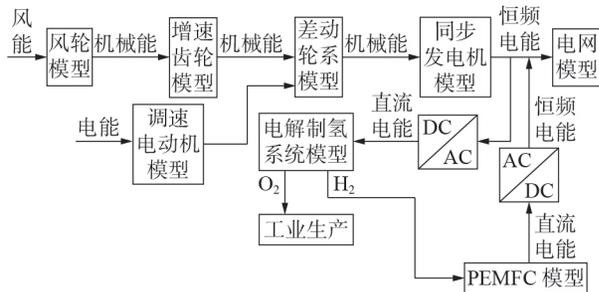


图 5 仿真模型中各关键单元的能量转换流程

Fig.5 Energy conversion process of key units in simulation model

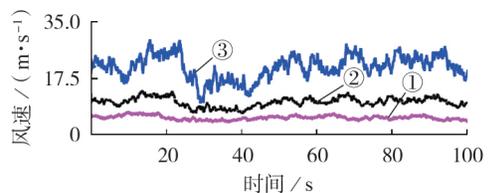
真均采用 Simulink 自带模块, 各传动轴的转动惯量利用 Solidworks 软件计算, 最大功率控制、调速电动机转速控制分别采用文献[9]和文献[12]中的方法, 传动系统则依据三轴动力学研究结果进行仿真建模。

由于将传动系统简化为三轴动力学模型会给仿真平台带来一定的误差, 在利用该仿真模型进行相关验证前, 基于附录中图 A2 所示的物理试验台, 对仿真模型的可用性和精确性展开原理性验证。

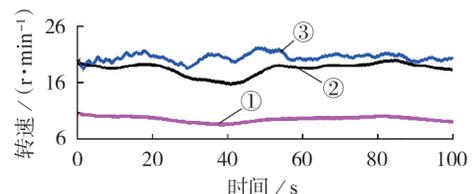
试验台的主要硬件设备包括工控机、传感器、差动齿轮箱和同步带轮、伺服电动机和伺服驱动器以及发电机等; 软件则由 DAQNav 驱动、LabVIEW 和 MATLAB 开发环境组成。试验台的核心装置——差动齿轮箱由单级行星减速器的圆柱形箱体固定带轮而成, 其结构参数 $k=2$ 。其中伺服电动机 1 用于模拟风轮生成随机变化的转速, 将其输入差动轮系构成主输入; 伺服电动机 2 依照伺服驱动器的指令生成调速输入, 并通过同步带装置传递至齿圈, 从而实时调节差动轮系的输出转速; 太阳轮以恒定的转速驱动同步发电机。2 台传感器用于实时采集各传动轴上的转速和转矩信号并将其输入控制系统, 完成调速电动机的转速控制。试验台各关键单元的选型如附录中表 A2 所示。

为了保证试验验证的有效性, 仿真模型按照试验平台的实际参数搭建。利用 FAST 软件得到平均风速分别为 5 、 10 、 21 m/s 的正常湍流风速模型, 如图 6(a) 所示, 对应的风轮转速如图 6(b) 所示。仿真时间设定为 100 s , 为了与试验条件对应, 此时同步发电机的理想转速设定为 300 r/min 。最终基于仿真模型和试验平台得到的发电机驱动转速如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 在不同的随机风速输入下, 仿真模型和试验平台所得发电机输入转速均能很好地



(a) 仿真风速模型



(b) 风轮转子转速

① 平均风速为 5 m/s , ② 平均风速为 10 m/s
③ 平均风速为 21 m/s

图 6 风速和风轮转速曲线

Fig.6 Wind speed and rotor speed curves

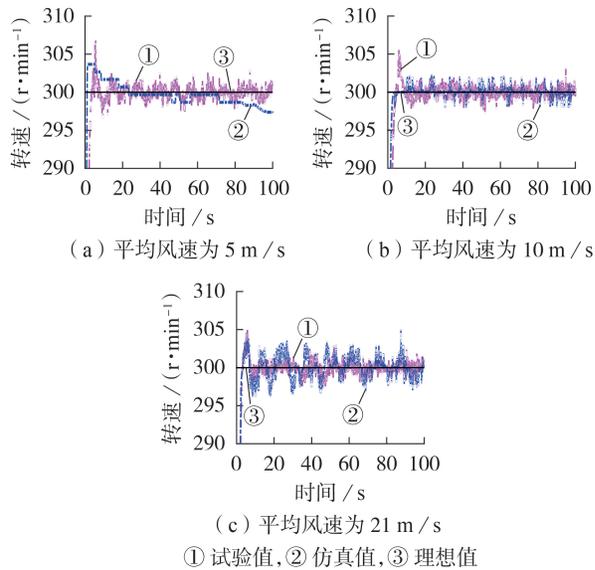


图7 不同风速下同步发电机的转速

Fig.7 Synchronous generator speed under different wind speeds

维持在理想值 300 r/min 左右,且误差较小。转速试验值的最大误差小于 2.40% (7.199 r/min),稳态平均误差(指的是风电机组运行在稳定状态后,其同步发电机转速与理想值 300 r/min 的误差平均值)小于 1.05% ,转速仿真值的最大误差小于 1.67% (4.995 r/min),稳态平均误差在 1.26% 以内,上述结果验证了仿真模型的可用性和精确的运行性能。

3 运行特性分析

3.1 正常状态下的运行特性

基于上述试验并利用相同的方法,结合 HES 系统,建立 1.5 MW 含 HES(额定容量为 300 kW) 的混合传动风电系统的专用仿真模型,并对该系统的运行特性展开研究。其中,仿真模型各关键单元参数见附录中表 A3,传动系统各部件的传动比采用文献[8]中的优化结果,且风电机组始终处于发电状态。以图 6 中平均风速为 21 m/s 的正常湍流风速模型为输入,采用文献[22]中的能量管理控制模式,在风电功率缺额补充、电解槽消纳冗余功率、电解槽额定功率运行这 3 种不同工况下对各能量单元的功率进行协调控制。在 100 s 仿真进程后,得到随机变风速下含 HES 的混合传动风电系统的发电机驱动转速、风轮机械功率、制/放氢速率(制氢表示风电机组的输出功率过剩,PEMFC 处于充电状态,放氢表示风电机组的输出功率不足,PEMFC 处于放电状态)以及发电机输出有功功率等运行特性,结果如图 8 所示。

由图 8(a)可以看出,在平均风速为 21 m/s 的正常湍流风速模型输入下,差动调速系统可以使得同步发电机的驱动转速恒定在额定值 1500 r/min

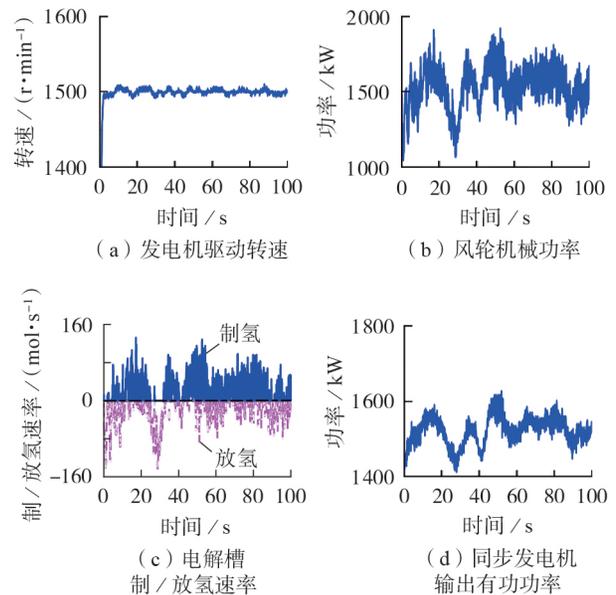


图8 变风速下含 HES 的混合传动风电系统的运行特性

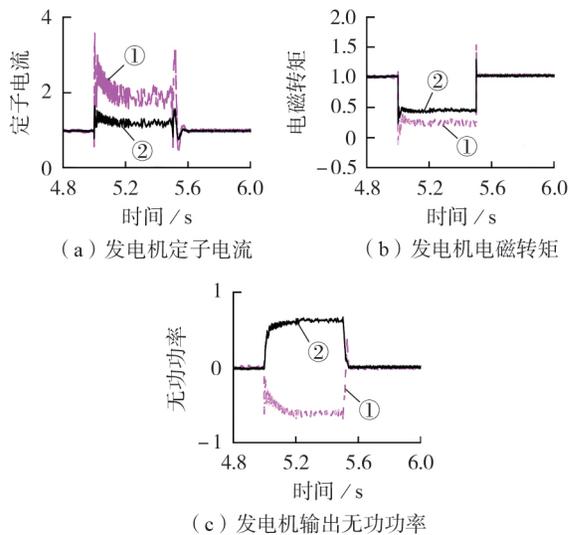
Fig.8 Operation performance of HDWPGS with HES under variable wind speed

附近,且最大稳态误差小于 0.67% ,平均稳态误差小于 0.46% ;输出电能的频率能满足国家标准要求。分析图 8(b)—(d)可知,HES 系统可以有效地平抑同步发电机输出功率的波动,且制氢量与风轮机械功率具有相似的变化特性;且在风轮机械功率最大波动为 55.33% (最大机械功率为 1920 kW ,最小机械功率为 1070 kW)时,利用 HES 系统可以调节同步发电机输出有功功率的波动率峰值在 14.07% (最大有功功率为 1625 kW ,最小有功功率为 1414 kW)之内。同时,HES 可以在机组风轮全功率区间范围内正常工作,能很好地适应风电输出功率的随机性和波动性,提高整体能量效率。

3.2 电压跌落故障下的运行特性

为了揭示含 HES 的混合传动风电系统的故障穿越性能,分别在专用仿真模型以及基于 Simulink 建立的双馈机组模型中添加相同的三相故障模块,模拟两者在 25 kV 母线处发生电压跌落故障。故障从 5 s 时开始,持续时间设定为 500 ms ,电压跌落深度为 0.75 p.u. 。仿真得到传统双馈型风电机组和含 HES 的混合传动风电机组在电网电压故障下的发电机定子电流、电磁转矩以及发电机输出无功功率,对比结果如图 9 所示(图中定子电流、电磁转矩、无功功率均为标么值)。

由图 9(a)、(b)可以看出,在电网电压出现跌落故障时,2 类风电系统的发电机定子电流和电磁转矩均会发生一定的振荡,其中双馈型风电机组的振荡情况较为恶劣,定子电流在故障发生时最大能达到额定值的 3.5 倍以上,电磁转矩最大跌落至额定值的 -10% ;对于含 HES 的混合传动风电系统而言,定



① 传统双馈型机组, ② 含 HES 的混合传动型机组

图 9 电压故障下不同机组的并网运行性能对比

Fig.9 Comparison of grid-connected operation performance between different generators under voltage fault

子电流振荡的最大幅值在额定值的 2 倍以下, 电网故障导致的发电机定子电流和电磁转矩的振荡有明显减小。由图 9(c) 可知, 含 HES 的混合传动风电系统在电网电压出现故障时, 不仅可以通过 HES 系统吸收能量, 缓解瞬时功率冲击, 同步发电机还可以为电网提供足够的无功功率, 以支持电网电压的恢复, 有效地保证了电力系统持续运行的稳定性。

4 结论

本文将储能技术和差动调速装置应用于 VSCF 并网风电机组, 提出了一种含 HES 的混合传动风电系统方案, 并对其能量传输机理和数值建模方法进行了研究, 利用搭建的专用数值仿真模型, 验证了该系统的原理可行性和运行特性的优越性。

相关结果表明, 差动调速装置可以使所提系统的同步发电机驱动转速稳定在额定值 1500 r/min 附近; HES 系统可以在风轮端的全功率变化区间内调节同步发电机输出有功功率的波动率峰值在 14.07% 以内; 同时, 当电网电压发生三相跌落故障时, 含 HES 的混合传动风电系统的发电机定子电流和电磁转矩波动大幅减小; HES 可有效吸收瞬时能量, 同步发电机也可以为电网提供大约 0.5 p.u. 的无功功率, 从而支持电网电压的恢复。

上述研究结果揭示了本文所提风电系统在提高风能利用效率、平抑风电出力波动以及改善系统低电压穿越能力等方面良好性能, 也为后期含储能技术的混合传动风电系统的发展和和应用提供了一定的理论基础。后续可开展含 HES 的混合传动风电系统的相关试验验证工作, 从而进一步完善此类方案的设计理论体系。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 风电发展“十三五”规划[R]. 北京: 国家能源局, 2016.
- [2] 江岳文, 陈梅森. 兼顾风电接纳与风电商利益的风电装机容量分层优化[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 52-59. JIANG Yuewen, CHEN Meisen. Hierarchical wind-power installation capacity optimization considering grid wind-power accommodation and wind-power supplier's benefit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 52-59.
- [3] 鄢发齐, 李姚旺, 汪旸, 等. 含 CAES 和多类型柔性负荷的电力系统多时间尺度电能-备用联合优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 73-81. YAN Faqi, LI Yaowang, WANG Yang, et al. Multi-time scale joint optimal dispatch of energy and reserve in power system with CAES and multi-type flexible load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 73-81.
- [4] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3770. CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3770.
- [5] YAO F, DONG Z Y, MENG K, et al. Quantum-inspired particle swarm optimization for power system operations considering wind power uncertainty and carbon tax in Australia [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(4): 880-888.
- [6] IDAN M, LIOR D. Continuous variable speed wind turbine: transmission concept and robust control[J]. Wind Engineering, 2000, 24(3): 151-167.
- [7] LIN Y G, TU L, LIU H W, et al. Hybrid power transmission technology in a wind turbine generation system[J]. IEEE / ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(3): 1218-1225.
- [8] SU R, RUI X M, WU X, et al. The design and analysis of wind turbine based on differential speed regulation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(2): 221-229.
- [9] REX A H, JOHNSON K E. Methods for controlling a wind turbine system with a continuously variable transmission in region 2 [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2009, 131(3): 121-128.
- [10] 芮晓明, 尹文良. 差动调速的风电机组传动特性研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(9): 1034-1040. RUI Xiaoming, YIN Wenliang. Research on transmission performances of wind turbines with differential speed regulation [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(9): 1034-1040.
- [11] YIN X X, LIN Y G, LI W. Operating modes and control strategy for megawatt-scale hydro-viscous transmission-based continuously variable speed wind turbines [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1553-1564.
- [12] YIN W L, WU X, RUI X M. Adaptive robust backstepping control of the speed regulating differential mechanism for wind turbines [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1311-1318.
- [13] LIU Q, APPUNN R, HAMEYER K. Wind turbine with mechanical power split transmission to reduce the power electronic devices: an experimental validation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8811-8820.
- [14] YIN W L, RUI X M, LIU L, et al. Operating performance

- analysis on wind turbines with the speed regulating differential mechanism[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2018, 10(6):063301.
- [15] LI X Q, DONG H Y, LI H W, et al. Optimization control of Front-End Speed Regulation (FESR) wind turbine based on improved NSGA-II[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:45583-45593.
- [16] 唐西胜, 邓卫, 李苏宁, 等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(3):99-103, 108. TANG Xisheng, DENG Wei, LI Ningning, et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(3):99-103, 108.
- [17] 范立新, 郭浩, 顾文, 等. 基于储能与桨距角协调控制的风电功率波动平抑方法[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(9):100-105. FAN Lixin, GUO Hao, GU Wen, et al. Wind power fluctuation suppression based on control coordination between energy storage and pitch angle[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(9):100-105.
- [18] WONG L A, RAMACHANDARAMURTHY V K, TAYLOR P, et al. Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 21:489-504.
- [19] GREINER C J, KOPAS M, HOLEN A T. A Norwegian case study on the production of hydrogen from wind power[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(10):1500-1507.
- [20] 刘海镇, 徐丽, 王新华, 等. 电网氢储能场景下的固态储氢系统及储氢材料的技术指标研究[J]. *电网技术*, 2017, 41(10):3376-3384. LIU Haizhen, XU Li, WANG Xinhua, et al. Technical indicators for solid-state hydrogen storage systems and hydrogen storage materials for grid-scale hydrogen energy storage application[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10):3376-3384.
- [21] 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.
- [22] ABDELKAFI A, KRICHEN L. Energy management optimization of a hybrid power production unit based renewable energies [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 62:1-9.
- [23] GORGUN H. Dynamic modelling of a Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyzer[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31(1):29-38.
- [24] CHRENKO D, LECOQ S, HERAIL E, et al. Static and dynamic modeling of a diesel fed fuel cell power supply [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(3):1377-1389.

作者简介:



尹文良

尹文良(1991—),男,安徽安庆人,讲师,博士,主要研究方向为新能源发电技术与装备(**E-mail**:yinwenliang@sdut.edu.cn);

刘琳(1994—),女,吉林四平人,博士研究生,主要研究方向为风电设备故障监测与运行优化(**E-mail**:liulinmasterstd@163.com);

张存山(1965—),男,山东淄博人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为特种电机的设计及控制、电力电子在电力系统中的应用(**E-mail**:zcs@sdut.edu.cn);

芮晓明(1955—),男,天津人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为风力发电技术与设备、电站设备节能与优化设计(**E-mail**:rxm@ncepu.edu.cn);

胡玉耀(1989—),男,山东潍坊人,讲师,博士,主要研究方向为电力设备防护与优化(**E-mail**:hyuyao@sdut.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Modeling and operation performance analysis of hybrid drive wind power generation system with hydrogen energy storage

YIN Wenliang¹, LIU Lin², ZHANG Cunshan¹, RUI Xiaoming², HU Yuyao¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The HDWPGS (Hybrid Drive Wind Power Generation System) equipped with generator front-end speed regulating mechanism can be connected to power grid in a friendly way without electronic converter equipment. It is expected to solve the problems of large reactive power loss, poor low voltage ride-through capability, weak output power quality and low dynamic stability existing in the mainstream variable speed constant frequency grid-connected wind turbines. In order to further improve the grid-connected operation performance of wind turbines, the basic architecture of HDWPGS with HES (Hydrogen Energy Storage) is proposed, and the energy transmission mechanism and numerical modeling method of the proposed system are studied in detail. The simulation model of a 1.5 MW HDWPGS with HES is established, and its principle is verified by physical test. The operation performance of the proposed system is studied in-depth under random variable wind speed input and grid voltage fault. The results show that the HDWPGS with HES can not only effectively smooth the output power fluctuations, but also improve the system's fault ride-through capability and continuous operation stability.

Key words: wind power generation; hybrid drive; hydrogen energy storage; operation performances; modeling; fault ride-through

附录

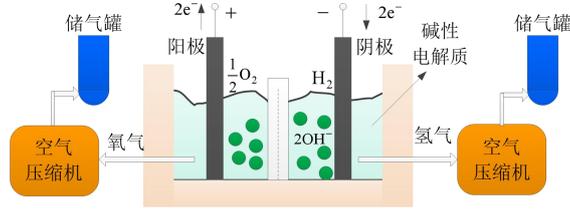


图 A1 电解制氢装置的结构与原理

Fig.A1 Structure and principle of hydrogen production by electrolysis

表 A1 电解槽的相关参数

Table A1 Related parameters of electrolytic cell

参数	取值	参数	取值
$a_1/(\Omega \cdot m^2)$	7.33×10^{-5}	$d_1/\%$	99.50
$a_2/(\Omega \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1})$	-1.11×10^{-7}	$d_2/(m^2 \cdot A^{-1})$	-9.58
b_1/V	0.16	$d_3/(m^2 \cdot A^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	-5.55×10^{-2}
$b_2/(V \cdot ^\circ C^{-1})$	1.38×10^{-3}	$d_4/(m^2 \cdot A^{-1} \cdot ^\circ C^{-2})$	0
$b_3/(V \cdot ^\circ C^{-2})$	-1.61×10^{-5}	$d_5/(m^4 \cdot A^{-1})$	1.50×10^3
$c_1/(m^2 \cdot A^{-1})$	-1.60×10^{-2}	$d_6/(m^4 \cdot A^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	-70.80
$c_2/(m^2 \cdot A^{-1} \cdot ^\circ C)$	-1.30	$d_7/(m^4 \cdot A^{-1} \cdot ^\circ C^{-2})$	0
$c_3/(m^2 \cdot A^{-1} \cdot ^\circ C^2)$	4.12	N_{el}	88
A_{el}/m^2	0.25	$T_{el}/^\circ C$	25

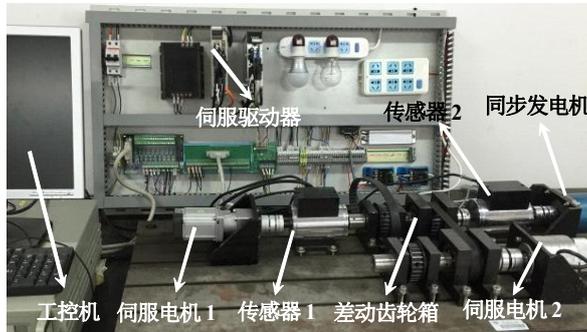


图 A2 物理试验台原型和设备

Fig.A2 Prototype and equipment of physical test platform

表 A2 试验台主要设备型号

Table A2 Key equipment model numbers of test platform

设备	型号
差动齿轮箱	PLS40-3
伺服驱动器	Yasukawa SGD V-2R8101A
伺服电动机	Yasukawa SGMJV-02ADD6S
同步发电机	90TDY-300
传感器	GB-DTS10
同步带轮	GT-ATP24L075

表 A3 1.5 MW 仿真模型的关键参数

Table A3 Key parameters of 1.5 MW simulation model

设备	参数	取值
风轮	额定功率/kW	1663
	扫略面积/m ²	3848
	半径/m	35
	惯量/(kg·m ²)	55600
发电机	额定转速/(r·min ⁻¹)	1500
	额定转矩/(N·m)	9550
	额定功率/kW	1500
	惯量/(kg·m ²)	100
调速电机	额定转速/(r·min ⁻¹)	3000
	额定电压/V	690
	额定功率/kW	300
	惯量/(kg·m ²)	9
	定子电阻/ Ω	0.0149
其他	永磁磁链/Wb	0.225
	轴阻尼/(N·m·s rad ⁻¹)	0.5
	结构参数	2.5
	最大风能捕获效率	0.473
	电解槽工作压力/Pa	3×10^5
	压缩机效率/%	63
	储气罐初始压力/Pa	2×10^6