

基于差动调速的风氢联合发电系统容量配置与运行性能

王乐¹, 尹文良^{1,2}, 李明¹, 孙晨业¹, 刘琳³

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 悉尼大学电气与信息工程学院, 澳大利亚 悉尼 2006; 3. 悉尼科技大学电气与信息工程学院, 澳大利亚 悉尼 2007)

A Study on Capacity Configuration and Operation Performance of a Wind-Hydrogen Generation System Based on the Speed Regulating Differential Mechanism

WANG Yue¹, YIN Wenliang^{1,2}, LI Ming¹, SUN Chenye¹, LIU Lin³

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

2. School of Electrical and Information Engineering, University of Sydney, Sydney 2006, Australia;

3. School of Electrical and Data Engineering, Sydney University of Technology, Sydney 2007, Australia)

ABSTRACT: The wind power generation system equipped with a speed regulating differential mechanism (SRDM) is able to be connected in a friendly manner to power grid without the need of partially- or fully- rated converters. The novel alternative transmission schemes can provide a new effective technical approach for not only the large-scale wind power grid-connected consumption but also the development of high- power wind generation equipment. In response to the national imperative for the carbon neutral and peak sustainability, with a primary focus on enhancing wind power integration, grid operation stability and economy, this paper presents a fundamental framework for a novel power generation system, in which a hydrogen energy storage unit is integrated into the SRDM-based wind turbine. The study encompasses an in- depth analysis of the proposed scheme's overall architecture and speed regulation principles, alongside the development of mathematical models for critical system components. Moreover, to ensure the stable and economical operation of the proposed wind-hydrogen system, a capacity optimization model for the hydrogen storage unit is formulated, taking into account uncertainties such as wind power output and load demand. While maintaining a high level of wind energy utilization, the configuration of the hydrogen storage

system is completed, shedding light on the influential patterns of key parameters on the capacity configuration results. Finally, a simulation model is constructed for the proposed scheme, through which the feasibility of the proposed concept and its superior operation performances are all verified under various wind speed conditions.

KEY WORDS: wind power generation; speed regulating differential mechanism; hydrogen energy storage; capacity configuration; operation performance of wind power system

摘要: 差动调速型风电机组可在无需整流-逆变装置下与电网友好连接,为大规模风电并网和特大型风电装备的研制提供了新的技术途径。面向国家“双碳”需求,以提高风电消纳能力及并网运行稳定性、经济性为导向,提出了一种基于差动调速的风氢联合发电系统方案,并分析了其基本结构和调速原理,构建了关键单元的数学模型。为确保风氢联合发电的系统稳定、经济运行,在综合考虑风电出力及负荷需求等不确定性因素条件下,建立了制氢储能系统的容量优化模型;在保持高水平风能利用的条件下,完成了制氢储能系统的容量配置,并揭示了关键参数对容量配置的影响规律。搭建了所提风氢联合发电系统的仿真模型,在不同风速条件下,验证了所提方案的原理可行性及其在运行性能上的优越性。

关键词: 风力发电;差动调速;制氢储能;容量配置;风电系统运行性能

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005306); 山东省高等学校青年创新团队发展计划项目(2022KJ323)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52005306); Youth Innovation Team Development Program of Colleges and Universities in Shandong Province (2022KJ323).

为积极应对气候变化的挑战,我国制定了“双碳”目标,着重促进低碳能源的利用;建立新能源为主体的电力系统,将成为我国未来能源电力改革的

重要方向^[1-2]。近年来,风电行业已被确定为我国的战略性新兴产业之一。在政策导向和市场需求的的双重推动下,全国范围内的风电产业迅猛发展^[3]。由于风电输出功率具有波动性、间歇性的特征,大规模风电并网定会增加电网的调峰压力、降低电能质量,影响电力系统运行的稳定性。这也是造成我国部分地区弃风现象严重、影响风电消纳的主要原因之一^[4-5]。

目前,主流的风力发电系统大多采用变速恒频的运行方式,通过部分或全功率变频设备,以实现风轮时变转速与恒定电网频率间的解耦,从而在优化风能捕获效率的同时,可有效减小风电波动对电网的不利影响^[6]。此类解决方案虽能满足当前风能利用产业的装备需求,但随着风电产业规模的扩大以及风电在电网中渗透率的增加,现有技术存在的问题日渐凸显,主要包括:整流-逆变环节控制难度高、具有高昂的制造和维护成本,且会激发谐波污染降低电能质量;低电压穿越能力不足,影响到电力系统的安全、稳定运行^[7-13]。

近年来,“带有发电机前端调速装置”的变速恒频风电机组新颖解决方案成为了国内外研究的热点^[14-20]。将差动调速原理与伺服控制技术结合,提出了一种差动调速型风电机组总体传动方案。该机组不再依赖大功率整流-逆变装置及相应的控制系统实现恒频电能输出,转而借助差动调速系统对机组主传动链末端输出转速进行实时调节,实现以相对恒定的转速驱动同步机并网发电运行^[19-23,24]。国内外学者也针对该类风电装备的概念方案设计^[12-13]、传动调速原理^[14-16]、功率/调速单元控制策略^[17-23]以及可行性验证^[24-25]等方面展开了诸多研究,并取得了丰硕的成果。

然而,不稳定的风电并网仍是“双高”电力系统

建设中面临的严峻挑战。储能技术的发展和规模化应用是解决大规模风电并网问题的有效措施^[26-29]。储能系统与风电机组的协调运行,可实现风电场的输出功率与电网的负荷需求从时间和空间上分离,缓解电力系统的调峰压力;还可以减小风电注入电网时引起的功率波动,以及对电网频率、电压稳定性的不利影响^[30-32]。氢能作为一种理想的二次能源,因其具有无污染、热值高、密度小、应用场景多样和可长时间存储等优点而被广泛关注。风电与制氢储能系统(hydrogen storage system, HSS)耦合具有重要的研究意义和明确的市场前景^[33-38]。

本文提出一种差动调速型风氢联合发电系统方案,并针对其容量优化配置和并网运行性能展开深入研究。在建立所提方案关键单元数学建模的基础上,考虑风电出力及负荷需求,以最大化项目年度净利润为目标,完成了HSS各单元容量的优化配置。搭建了所提风氢联合发电系统仿真模型,在不同风速条件下,验证了所提方案原理的可行性及其在运行性能上的优越性。

1 总体方案及数学建模

1.1 总体方案

所提风氢联合发电系统基本结构见图1,该机组主要由差动调速型风电机组和HSS两部分组成。其中,差动调速型风电机组主要由风轮、差动调速系统和同步发电机(synchronous generator, SG)等部分构成;HSS主要包括电解槽、质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)、空气压缩机、储氢罐和超级电容器等单元。

随机风速产生的风能经过风轮和差动调速系

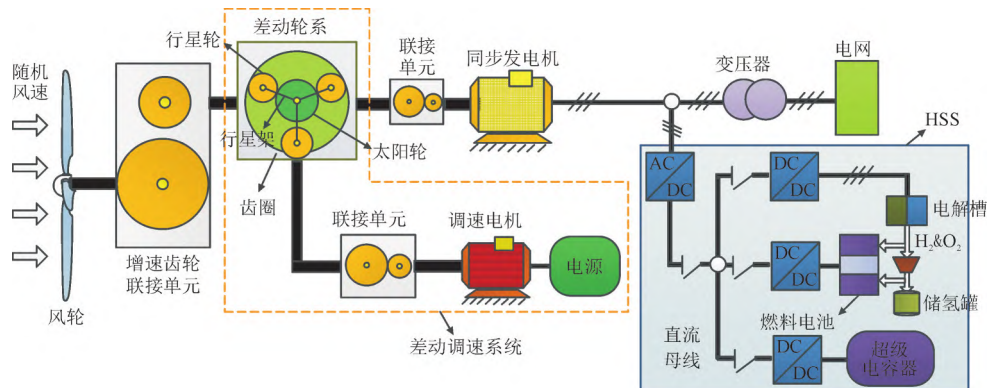


图1 风氢联合发电系统基本结构

Fig.1 Architecture of the proposed wind-hydrogen combined generation system

此时,产氢总量 M_{H_2} 可计算为

$$M_{H_2} = \int_{t_1}^{t_2} N_{H_2} dt \quad (11)$$

式中: U_{rev} 、 U_Ω 、 U_J 、 T_{el} 、 I_{el} 和 A_{el} 分别为电解槽的可逆电压、欧姆电压、极化电压、工作温度、电感电流和电极面积; $\eta(T_{el}, I_{el})$ 为电解槽的电解效率; F 为 Faraday 常数; a_1 、 a_2 为电解质欧姆参数; b_1 、 b_2 、 b_3 、 c_1 、 c_2 、 c_3 均为电极过电压参数; $d_j(j=1, 2, \dots, 7)$ 为经验值; t_1 、 t_2 分别为制氢的开始、结束时间。

1.4.2 PEMFC

PEMFC 的总输出电压 U_{Afc} 的计算公式为

$$U_{Afc} = N_{fc} U_{fc} \quad (12)$$

式中: N_{fc} 为 PEMFC 的数量; U_{fc} 为单个燃料电池的输出电压,可计算为^[37]

$$U_{fc} = E_n^0 + \frac{QT_{fc}}{2F} \ln\left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}}\right) - \frac{QT_{fc}}{\alpha n F} \ln\left(\frac{I_{fc}}{i_{ex0}}\right) - \frac{QT_{fc}}{nF} \ln\left(1 - \frac{I_{fc}}{I_{Lim}}\right) - I_{fc} R_{fc} \quad (13)$$

式中: p_{H_2} 、 p_{O_2} 和 p_{H_2O} 分别为 H_2 、 O_2 和水蒸气的有效分压; E_n^0 、 I_{fc} 、 i_{ex0} 、 I_{Lim} 、 T_{fc} 和 R_{fc} 分别为 PEMFC 的标准电动势、电流、交换电流密度、限制电流密度、工作温度及内阻; Q 为气体常数; α 、 n 为常数。

2 容量优化模型

为提高风氢联合发电系统的经济性,对 HSS 的容量优化问题进行了研究。在保持高水平风能利用的前提下,以最大化项目年度净利润为目标,寻找 HSS 的最优容量配置结果。考虑了风电出力和负荷需求等不确定性以及各单元安全运行等约束条件^[38-42]。其中,优化参数涉及电解槽、PEMFC、空气压缩机、储氢罐和超级电容器的容量,分别用 C_{el} 、 C_{fc} 、 C_{com} 、 C_t 和 C_{sc} 表示。

2.1 目标函数

总成本 M_{total} 包括投资成本、运维成本和附加运营成本,分别用 M_1 、 M_2 和 M_3 表示:

$$M_{total} = M_1 + M_2 + M_3 \quad (14)$$

所提风氢联合发电系统主要由差动调速型发电机和制氢储能系统组成,制氢储能系统主要包括电解槽、PEMFC、空气压缩机、储能罐和超级电容器等单元^[43-46]。采用等年值法将初始投资成本转化为等额年投资成本,其系数因子 A_k 为

$$A_k = \frac{d_k(1+d_k)^{N_k}}{(1+d_k)^{N_k+1} - 1} \quad k = WT, el, fc, com, t, sc \quad (15)$$

式中: N_k 为设备使用寿命; d_k 为贴现率; C_{WT} 为风电机组容量。

此时,等额年投资成本 M_1 为

$$M_1 = \sum_k A_k \bar{M}_{1k} C_k \quad k = WT, el, fc, com, t, sc \quad (16)$$

机组的运行维护成本相对固定, M_2 为

$$M_2 = \sum_k \bar{M}_{2k} C_k \quad k = WT, el, fc, com, t, sc \quad (17)$$

式中: M_{1k} 、 M_{2k} 分别为单位投资费用、单位固定运维费用。

附加运营成本包括两部分,即 HSS 达到其最大容量后产生的弃风惩罚成本 M_{pen} 和维持 HSS 持续运行的能源采购成本 M_{pur} 。

附加运营成本 M_3 的计算公式为

$$M_3 = M_{pen} + M_{pur} = \sum_{t=1}^T \bar{M}_{pen} P_{pen,t} + \sum_{t=1}^T \bar{M}_{pur} P_{pur,t} \quad (18)$$

式中: $\bar{M}_{pen}$ 、 $\bar{M}_{pur}$ 分别为 M_{pen} 、 M_{pur} 的单位平均值; $P_{pen,t}$ 、 $P_{pur,t}$ 分别为 t 时刻的弃风功率、变电站提供的功率。

项目总收益 B_{total} 为

$$B_{total} = B_1 + B_2 + B_3 \quad (19)$$

B_1 为出售电能产生的收益,具体计算如下:

$$\begin{cases} B_1 = u_{us} E_{us} + u_{fc} E_{fc} \\ E_{us} = \sum_{t=1}^T P_{us,t}, E_{fc} = \sum_{t=1}^T P_{fc,t} \end{cases} \quad (20)$$

式中: u_{us} 、 u_{fc} 分别为风电机组、PEMFC 的上网电价; $P_{us,t}$ 、 $P_{fc,t}$ 分别为风电机组、PEMFC 在 t 时刻传输的电网功率。

B_2 为售卖 H_2 获得的收益

$$B_2 = u_{hs} E_{hs} = u_{hs} \sum_{t=1}^T P_{hs,t} \quad (21)$$

式中: u_{hs} 为 H_2 年平均价格; $P_{hs,t}$ 为 t 时刻储氢罐的释氢功率。

B_3 为环境收益,来源于政府对风电的补贴、制氢成本的下降,分别用 B_{gov} 、 B_{cr} 表示。

$$B_3 = B_{gov} + B_{cr} \quad (22)$$

$$B_{cr} = C_{fh} + C_{ecr} \quad (23)$$

式中: C_{fh} 为煤制氢的电力成本; C_{ecr} 为煤发电的环境成本,且

$$C_{ecr} = \sum_{h=1}^H (\Delta m_h \lambda_h + \Delta m_h \mu_h) \quad (24)$$

式中: H 为污染物类别; Δm_h 为由风力发电所致第 h 种污染物的减少量; λ_h 、 μ_h 分别为第 h 种污染物的环境价值、惩罚系数。

综上,最大化项目年度净利润的目标函数为

$$\max f(C_{el}, C_{fc}, C_{com}, C_t, C_{sc}) = B_{total} - M_{total} \quad (25)$$

2.2 约束条件

2.2.1 功率平衡约束

风电机组产生的电能要输送到电网和电解槽,否则将产生弃风功率:

$$P_{WT,t} = P_{us,t} + P_{el,t} + P_{pen,t} \quad (26)$$

式中: $P_{el,t}$ 为 t 时刻传输到电解槽的功率。

2.2.2 H_2 平衡约束

从风电机组吸收的电能和从电网购买的电能都用于制氢。生产的 H_2 可以出售,也可以传输到 PEMFC 用于发电。

$$\begin{cases} P_{H_2,t} = (P_{el,t} + P_{pur,t} + \gamma P_{sc,t}) \eta_{el} \eta_{com} \\ P_{H_2,t} = P_{hs,t} + P_{fc,t} / \eta_{fc} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $P_{H_2,t}$ 、 $P_{fc,t}$ 和 $P_{sc,t}$ 分别为 t 时刻的储氢功率、PEMFC 的发电功率和超级电容器的运行功率; η_{el} 、 η_{com} 和 η_{fc} 分别为电解槽、空气压缩机和 PEMFC 的工作效率; γ 为 HSS 的工作模式,在工作模式 1 时 $\gamma=1$,在工作模式 3 时 $\gamma=-1$ 。

2.2.3 运行约束

风电机组的发电能力应受限于其组成单元的最大运行功率。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{us,t} \leq P_{rated} \\ 0 \leq P_{el,t} \leq C_{el} \\ 0 \leq P_{fc,t} / \eta_{fc} \leq C_{fc} \\ 0 \leq P_{sc,t} \leq C_{sc} \\ 0 \leq P_{pen,t} \leq P_{us,t} \\ 0 \leq P_{hs,t} \leq P_{H_2,t} \end{cases} \quad (28)$$

式中: P_{rated} 为风电机组的额定功率。

2.2.4 上网功率波动约束

风氢联合发电系统产生的上网功率应在规定范围内波动,以保证电网安全、稳定运行。

$$\left| (P_{us,t} + P_{fc,t} + \xi P_{sc,t}) - (P_{us,t-1} + P_{fc,t-1} + \xi P_{sc,t-1}) \right| \leq 0.1 P_{rated} \quad (29)$$

2.2.5 最佳运行功率约束

为保持 HSS 的经济性、稳定性,电解槽应处于最佳运行状态。

$$P_{el,min} \leq P_{el,t} + P_{pur,t} + \gamma P_{sc,t} \leq P_{el,max} \quad (30)$$

2.2.6 风能利用约束

为保持所提系统有较高的风能利用水平,采用机会约束规划,以确保弃风率小于 $P_{WT,t}$ 的 τ % 的概率大于等于 $1-\chi$, 本文将机会约束转换为具有给定置信水平的确定性等价约束^[28]。

$$\Pr \left[\left(\sum_{t=1}^T P_{pen,t} - \tau \sum_{t=1}^T P_{WT,t} \right) \leq 0 \right] \geq 1 - \chi \quad (31)$$

3 算例分析

3.1 算例参数

本文基于 3 MW 差动调速型风电机组实际参数构建算例,对容量优化模型进行验证分析。粒子群算法因其具有简单方便、全局最优解快速搜寻能力强、收敛速度较快、鲁棒性及适应性较强等特点而被广泛采用^[47-48]。因此,本文采用粒子群算法对容量优化模型进行求解,求解关键参数和数据来源于中国内蒙古示范项目。

3.2 容量配置结果分析

在优化过程中,设置了 4 种不同风能利用率的算例,用于风电消纳效果研究,得到不同风能利用率下的容量配置结果及年净利润,分别如表 1、表 2 所示。其中,算例 1 $1-\tau=0.8$,算例 2 $1-\tau=0.85$,算例 3 $1-\tau=0.9$ 和算例 4 $1-\tau=0.95$;置信水平 $1-\chi$ 均为 0.8。

与算例 1 相比,算例 2 的电解槽、PEMFC、储氢罐、空气压缩机和超级电容器的容量分别增长了 9.52%、7.46%、10.22%、6.48% 和 8.38%。算例 3、算例 4 的 HSS 容量分别增加了约 13% 和 25%。因 HSS 的投资和运维成本相对较高,年净利润随 $1-\tau$ 的增大而逐渐减小。与算例 1 相比,算例 2、算例 3、算例 4 的净利润分别减少了 19.2、31.4 和 41.1 万元。

表 1 不同风能利用率下的容量配置结果

Table 1 Optimal results under different wind

utilization rates

单位: kW

参数	算例			
	1	2	3	4
C_{el}	729.1	798.5	840.2	924.1
C_{fc}	646.1	694.3	743.5	832.5
C_t	772.7	851.7	903.5	951.6
C_{com}	424.2	451.7	472.3	527.3
C_{sc}	260.2	282.0	304.0	327.6

表2 不同风能利用率下的年净利润

Table 2 Annual net profit under different wind utilization rates 单位:万元

参数	算例			
	1	2	3	4
利润	173.9	154.7	142.5	132.8

3.3 关键参数影响分析

目前,HSS 的投资成本和工作效率是影响风氢联合发电系统容量配置的关键因素。在 95% 风能利用率和 0.8 置信水平下,设置算例 5(HSS 投资成本降低 5%)、算例 6(电解槽和 PEMFC 工作效率提高 5%)和算例 7(投资成本降低 5%,工作效率提高 5%)。在上述影响因素下 HSS 的容量配置结果和年净利润分别如表 3 和表 4 所示。

表3 关键参数影响下的容量配置结果

Table 3 Optimal results under the influence of key parameters 单位: kW

参数	算例			
	4	5	6	7
C_{el}	924.1	954.2	873.8	943.5
C_{fc}	832.5	867.7	800.8	854.8
C_t	951.6	975	935	961.4
C_{com}	527.3	541.4	515.8	536.6
C_{sc}	327.6	343.4	318.9	335.7

表4 关键参数影响下的年净利润

Table 4 Annual net profit under the influence of key parameters 单位:万元

参数	算例			
	4	5	6	7
利润	132.8	140.1	138.6	148.8

与算例 4 相比,算例 5 的 HSS 容量、净利润分别提高了 2.46%~4.82% 和 5.50%;算例 6 的 HSS 容量减少了 1.74%~5.44%,净利润增加了 4.37%;算例 7 的 HSS 容量、净利润分别提高了 1.03%~2.68% 和 12.05%。可见,改善 HSS 投资成本和工作效率,可有效提高风氢联合发电系统的收益。

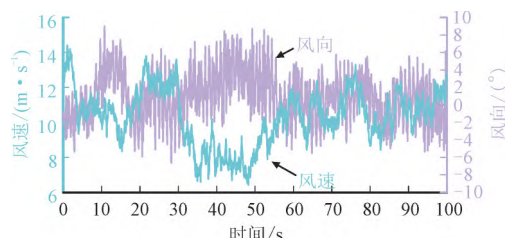
4 运行性能验证

基于图 3 数学模型和容量配置结果,搭建了风氢联合发电系统 Simulink 专用仿真模型。通过文献[15]中的物理试验,验证了仿真模型的可用性与准确性,为后续运行性能验证提供了有力支持。

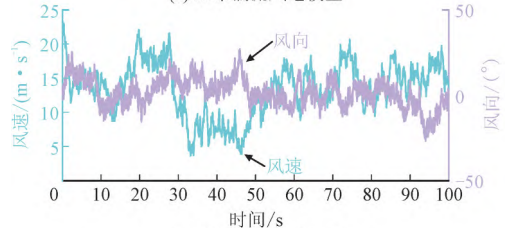
4.1 正常工况下的运行性能

为验证所提系统在调速和传输效率上的优良

性能,本节模拟了一种特殊的工作模式,即 SG 输出的电能全部传输到 HSS 中制氢。利用 FAST 软件,模拟了正常湍流(平均风速 10 m/s,湍流强度 20%)和极端湍流(平均风速 13 m/s,湍流强度 40%)风速模型,如图 3 所示。分别以上述风速模型为输入,仿真 100 s 后,得到风氢联合发电系统的转速、功率和制氢速率结果,分别如图 4、图 5 所示。



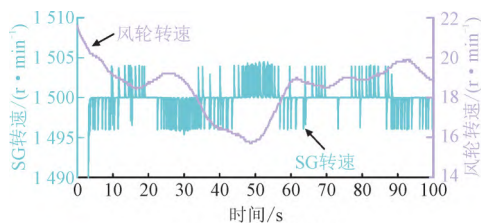
(a) 正常湍流风速模型



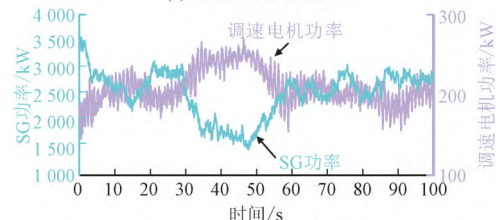
(b) 极端湍流风速模型

图3 FAST 仿真风速模型

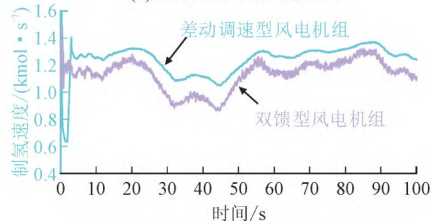
Fig.3 FAST simulation wind speed model



(a) SG转速和风轮转速



(b) SG功率和调速电机功率



(c) 差动调速型和双馈型风电机组制氢速率

图4 正常湍流风速下系统运行性能

Fig.4 System's operating performance under normal turbulent wind condition

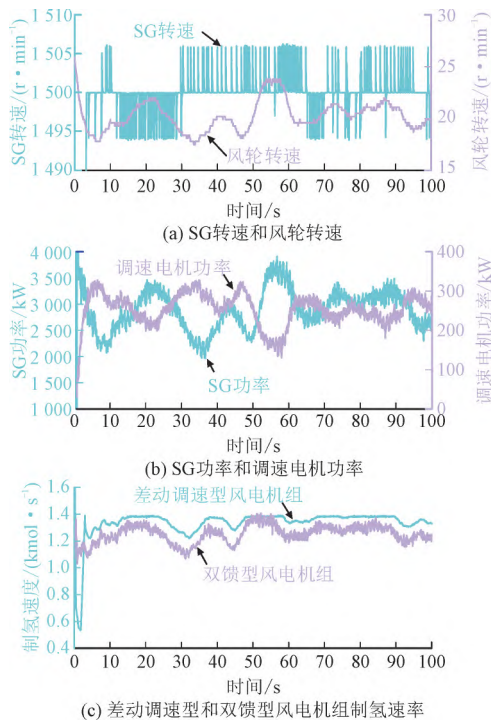


图5 极端湍流风速下系统运行性能

Fig.5 System's operating performance under extreme turbulent wind condition

由图4、图5可知:

1) 将不同风速作为输入,差动调速系统均可将SG的转速调节到1480~1520 r/min的范围内,SG转速的最大稳态误差均小于1.27%,平均稳态误差均在0.38%以内,符合国家标准GB/T15945—2008的要求。

2) 调速电机所需最大功率小于483.2 kW,仅占SG功率的17.73%。

3) 在两种风速下,差动调速型风电机组比双馈型风电机组分别多产生7.51%和5.84%的 H_2 ,验证了差动调速型风电机组在能量传输效率上的优越性。

为验证所提系统的并网运行性能,以正常湍流风速模型为输入,在给定负荷需求的情况下,研究了风氢联合发电系统的功率平衡状况,如图6所示。可见,电解槽和PEMFC动态特性优良,能够快速、稳定、准确地跟踪参考功率值,同时,并网功率也能很好地满足负荷需求。由图6(b)可知,并网功率与负荷需求的最大偏差和平均偏差分别显著降低至额定功率的4.15%和11.69%左右。此外,由图6(a)、图6(b)可知,HSS作为功率平衡器,可有效抑制风氢联合发电系统并网功率的瞬时波动;特定负载下其最大稳态波动在11.51%以内,而差动调速

型风电机组最大功率偏差达到23.67%。

4.2 故障状况下的运行性能

为验证所提系统的低电压穿越能力,在并网点出现三相对称故障(跌落深度0.80 pu、持续时间500 ms)下,对比分析了双馈型风电机组、差动调速型风电机组和所提风氢联合发电系统的并网运行性能,其发电机定子电流、电磁转矩和无功功率结果分别如图7—图9所示。

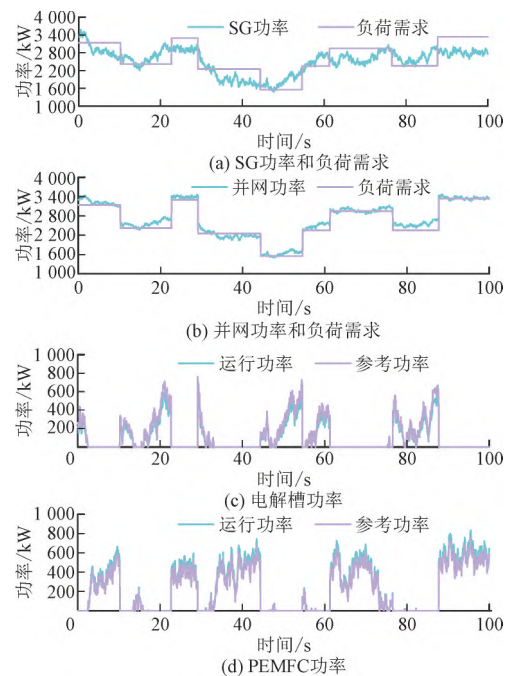


图6 风氢联合发电系统功率平衡图

Fig.6 Power balance results of the wind-hydrogen combined generation system

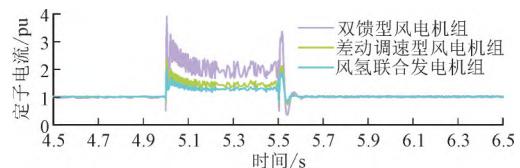


图7 三相电压对称故障下不同机组的定子电流

Fig.7 Stator current of different units under three-phase voltage symmetrical fault

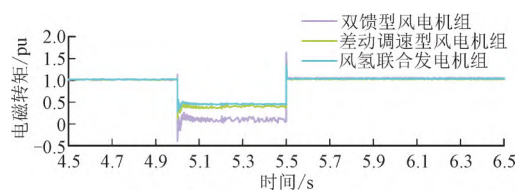


图8 三相电压对称故障下不同机组的电磁转矩

Fig.8 Electromagnetic torque of different units under three-phase voltage symmetrical fault

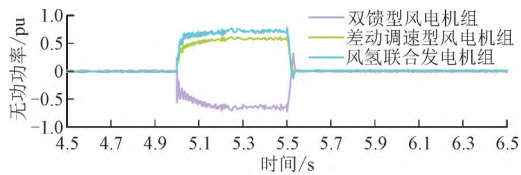


图9 三相电压对称故障下不同机组输出的无功功率
Fig.9 Reactive power output by different units under three-phase voltage symmetrical fault

当发生电压故障时,由图 7、图 8 可知,风氢联合发电系统的暂态定子电流和电磁转矩具有较小的振荡峰值和振荡谷底,分别为 1.98 pu 和 0.31 pu,仅为差动调速型风电机组和双馈型风电机组的 85 % 和 55 % 左右;同时,所提系统的各项指标在故障后可更加快速地恢复到稳态。此外,由图 9 可知,差动调速型风电机组与风氢联合发电系统均可向电网提供超过 0.5 pu 的无功功率,以支持电网电压的恢复。

5 结语

针对所提基于差动调速的风氢联合发电系统,本文研究了其在风电出力及负荷需求等不确定性下的容量配置策略,实现了所提系统稳定、经济、友好地并网运行。采用粒子群算法求解在高水平风能利用下的容量优化模型,分析了投资成本和工作效率对容量配置结果的影响。优化结果表明,风电消纳水平的提升导致 HSS 容量的扩大,但投资成本的上升也将使得项目净利润下降。算例仿真结果表明,差动调速系统作为转速调节器,在不同风速下均能使 SG 产生恒频电能;且与双馈型风电机组相比,差动调速型风电机组具有更高的传输效率。所提风氢联合发电系统具有较好的并网运行性能,在正常工况下,HSS 不仅能够快速补偿 SG 输出功率与电网负荷间的功率偏差,还可大幅度缓解并网功率的瞬时波动;在电网故障期间,所提系统具有足够的低电压穿越能力,支持电网电压的快速恢复。

参考文献

[1] 许洪华,邵桂萍,鄂春良,等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. 发电技术,2023,44(4):484-491.
XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation

Technology, 2023, 44(4): 484-491.

- [2] 荆朝霞. 新型电力系统下电力市场的建设及运行机制研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 1.
JING Zhaoxia. Research on the construction and operation mechanism of electricity market under new power system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 1.
- [3] 杨京渝,彭丽,罗隆福,等. 计及风电消纳的风储系统跟踪计划出力控制策略[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 160-170.
YANG Jingyu, PENG Li, LUO Longfu, et al. Wind storage system tracking plan output control strategy considering wind power consumption[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 160-170.
- [4] 盛四清,俞可,张文朝,等. 大规模风电并网对送端系统功角稳定的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 82-90.
SHENG Siqing, YU Ke, ZHANG Wenchao, et al. Influence of large-scale wind power grid connection on the power angle stability of the sending end system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 82-90.
- [5] 和萍,宫智杰,靳浩然,等. 高比例可再生能源电力系统调峰问题综述[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 108-121.
HE Ping, GONG Zhijie, JIN Haoran, et al. Review of peak-shaving problem of electric power system with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 108-121.
- [6] 谈竹奎,文贤馥,杨涛,等. 面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 1(3): 181-187.
TAN Zhukui, WEN Xiankui, YANG Tao, et al. A grid-connected control strategy for doubly-fed wind turbines for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 1(3): 181-187.
- [7] 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.
- [8] 杨玉坤,许建中. 基于超级电容储能的大容量直驱风电机组低电压穿越策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 106-116.
YANG Yukun, XU Jianzhong. Low voltage ride-through strategy for high-capacity direct-drive wind turbines

- based on supercapacitor energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 106–116.
- [9] LIU R, YAO J, WANG X, et al. Dynamic stability analysis and improved LVRT schemes of DFIG-based wind turbines during a symmetrical fault in a weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 303–318.
- [10] GUPTA A P, MITRA A, MOHAPATRA A, et al. A multi-machine equivalent model of a wind farm considering LVRT characteristic and wake effect[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(3): 1396–1407.
- [11] RAFIEE Z, HEYDARI R, RAFIEE M, et al. Enhancement of the LVRT capability for DFIG-Based wind farms based on short-circuit capacity[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2): 3237–3248.
- [12] IDAN M, LIOR D. Continuously variable speed wind turbine transmission concept and robust control[J]. Wind Engineering, 2000, 24(3): 151–167.
- [13] LIN Y, TU L, LIU H, et al. Hybrid power transmission technology in a wind turbine generation system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(3): 1218–1225.
- [14] ZHAO X, MAIBE P. A novel power splitting drive train for variable speed wind power generators[J]. Renewable Energy, 2003, 28(13): 2001–2011.
- [15] JELASKA D, PODRUG S, PERKUŠIĆ M. A novel hybrid transmission for variable speed wind turbines[J]. Renewable Energy, 2015, 83: 78–84.
- [16] SU R, RUI X, 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.
- [17] YIN X, LI Y, 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.
- [18] 马文星, 刘浩, 刘春宝, 等. 液力调速风电机组变速恒频双模控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 105–110.
- MA Wenxing, LIU Hao, LIU Chunbao, et al. Dual-mode variable speed constant frequency control of wind turbines with hydrodynamic speed control[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 45(3): 105–110.
- [19] YIN W, WU X, RUI X. Adaptive robust backstepping control of the speed regulating differential mechanism for wind turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1311–1318.
- [20] RUI X, YIN W L, DONG Y, et al. Fractional-order sliding mode control for hybrid drive wind power generation system with disturbances in the grid[J]. Wind Energy, 2019, 22(1): 49–64.
- [21] 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.
- [22] DONG H, CHEN N, LI X, et al. Improved adaptive robust control for low voltage ride-through of front-end speed regulation wind turbine[J]. IEEE Access, 2020, 8: 55438–55446.
- [23] LI X, DONG H, LI H, et al. Optimisation control of front-end speed regulation (FESR) wind turbine based on improved NSGA-II[J]. IEEE Access, 2019(7): 45583–45593.
- [24] YIN W L, RUI X, 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: 063301.
- [25] LI D Y, CAI W C, LI P, et al. Dynamics and control for a novel front-end speed regulation (FESR) wind turbine[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 4073–4087.
- [26] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1–10.
- WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1–10.
- [27] 余鹏飞, 朱继忠, 熊小伏, 等. 基于储能的电力系统安全调控方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 173–186.
- YU Pengfei, ZHU Jizhong, XIONG Xiaofu, et al. Regulating & control method of power system security based on battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 173–186.
- [28] 王镇林, 陈麒宇, 张雅静, 等. 基于混合储能减小平抑功率滞后性的风电平抑策略[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 149–159.
- WANG Zhenlin, CHEN Qiyu, ZHANG Yajing, et al. Wind-power smoothing strategy based on hybrid energy storage

- to reduce smoothing power lag[J].Electric Power Construction, 2023, 44(9): 149-159.
- [29] 李建涛,李永光,朱泊旭,等. 间歇式新能源消纳评估常用方法分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 85-93.
LI Jiantao, LI Yongguang, ZHU Boxu, et al. Analysis of common methods for intermittent renewable energy consumption assessment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 85-93.
- [30] 马瑞,李浩,吴震宇. 考虑置信水平的混合储能平抑风电波动[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 35-40.
MA Rui, LI Hao, WU Zhenyu. Wind power fluctuations suppression with hybrid energy storage considering the confidence level[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 35-40.
- [31] 马艳霞,周静涵,董晓晶,等. 计及不确定性和混合储能设备的综合能源系统多目标优化调度模型[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 19-32.
MA Yanxia, ZHOU Jinghan, DONG Xiaojing, et al. Multi-objective optimal scheduling model for multi energy system considering uncertainty and hybrid energy storage devices[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 19-32.
- [32] 黄福荣,许方园,刘国中,等. 计及负荷需求响应的风光储氢系统容量优化配置[J]. 供用电, 2023, 40(2): 45-51.
HUANG Furong, XU Fangyuan, LIU Guozhong, et al. Optimal capacity allocation of wind solar hydrogen storage system considering load demand response[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(2): 45-51.
- [33] 闫群民,穆佳豪,马永翔,等. 分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 67-74.
ZHANG Zhibo, WANG Yibo, ZHANG Zikui, et al. The application status and development of laser barrier removal technology in power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 67-74.
- [34] 曾一鸣,马瑜涵,吴启亮. 电氢耦合典型应用场景分析及经济性评估[J]. 浙江电力, 2023, 42(9): 1-8.
ZENG Yiming, MA Yuhan, WU Qiliang. Application analysis and economic evaluation of typical electricity-hydrogen coupling scenarios[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(9): 1-8.
- [35] 张焱,郝振波,朱振涛,等. 海上风能岸上制氢的经济可行性分析[J]. 电力建设, 2023, 44(3): 148-154.
ZHANG Yan, HAO Zhenbo, ZHU Zhentao, et al. Economic feasibility analysis of onshore hydrogen production using offshore wind power[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 148-154.
- [36] 崔杨,安宁,付小标,等. 面向高比例新能源电力系统调峰需求的储能容量配置方法综述[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 1-8.
CUI Yang, AN Ning, FU Xiaobiao, et al. Overview of energy storage capacity allocation methods for high-proportion new energy power system peak shaving demand[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(1): 1-8.
- [37] 夏晨阳,杨子健,周娟,等. 基于新型电力系统的储能技术研究[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(4): 3-12.
XIA Chenyang, YANG Zijian, ZHOU Juan, et al. Research of energy storage technology based on new power system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(4): 3-12.
- [38] 高维娜,于海青,苏文威,等. 储能电站可靠性与安全性技术研究进展[J]. 电池, 2022, 52(1): 110-113.
GAO Weina, YU Haiqing, SU Wenwei, et al. Research progress in reliability and safety technology of energy storage power station[J]. Battery Bimonthly, 2022, 52(1): 110-113.
- [39] 吴健,吴奎华,崔灿,等. 分布式新能源配电网输出线路负载诊断模型分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2023, 45(3): 259-263.
WU Jian, WU Kuihua, CUI Can, et al. Analysis of load diagnostic model for output line of distributed new energy distribution network[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2023, 45(3): 259-263.
- [40] 王华佳,张岩,于丹文,等. 储能电站接入电网电能质量评估分析[J]. 山东电力技术, 2022, 49(3): 1-6.
WANG Huajia, ZHANG Yan, YU Danwen, et al. Evaluation and analysis of power quality of power energy storage station connected to power grid[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(3): 1-6.
- [41] 张继红,冀伟成. 基于改进遗传算法的光伏系统储能优化配置[J]. 中国测试, 2021, 47(1): 160-168.
ZHANG Jihong, JI Weicheng. Optimal allocation of energy storage in photovoltaic system based on improved genetic algorithm[J]. China Measurement and Test, 2021, 47(1): 160-168.
- [42] 谢永胜,王凡,胥国毅,等. 大规模可再生能源接入区域电网侧储能频率稳定控制方法研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(2): 222-229.
XIE Yongsheng, WANG Fan, XU Guoyi, et al. Study on frequency stability control of grid-side energy storage with large-scale renewable energy integration[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(2): 222-229.
- [43] 曲嘉伟,朱乐为,刘泽宇,等. 计及压缩空气储能的综合

- 能源微网可靠性评估[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(6): 8-18, 105.
- QU Jiawei, ZHU Lewei, LIU Zeyu, et al. Reliability assessment for integrated energy microgrid system with compressed air energy storage[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42(6): 8-18, 105.
- [44] 许志军, 臧鹏程, 白格平, 等. 考虑风储联合运行系统经济性的储能配置优化[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(4): 47-53.
- XU Zhijun, ZANG Pengcheng, BAI Geping, et al. Energy storage configuration optimization considering economy of wind-storage combined operation system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(4): 47-53.
- [45] 李圣清, 文颜烯, 郑剑, 等. 储能型双馈风电机与SVG的无功电压联动控制策略[J]. 湖南电力, 2022, 42(3): 43-48.
- LI Shengqing, WEN Yanxi, ZHEN Jian, et al. Linkage control strategy of energy-storage dual-feed wind unit and svg reactive voltage[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(3): 43-48.
- [46] FANG B, QIU W, WANG M, et al. Evaluation index system of shared energy storage market towards renewable energy accommodation scenario: a China's Qinghai province context[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(1): 77-95.
- [47] 时维帅, 孙欣, 谢敬东, 等. “双碳”目标下风氢联合系统参与现货市场的优化运行与效益分析[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 1-12.
- SHI Weishuai, SUN Xin, XIE Jingdong, et al. Optimal operation and benefit analysis of wind-hydrogen combined system in spot market with the double carbon goal[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 1-12.
- [48] 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.
-
- 收稿日期: 2023-10-23。 修回日期: 2023-12-17。
- 作者简介:
- 王 乐(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源并网技术及应用;
- 尹文良(1991—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电技术与装备、综合能源系统优化运行、微电网规划与运行控制;
- 李 明(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网规划与运行控制;
- 孙晨业(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化运行;
- 刘 琳(1994—), 女, 博士, 研究方向为电机驱动系统设计与优化。
- (编辑 董小兵)