新概念兆瓦级风热机组性能预测与分析研究

钟晓晖^{1,2}, 孙香宇^{1,2}, 张明明^{1,2,3}, 徐建中^{1,2,3*}

1. 中国科学院工程热物理研究所, 国家能源风电叶片研发(实验)中心, 北京 100190;

2. 中国科学院风能利用重点实验室, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

* E-mail: xjz@iet.cn

收稿日期: 2020-03-11; 接受日期: 2020-05-08; 网络版发表日期: 2020-07-02

中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA21050600)资助项目

摘要 风能热利用是一种可以替代燃煤锅炉供暖的变革性洁净能源技术, 是解决北方地区冬季雾霾问题的有效途径之一. 风能热利用一方面可以解决燃煤供暖所带来的环境污染问题, 另一方面还可以解决风能消纳问题. 基于“温度对口、梯级利用”的科学用能原则, 提出了“风热机组”首创概念, 以MATLAB/Simulink仿真平台为基础, 结合BEM理论和热泵循环模型, 构建了风热机组仿真模型. 搭建了风热机组性能测试实验平台, 验证了仿真模型的可靠性. 在此基础上, 通过研究不同风况对兆瓦级风热机组的影响, 获得了兆瓦级风热机组性能曲线和典型工况下的运行规律. 研究结果可为拓展风能利用新方向, 满足国家清洁供暖的重大需求提供新的技术方案和理论依据.

关键词 风热机组, 叶素动量理论(BEM)模型, 蒸汽压缩式, 热泵, 仿真

1 引言

随着国民经济的迅速发展和人民生活水平的提高, 采暖、空调和生活用热的需求越来越大. 我国北方地区供暖能源以燃煤为主, 燃煤锅炉的大量使用, 给大气环境造成了极大的污染. 另一方面, 我国城镇化的高速推进使得北方城镇建筑面积不断增长, 北方城镇集中供暖面积亦随之快速增长. 截至2016年底, 我国北方地区城乡建筑取暖总面积约 $206 \times 10^8 \text{ m}^2$. 其中, 城镇建筑取暖面积 $141 \times 10^8 \text{ m}^2$, 农村建筑取暖面积 $65 \times 10^8 \text{ m}^2$. 当前我国面临着供热短缺和清洁能源供暖替代的双重压力. 因此, 以清洁能源为主导的能源构成

将成为未来能源发展及解决供热短缺和环境问题的必由之路.

我国风能资源丰富, 具有大规模开发利用的前景, 2019年, 我国新增并网风电装机 $2.574 \times 10^7 \text{ kW}$, 累计并网装机容量达到 $2.1 \times 10^8 \text{ kW}$, 占全部发电装机容量的10.4%. 我国风电装备制造业已经成为具有国际竞争力的优势产业之一, 但由于风能的波动性、间歇性特征, 伴随着大规模风电并网而来的是消纳矛盾——弃风限电始终难以彻底解决. 2019年, 尽管弃风限电现象得到了大幅缓解, 但全国弃风限电量仍然高达 $169 \times 10^8 \text{ kWh}$, 严重影响了风电效率和效益水平的提高. 在非电领域, 尤其是建筑供热及工业用热方面, 我

引用格式: 钟晓晖, 孙香宇, 张明明, 等. 新概念兆瓦级风热机组性能预测与分析研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1404–1412

Zhong X H, Sun X Y, Zhang M M, et al. Performance prediction and analysis of new concept MW-scale wind turbine heating system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1404–1412, doi: 10.1360/SST-2020-0096

国可再生能源发展利用水平明显滞后, 目前, 我国可再生能源供暖面积仅占北方地区供暖面积的2%。发改委、能源局等十部委共同发布的《北方地区冬季清洁取暖规划(2017~2021)》中指出, 到2021年北方地区清洁取暖率达到70%, 基本实现雾霾严重化城市地区的散煤供暖清洁化。

目前, 风力致热已经引起了国内外的广泛关注, 风力致热的能量利用率高, 对风质要求低, 风况变化的适应性强, 蓄能问题也便于解决。另外, 风力致热装置结构简单, 且容易满足风力机对负荷的最佳匹配要求^[1]。风力致热一方面可以解决燃煤供暖所带来的污染问题, 另一方面还可以缓解弃风问题^[2]。我国已在内蒙古、吉林等地的3个风电场进行了风电供暖试点, 利用风电弃风电量进行加热和储热, 从而实现为居民供暖^[3]。但是, 用电热锅炉采暖经济性较差, 且不符合“温度对口、梯级利用”的科学用能原则。

当前, 发电机组及配套电气系统在风电系统中的成本接近30%, 为了降低风力致热系统的成本, 国内外很多学者利用液体搅拌致热、固体摩擦致热、挤压液体致热和涡电流致热等方式开展了风力直接致热系统的研究, 但该类风力致热系统的效率只有40%左右, 系统经济性较差^[4]。如果利用风能直接驱动热泵机组来提高采暖所需的低质热能, 则可以大量节约能源。冯毅和杨根华^[5]提出了一种利用风力机直接驱动制冷压缩机的制冷系统, 并分析了不同风速下风力机与制冷压缩机的匹配关系; 台北科技大学^[6~8]提出一种风能和热泵结合的新方法, 将风力机与压缩机直接连接, 使风能直接转化为压缩机的机械能, 最终转化为用户所需要的热能或冷量。但该系统并没有解决风力机偏航等问题; 目前上述研究尚处于起步阶段, 对于风能直接驱动热泵机组的研究也集中在实验室条件下定风向性能测试, 而相关的理论研究报道还很少, 还未见从系统集成的高度提出相关设计方法。

鉴于现有风能供暖技术研究的不足, 徐建中领导中国科学院工程热物理所团队提出了“风热机组”的首创思想, 风热机组是一种基于空气动力学和热力学理论的新型风能利用技术, 风热机组工作原理如图1所示, 不经过发电环节而直接将风能转化为热能, 使系统造价降低的同时系统效率大幅度提升。图2为风热机组机舱结构示意图, 主要风力机叶片、增速箱、压缩机、偏航电机和变桨电机等, 利用风力带动叶片旋

图1 (网络版彩图)风热机组工作原理图

Figure 1 (Color online) Working principle of wind turbine heating system.

图2 (网络版彩图)风热机组机舱结构示意图

Figure 2 (Color online) Cabin structure of wind turbine heating system.

转, 再通过齿轮箱增速后驱动压缩机做功, 压缩机通过金属软管与放置于地面的换热器相连, 将机械能及低温热源的热能一起转移至高温热源, 从而实现高效制热和制冷。

本文以风热机组为研究对象, 通过对兆瓦级风热机组建模仿真, 获得兆瓦级风热机组性能曲线和典型工况下的运行特性。

2 风热机组整机模型构建

风热机组主要包括风力机、齿轮箱、压缩机、换热器等结构部件,其能量转化及传递过程如下:风能驱动风轮转动,将风的动能转化为风力机的转动能;升速传动机构实现风力机低速轴和高速轴的连接,将风力机的转动能转化为压缩机轴功;压缩机压缩循环工质做功,将轴功转化成工质内能,同时从低温热源提取热量.以美国可再生能源实验室(NREL)开发的Aero-dyn/FAST风力机仿真平台为基础,结合叶基动量理论(BEM)和开启式压缩机模型,构建了1.5 MW风热机组仿真模型.

2.1 系统模型

2.1.1 风力机模型

本文采用FAST平台来模拟风力机的实际运行状况,基于BEM理论的风轮模型如下式所示^[9]:

$$T = n \cdot \int dT$$

$$= n \cdot \int_{R_0}^R \frac{1}{2} \rho r l w^2 C_l \cdot \sin I (1 - \varepsilon \cdot \cot I) dr. \quad (1)$$

2.1.2 传动机构模型

传动机构采用刚性轴模型^[10],其计算公式如下:

$$(J_m + G^2 J_c) \omega + B \omega = T_a - G T_c. \quad (2)$$

2.1.3 热泵机组模型

针对热泵系统中的各个部件分别进行建模,包括压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器.

(1) 压缩机模型

压缩机是风热机组的核心部件,开启式压缩机的计算模型可按式计算^[11]:

$$Pad = \frac{k}{k-1} p_s q_v \left[\left(\frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (3)$$

式中, k 为被压缩气体的等熵指数; p_s 为吸气压力,Pa; p_d 为排气压力,Pa; q_v 为压缩机实际体积流量, m^3/h .

(2) 蒸发器、冷凝器模型

本文换热器计算公式如下^[12].

制冷剂侧能量方程:

$$Q_r = m(h_1 - h_2). \quad (4)$$

水侧能量方程:

$$Q_a = m_a(h_{a1} - h_{a2}). \quad (5)$$

微元换热方程:

$$Q_r = UA_i DT_m, \quad (6)$$

式中, Q_r 为制冷剂侧换热量,W; m 为制冷剂流量,kg/s; h_1 为制冷剂侧进口焓值,kJ/kg; h_2 为制冷剂侧出口焓值,kJ/kg; Q_a 为载冷剂侧换热量,W; m_a 为载冷剂流量,kg/s; h_{a1} 为载冷剂侧进口焓值,kJ/kg; h_{a2} 为载冷剂侧出口焓值,kJ/kg; U 为基于制冷剂侧换热面积的总传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; A_i 为制冷剂侧换热面积, m^2 ; T_m 为对数平均温差, $^\circ C$.

(3) 节流阀模型

节流阀下式计算^[12]:

$$m = C_d A_{th} \sqrt{2 \rho_L (P_{in} - P_{back})}. \quad (7)$$

节流前后制冷剂焓值不变:

$$h_{in} = h_{out}, \quad (8)$$

式中, m 为制冷剂流量,kg/s; C_d 为流量系数; A_{th} 为膨胀阀喉部流通面积, m^2 ; P_{in} 为膨胀阀进口压力,Pa; P_{back} 为膨胀阀出口背压,Pa; h_{in} 为膨胀阀进口焓值,kJ/kg; h_{out} 为膨胀阀出口焓值,kJ/kg.

2.2 实验验证

基于风力机模拟系统搭建了风热机组半物理仿真实验平台系统图,如图3所示.该系统以伺服电机为驱动力,利用风力机模拟系统模拟不同风况下风力机的功率输出,采用低温恒温水槽模拟低温热源,高温恒温水槽模拟热用户,压缩机与冷凝器和蒸发器通过金属软管进行连接,进而可以实现风热机组的偏航运行,系统所用制冷剂为R134a.实验系统包括4个部分:风力机模拟系统、开启式热泵机组、高低温热源和数据测量及采集系统.图4为风热机组半物理仿真实验平台.

利用风热机组半物理仿真实验平台对不同转速下热泵机组输入功率、制热量和性能系数(COP)等参数的仿真结果进行了验证.实验测试工况:蒸发温度为 $10^\circ C$ (以土壤做热源)、冷凝温度为 $55^\circ C$.图5(a)为热泵输入功率随压缩机转速的变化曲线,可见,输入功率随转速增加呈近似线性规律增大.图5(b)为制热量随压缩机转速的变化曲线,热泵机组制热量随转速呈近似线性规律;图5(c)为热泵机组COP随压缩机转速的变化曲

图 3 (网络版彩图)风热机组半物理仿真实验平台系统图

Figure 3 (Color online) Experimental system diagram of wind turbine heating system.

图 4 (网络版彩图)风热机组半物理仿真实验平台

Figure 4 (Color online) Semi-physical simulation experiment platform of wind turbine heating system.

线,可以看出,COP随转速先增大后逐渐减小,机组存在最佳转速。

从对比结果可以看出,制热量模拟值与实测值较为接近;压缩机输入功率在低转速和高转速时误差稍大,除个别点误差超过5%以外,其余均低于5%;COP的模拟值与实测值除在高转速时偏离稍大外,其余均较为接近,计算结果可靠,满足仿真要求,为兆瓦级风热机组仿真分析奠定了基础。

3 风热机组仿真及性能分析

基于风热机组各部件的仿真模型,将风速子系

统、传动机构子系统、风力机子系统、热泵子系统进行封装和组合^[13],最终在MATLAB/Simulink平台上建立风热机组仿真模型,如图6所示。

3.1 风热机组性能曲线

基于风热机组仿真平台,选用某1.5 MW水平轴风力机,对1.5 MW风热机组进行仿真,计算条件采用常温、标准大气压下,空气的密度 ρ 为 1.225 kg/m^3 ,风力机静态时,桨矩角 β 为 0° ,模拟风速为3~21 m/s。风热机组主要技术参数如表1所示。在低风速工况下,风力机在恒定叶片桨距和可变转速下工作,使其在最佳风轮空气动力学范围内工作;在高风速工况下,速度控制和变桨距控制协调工作,保持风轮在恒定的功率下工作。在此控制模式下,可以获得风热机组在不同风速时的性能曲线。

图7为风热机组在不同风速下的风轮转速和COP,从图中可见,风热机组风轮转速和COP随风速变化可分为3个阶段:在风速3~5 m/s区间,风轮转速和COP随风速增加而线性增加,但增速较缓;在风速5~11 m/s区间,风轮转速和COP随风速增加而线性增加,但增速较快;在风速9~21 m/s区间,风轮转速和COP随风速增加而保持恒定。

图 5 (网络版彩图)不同转速下热泵机组输入功率(a)、制热量(b)和COP(c)的实测与模拟值
Figure 5 (Color online) Measured and simulation value of input power (a), heating capacity (b) and COP (c) under different rotation speed.

图 6 (网络版彩图)基于Simulink平台建立的风热机组模型
Figure 6 (Color online) Wind turbine heating system model based on Simulink.

图8为风热机组在不同风速下的机械功和制热量,从图中可见,风热机组机械能和制热量随风速变化可分为两个阶段:在风速3~11 m/s区间,机械能和制热量

随风速增加而指数规律增加;在风速11~21 m/s区间,机械能和制热量随风速增加而保持恒定。

图9为风热机组在不同风速下的风能利用系数Cp

表 1 1.5 MW 风热机组主要技术参数**Table 1** Main technical parameters of 1.5 MW wind turbine heating system

规格型号		数据
运行参数	额定输出功率 (kW)	1500
	额定制热量 (kW)	6420
	切入风速 (m/s)	3.5
	额定风速 (m/s)	11
	风轮直径 (m)	70.5
风轮	扫风面积 (m ²)	3902
	额定转速 (r/min)	17.39
	叶片数量 (p)	3
	俯仰角 (°)	5
变速箱	变速箱类型	平行轴+行星齿轮
	传动比	1:88
	工质	R134a
热泵机组	冷凝温度(冬/夏) (°C)	55/45
	蒸发温度(冬/夏) (°C)	10/0
塔架	高度 (m)	70

图 7 (网络版彩图)不同风速下风热机组风轮转速和COP**Figure 7** (Color online) Wind wheel rotation speed and COP of wind turbine heating system under different wind speed.

及一次能源利用率,从图中可见,风热机组风能利用系数先降低后增加,风速7.74 m/s时Cp达到峰值0.4627,之后逐渐降低;风热机组一次能源利用率Cp×COP和风能利用系数呈现类似变化规律,但其峰值向高风速后移,风速8.54 m/s时达到峰值1.9363,这是由于风轮转速与压缩机转速叠加所致。

3.2 典型工况下风热机组性能分析

风热机组可广泛地应用于建筑冷暖、生态农渔、

图 8 (网络版彩图)不同风速下风热机组机械能和制热量**Figure 8** (Color online) Mechanical energy and heating capacity of wind turbine heating system under different wind speed. **图 9** (网络版彩图)风热机组风能利用系数及一次能源利用率**Figure 9** (Color online) Wind energy utilization coefficient and primary energy utilization of wind turbine heating system.

工业加热等领域分布式供能系统,以张家口涿鹿县黄帝城小镇为例进行分析,黄帝城小镇位于北纬40.2334°、东经115.4374°,风功率密度为263.8 W/m²,年等效利用小时数为2261 h。供暖建筑物类型为酒店,采用风机盘管供热供冷,酒店供暖热负荷指标按45 W/m²考虑,酒店空调冷负荷指标按60 W/m²考虑。选用R134a作为制热工质,设计工况:蒸发温度为10°C(以土壤做热源),冷凝温度为50°C。图10为黄帝城小镇70 m高度全年逐时风速变化曲线,其年平均风速为6.46 m/s,夏季风速较低,平均风速约为5.0 m/s,冬季平均风速可达7.0 m/s以上。

利用风热机组仿真平台对1.5 MW风热机组进行

图 10 (网络版彩图)黄帝城小镇全年逐时风速
Figure 10 (Color online) Huangdi town hourly wind speed throughout the year.

仿真计算, 可得该机组在稳态工况下的性能参数以及仿真曲线。图11(a)为1.5 MW风热机组在冬季典型工况

下逐时风速及COP的变化曲线, 图11(b)为1.5 MW风热机组在冬季典型工况下机械能和制热量的变化曲线, 1.5 MW风热机组制热量最高可达5.34 MW, 平均制热量约3.0 MW, 可满足 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^2$ 建筑物供暖需求。

图11(c)为1.5 MW风热机组在夏季典型工况下逐时风速及COP的变化曲线, 图11(d)为1.5 MW风热机组在夏季典型工况下机械能和制冷量的变化曲线, 1.5 MW风热机组制冷量最高可达3.5 MW, 平均制冷量约1.2 MW, 可满足 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^2$ 建筑物空调需求。

4 讨论与结论

提出“风热机组”原创概念, 基于热泵循环和空气动力学理论构建了风热机组仿真模型, 对系统在不同风速和典型工况下的运行特性开展相关模拟研究和分析, 得出以下主要结论。

(1) 构建了风热机组半物理仿真实验平台, 对不同风速下热泵机组输入功率、制热量和COP等参数进行

图 11 (网络版彩图)冬季和夏季典型工况下风热机组性能分析. (a) 冬季典型工况下逐时风速和COP变化; (b) 冬季典型工况机械能和制热量变化; (c) 夏季典型工况逐时风速和COP变化; (d) 夏季典型工况机械能和制冷量变化

Figure 11 (Color online) Wind turbine heating system performance under winter and summer typical working condition. (a) Hourly wind speed and COP under winter typical working condition; (b) mechanical energy and heating capacity under winter typical working condition; (c) hourly wind speed and COP under summer typical working condition; (d) mechanical energy and heating capacity under summer typical working condition.

了测试, 与模拟值对比结果可见, 除个别点误差超过5%以外, 其余均较为接近, 验证了仿真模型的可靠性.

(2) 基于风热机组仿真模型, 获得兆瓦级风热机组在不同风速时的性能曲线. 在风速3~5 m/s区间, 风轮转速和COP随风速增加而线性增加, 但增速较缓; 在风速5~11 m/s区间, 风轮转速和COP随风速增加而线性增加, 但增速较快; 在风速9~21 m/s区间, 风轮转速和COP随风速增加而保持恒定. 在风速3~11 m/s区间, 机械能和制热量随风速增加而指数规律增加; 在风速

11~21 m/s区间, 机械能和制热量随风速增加而保持恒定. 风速7.74 m/s时 C_p 达到峰值0.4627, 之后逐渐降低; 风热机组一次能源利用率 $C_p \times COP$ 在风速8.54 m/s时达到峰值1.9363.

(3) 以张家口涿鹿县黄帝城小镇为例进行分析, 1.5 MW风热机组制热量最高可达5.34 MW, 平均制热量约3.0 MW, 可满足 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^2$ 建筑物供暖需求; 1.5 MW风热机组制冷量最高可达3.5 MW, 平均制冷量约1.2 MW, 可满足 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^2$ 建筑物空调需求.

致谢 中国科学院战略性先导科技专项课题在石可重、张磊、廖猜猜、武广兴、荣晓敏、白井艳、宋娟娟、秦志文、蔡畅、李苏威等20人的通力协助下得以顺利实施, 在此深表谢忱.

参考文献

- 1 Li H S, Feng X D, Liu T. Research progress of wind heating technology in China (in Chinese). *Solar Energy*, 2008, 9: 37–40 [李华山, 冯晓东, 刘通. 我国风力致热技术研究进展. *太阳能*, 2008, 9: 37–40]
- 2 Wang C X, Li Q H, Xie G H. Evaluation of wind power heating in facilitating wind power integration capability during valley load period (in Chinese). *Electric Power*, 2013, 46: 100–106 [王彩霞, 李琼慧, 谢国辉. 风电供热提高低谷风电消纳能力评估. *中国电力*, 2013, 46: 100–106]
- 3 Zhang X Y, Li B, Yao Y. Technology of heating by wind power (in Chinese). *Power Syst Clean Energy*, 2014, 30: 94–97 [张新宇, 李斌, 姚远. 风电供暖技术方法研究. *电网与清洁能源*, 2014, 30: 94–97]
- 4 Zhang C, Li J R, He J K, et al. Research developments of wind heating technology and the key devices of wind heating system in China (in Chinese). *Energy Eng*, 2016, 4: 31–39 [张超, 李俊瑞, 何静昆, 等. 我国风能致热技术及系统关键设备的研究进展. *能源工程*, 2016, 4: 31–39]
- 5 Feng Y, Yang G H. Compression refrigeration system powered by wind turbine (in Chinese). *Acta Energ Sola Sin*, 2009, 30: 810–813 [冯毅, 杨根华. 风力驱动压缩制冷(制热)系统的研究. *太阳能学报*, 2009, 30: 810–813]
- 6 Ting C C, Lee J N, Shen C H. Development of a wind forced chiller and its efficiency analysis. *Appl Energy*, 2008, 85: 1190–1197
- 7 Jwo C S, Chien Z J, Chen Y L, et al. Development of a wind directly forced heat pump and its efficiency analysis. *Int J Photoenergy*, 2013, 2013: 862547
- 8 Ting C C, Lai C W, Huang C B. Developing the dual system of wind chiller integrated with wind generator. *Appl Energy*, 2011, 88: 741–747
- 9 Gao F, Xu D P, Lv Y G. Modeling of wind turbine rotor based on blade element theory (in Chinese). *Modern Electric Power*, 2007, 24: 52–57 [高峰, 徐大平, 吕跃刚. 基于叶素理论的风力发电机组风轮建模. *现代电力*, 2007, 24: 52–57]
- 10 Zhang Z Y. Study on real-time simulation and modeling of VSCF wind turbine group system (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: North China Electric Power University, 2010 [张照彦. 变速恒频风电机组建模与实时仿真研究. 硕士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2010]
- 11 Wang Z M, Wang J, Zhou C J. Compressor (in Chinese). Beijing: China Petrochemical Press, 2012 [王宗明, 王君, 周昌静. 压缩机. 北京: 中国石化出版社, 2012]
- 12 Zhang C L. Simulation Principle and Technology of Refrigeration and Air-Conditioning System (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2013 [张春路. 制冷空调系统仿真原理与技术. 北京: 化学工业出版社, 2013]
- 13 Xue D Y, Chen Y Q. System Simulation Technology and Application Based on MATLAB/Simulink (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2011 [薛定宇, 陈阳泉. 基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用. 北京: 清华大学出版社, 2011]

Performance prediction and analysis of new concept MW-scale wind turbine heating system

ZHONG XiaoHui^{1,2}, SUN XiangYu^{1,2}, ZHANG MingMing^{1,2,3} & XU JianZhong^{1,2,3}

¹ National Laboratory of Wind Turbine Blade Research & Development Center, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² Key Laboratory of Wind Energy Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Wind energy heat utilization is a kind of innovative clean energy technology that can replace coal-fired boilers and can enhance the capacity of wind energy accommodation. Wind energy heat utilization can solve the pollution problems caused by coal-fired heating and the problem of wind energy accommodation. Based on the scientific energy utilization principle of temperature matching and cascade utilization, the novel idea of wind turbine heating system has been proposed, and the simulation model of a wind turbine heating system was established on the basis of the MATLAB/Simulink platform combined with BEM theory and heat pump model. An experimental platform for the performance testing of wind turbine heating system was developed, which verified the reliability of the simulation model. By studying the influence of different wind conditions, the performance curves and operating characteristics of the megawatt-scale wind turbine heating systems were obtained. These research results can provide new technical solutions and the theoretical bases for giving new direction to wind energy utilization research, which will meet the global need for the use of clean sources of heating.

wind turbine heating system, BEM model, vapor compression, heat pump, simulation

doi: [10.1360/SST-2020-0096](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0096)